

Ảnh hưởng của nhiệt độ cao đến tính chất của bê tông chế tạo từ tro bay và silica fume

Đỗ Thị Phượng¹, Vũ Minh Đức²

¹Khoa Xây dựng Cầu đường, trường Đại học Bách khoa, Đại học Đà Nẵng

²Khoa Vật liệu xây dựng, trường Đại học Xây dựng

TỪ KHOẢ

Bê tông chịu nhiệt

Tro bay

Silica fume

Cường độ nén

Nhiệt độ cao

TÓM TẮT

Bài báo nghiên cứu ảnh hưởng của nhiệt độ cao đến một số tính chất của bê tông chế tạo từ cốt liệu tro xi nhiệt điện, chất kết dính từ xi măng poóc-lăng (OPC) và tro bay (FA), silica fume (SF). Thành phần hạt cốt liệu tính toán theo công thức Andersen. OPC được thay thế bởi 16,0 % FA và 5,3 % SF (theo khối lượng). Mẫu sau khi chế tạo, dưỡng hộ 7 ngày trong điều kiện tiêu chuẩn, sấy ở 100°C trong 24 giờ rồi nung ở các cấp nhiệt 200, 400, 600 và 800 với tốc độ 5°C/ph, thời gian hằng nhiệt 2 giờ, rồi làm lạnh đến nhiệt độ phòng. Khối lượng thể tích và cường độ nén được xác định ở mỗi cấp nhiệt độ. Khi tăng nhiệt độ đến 800°C, mẫu HRC có khối lượng thể tích mất 2 % và cường độ nén còn lại 58 %. Phân tích kính hiển vi điện tử quét (SEM) chỉ ra sự thay đổi liên kết giữa đá xi măng và cốt liệu (ITZ) khi tăng nhiệt độ.

KEYWORDS

Heat-resistance concrete

Fly ash

Silica fume

Compressive strength

High temperature

ABSTRACT

This paper studies on the properties of concrete produce with coal ash as aggregate and binder from Ordinary Portland cement (OPC), fly ash (FA), silica fume (SF). OPC has been partially replaced by 16 % FA and 5.3 wt.% SF. The samples were mixed and moulded into 70.7 × 70.7 × 70.7 mm cubes. After curing 7 days under standard conditions, the samples were dried at 100°C for 24 hours, and heated at temperature levels of 200, 400, 600 and 800°C for 2 hours, then cooled to room temperature. Bulk density and compressive strength were determined at each firing temperature. The temperature up to 800°C, their bulk density loss of 2 % and relative residual compressive strength of 58 %. The change in the interfacial transition zone of cement harder and aggregate (ITZ) with increasing temperature determined by scanning electron microscope (SEM).

1. Giới thiệu:

Bê tông xi măng làm việc ở nhiệt độ cao thường bị thay đổi thành phần và các tính chất cơ lý [1-4]. So với giá trị ở nhiệt độ phòng, khi sấy đến 200 ÷ 300°C, cường độ bê tông hầu như không giảm, mô đun đàn hồi giảm còn khoảng 70 %, khi nhiệt độ tăng trên 400°C thì cường độ của bê tông giảm mạnh, mô đun đàn hồi còn khoảng 40 %, đến 800°C thì cường độ bê tông còn lại khoảng 10 ÷ 20 %, mô đun đàn hồi còn khoảng dưới 10 % và đến 1000°C mẫu bị phá hủy hoàn toàn [3, 4]. Như vậy, với những công trình chịu tác động của nhiệt cao, lâu dài và biến động, cần sử dụng những loại bê tông chịu nhiệt (HRC).

Về cốt liệu cho HRC, người ta thường sử dụng các cốt liệu nhân tạo như sa mốt, mulit, mảnh vỡ gạch cao alumin [5]. Một số cốt liệu tự nhiên như đá bazan, diaba thích hợp chế tạo bê tông làm việc ở nhiệt độ nhỏ hơn 600°C [6, 7]. Các cốt liệu là phế liệu, phế thải như gạch ngói đất sét nung, xi lò cao, xi đáy lò có thể chế tạo HRC làm việc đến 800°C, tùy theo loại chất kết dính [7-9].

Xi măng poóc-lăng (OPC) ở nhiệt độ cao sẽ bị biến đổi các tính chất. Sử dụng các phụ gia khoáng bao gồm thành phần hoạt tính như

SiO₂ và Al₂O₃ sẽ cải thiện được tính chất của OPC ở nhiệt độ cao [10]. Các phụ gia khoáng sẽ tác dụng với thành phần CaO có trong đá xi măng, giảm hiện tượng thủy hóa lần hai của oxyt này, nguyên nhân gây nở thể tích dẫn đến nứt vỡ sản phẩm. Sa mốt được sử dụng phổ biến làm phụ gia chịu nhiệt cho OPC. Một số nghiên cứu chỉ ra sa mốt có thể chế tạo chất kết dính chịu nhiệt đến 1000 ÷ 1200°C [10, 11], vừa có khả năng chịu nhiệt, chống cháy [12, 13]. Các thải phẩm công nghiệp luôn được chú trọng trong việc tái sử dụng làm vật liệu xây dựng, trong đó có tro bay (FA) và silica fume (SF). Tác giả C.S. Poon cho rằng 30 % FA (khối lượng so với xi măng) cho bê tông có cường độ cao nhất [14]. Sự thay thế OPC bởi 10 % SF sẽ cải thiện vi cấu trúc và tính chất cơ lý của bê tông ở nhiệt độ đến 600°C là kết luận của các giả M. Ghandehari [15]. Tác giả M. Heikal và các cộng sự [16] công bố mẫu chất kết dính chứa mẫu chứa 5 % FA và 15 % SF cho cường độ nén cao nhất ở 450°C. Một số tác giả khác lại cho rằng mẫu chất kết dính chứa 15 % FA và 5 % SF cho cường độ nén và khối lượng thể tích suy giảm nhỏ nhất ở khoảng 800 ÷ 1000°C [17, 18].

Sự kết hợp giữa tro xi nhiệt điện làm cốt liệu và OPC cùng các phụ gia khoáng SF, FA làm chất kết dính cho HRC là một điều mới mẻ.

Bài báo nghiên cứu sự biến đổi một số tính chất của HRC chế tạo từ cốt liệu tro xi nhiệt điện, xi măng poóc-lăng và hỗn hợp phụ gia khoáng tro bay – silica fume ở các cấp nhiệt độ từ 25 ÷ 800°C.

Cốt liệu cho HRC trong nghiên cứu là tro xi của nhà máy nhiệt điện Vĩnh Tân 2 (CA). Chất kết dính gồm xi măng PC40 Sông Gianh, FA nhà máy nhiệt điện Vĩnh Tân 2, SF của hãng Sika. Thành phần hóa của các vật liệu thể hiện ở Bảng 1.

2. Vật liệu và phương pháp thí nghiệm:

2.1. Vật liệu thí nghiệm:

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 | CA | 57,85 | 22,64 | 5,59 | 3,57 | 1,69 | 0,13 | 3,80 | 0,78 | 3,96 |
| 2 | OPC | 21,09 | 6,53 | 3,43 | 64,21 | 0,85 | 0,15 | 2,91 | - | 0,83 |
| 3 | FA | 55,20 | 20,97 | 6,27 | 0,95 | 1,54 | 0,13 | 3,39 | 0,54 | 11,0 |
| 4 | SF | 90,26 | 1,05 | 1,03 | 1,23 | 1,41 | 0,02 | 2,03 | 0,91 | 2,03 |

trong đó: MKN là hàm lượng mất khi nung.

Bảng 2.

Tính chất của hỗn hợp hạt cốt liệu.

| STT | Tính chất | Đơn vị | Cỡ hạt, mm | | | | | |
|-----|--------------------------|-------------------|------------|-------|-------|-------|-------|--------|
| | | | 2,5 | 1,25 | 0,63 | 0,315 | 0,14 | < 0,14 |
| 1 | Khối lượng thể tích xốp, | kg/m ³ | 534,9 | 512,9 | 486,2 | 607,3 | 682,6 | 815,4 |
| 2 | Độ hút nước, | % | 12,4 | 13,0 | 13,6 | 9,6 | 8,9 | 7,2 |

Bảng 3.

Tính chất của xi măng

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

Bảng 4.

Tính chất của phụ gia khoáng

| STT | Tính chất cơ lý | Đơn vị | Phương pháp thử | FA | SF |
|-----|---------------------------|-------------------|------------------|-------|-------|
| 1 | Chỉ số hoạt tính cường độ | % | TCVN 10302:2014 | 89,8 | 109,2 |
| | | | TCVN 8827:2011 | | |
| 2 | Độ ẩm | % | TCVN 7572-7:2006 | 0,4 | 0,1 |
| 3 | Khối lượng riêng | g/cm ³ | TCVN 4030:2003 | 2,29 | 2,68 |
| 4 | Khối lượng thể tích xốp | g/cm ³ | TCVN 4030:2003 | 982,1 | 981,4 |

Cốt liệu CA có khối lượng riêng 2,07 g/cm³ xác định theo TCVN 4030:2003, khối lượng thể tích xốp 787,4 kg/m³ theo TCVN 7572-6:2006. Sau khi phân loại cỡ hạt theo TCVN 7572-2:2006, hàm lượng cỡ hạt lớn hơn 5 mm tương đối thấp (2,9 %) nên tác giả gia công đập tạo cỡ hạt có kích thước nhỏ hơn 5 mm. Các cỡ hạt có giá trị khối lượng thể tích xốp và độ hút nước được xác định theo TCVN 7572-6:2006 và TCVN 7572-4:2006, thể hiện ở Bảng 2.

Xi măng có các tính chất cơ lý thể hiện trong Bảng 3, thỏa mãn TCVN 2682:2009. FA trong nghiên cứu thuộc loại F theo TCVN 10302:2014 phù hợp làm phụ gia khoáng cho vữa và bê tông. SF có chỉ số độ hoạt tính và bề mặt riêng 17,66 m²/g thỏa mãn yêu cầu theo TCVN 8827:2011. Một số tính chất của phụ gia khoáng thể hiện ở Bảng 4.

Nước sử dụng cho HRC thỏa mãn TCVN 4506:2012. Phụ gia siêu dẻo ADVA® CAST 5388V gốc polyme có tỷ trọng 1,08 kg/l được sử dụng nhằm điều chỉnh tính công tác của hỗn hợp bê tông.

2.2. Phương pháp thí nghiệm:

HRC sử dụng chất kết dính từ OPC được thay thế bởi 16,0 % FA và 5,3 % SF. Thành phần hạt cốt liệu được tính toán theo công thức Andersen:

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

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 cốt liệu 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 (%).

Bài báo nghiên cứu các tính chất của HRC trên cơ sở thành phần vật liệu theo Bảng 5.

Bảng 5.

Thành phần vật liệu của HRC.

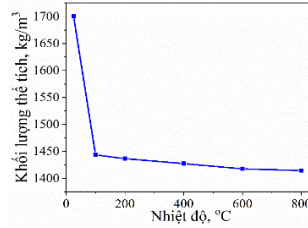
| Tỷ lệ vật liệu | | Thành phần vật liệu | | | | | |
|----------------|-------|---------------------|---------|--------|--------|-------|---------|
| N/CKD | n | CA, kg | OPC, kg | FA, kg | SF, kg | N, l | PGSD, l |
| 0,61 | 0,357 | 1055,3 | 406,1 | 75,4 | 25,2 | 309,1 | 7,8 |

Mẫu HRC được đúc trong khuôn có kích thước 70,7 × 70,7 × 70,7 mm. Sau khi dưỡng hộ 24h trong khuôn với độ ẩm ≥ 95 %, nhiệt độ 27 ± 2°C, mẫu được ngâm trong nước 6 ngày với nhiệt độ 27 ± 2°C. Tiếp theo, mẫu được đưa đi sấy ở 100°C trong 24h và nung ở các cấp nhiệt 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 mẫu được làm nguội đến nhiệt độ phòng, khối lượng thể tích và cường độ nén của mẫu được xác định ở các cấp nhiệt độ. Để đánh giá trạng thái làm việc của HRC sau nung, người ta thường đánh giá qua tỷ lệ phần trăm cường độ bê tông sau khi gia nhiệt đến nhiệt độ ứng dụng lớn nhất với giá trị cường độ nén ở tuổi thiết kế, còn gọi là cường độ nén còn lại. Cường độ nén ở tuổi thiết kế được quy ước trong bài báo này là cường độ nén của mẫu ở tuổi 7 ngày sau sấy 100°C. Vì cấu trúc mẫu HRC được nghiên cứu bằng phương pháp kính hiển vi điện tử quét (SEM).

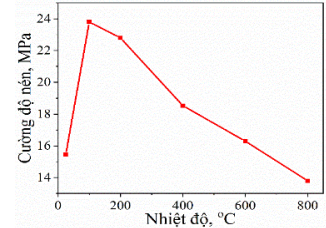
3. Kết quả nghiên cứu:

3.1. Khối lượng thể tích

Giá trị khối lượng thể tích của các mẫu HRC giảm khi tăng nhiệt độ, thể hiện trong Hình 1.



Hình 1. Khối lượng thể tích của HRC ở các cấp nhiệt độ.



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

Khối lượng của các mẫu giảm phần lớn do sự bay hơi nước. Ở 100°C, sự giải phóng nước liên kết từ hồ chất kết dính, nước trong lỗ rỗng cốt liệu, lỗ rỗng khí được hình thành trong bê tông làm khối lượng thể tích của các mẫu HRC giảm khoảng 1,2 lần so với ở nhiệt độ thường. Nhiệt độ tăng lên 800°C, khối lượng thể tích các mẫu tiếp tục mất nhưng mức độ thấp hơn, từ 0,5 ÷ 2,0 % so với ở 100°C. Sự mất khối lượng của bê tông đồng thời với sự tăng hàm lượng các lỗ rỗng.

Chất kết dính mất khối lượng lớn ở khoảng nhiệt độ 400 ÷ 600°C do sự phân hủy Ca(OH)₂ [2] làm khối lượng thể tích của các mẫu HRC giảm mạnh hơn, khoảng 1,0 ÷ 1,8 %.

Từ 600 ÷ 800°C với sự mất nước của các thành phần C-S-H, C-A-S-H, phân hủy CaCO₃ làm khối lượng thể tích các mẫu tiếp tục giảm [2]. Mẫu có khối lượng thể tích 1414,5 kg/m³, mất 2,0 % so với ở 100°C hay còn lại 98,0 %.

3.2. Cường độ nén

Hình 2 thể hiện giá trị cường độ nén của các mẫu HRC. Sấy mẫu đến 100°C, cường độ các mẫu bê tông đạt khoảng 23,8 ÷ 27,5 MPa tăng hơn 1,5 lần so với ở nhiệt độ thường do nhiệt độ kích thích phản ứng thủy hóa trong đá CKDCN. Khi nhiệt độ tăng từ 100 ÷ 800°C, cường độ nén của các mẫu mất khoảng 1,8 ÷ 45,4 %.

Từ 100 ÷ 200°C, độ co ngót tăng mạnh do sự mất nước trong gel xi măng làm lên chặt cấu trúc, cường độ các mẫu còn lại 95,8 % so với ở 100°C. Sự bay hơi nước trong giai đoạn này thúc đẩy quá trình “tự chưng hấp” trong đá CKDCN làm suy giảm cường độ nén của BTCN. Với bê tông thường sử dụng cốt liệu đá bazan, sỏi và dolomit thì cường độ mất 5 ÷ 20 % trong khoảng nhiệt độ này [6].

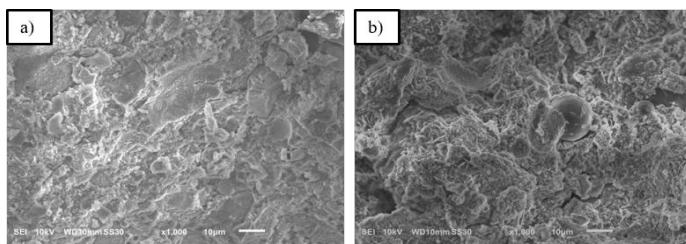
Từ 200 ÷ 600°C, cường độ nén các mẫu giảm mạnh. Ở khoảng nhiệt độ này, liên kết giữa cốt liệu và đá xi măng yếu đi bởi sự mất nước của đá xi măng gây co ngót trong khi cốt liệu giãn nở. Sự biến đổi thù hình của quặng ở khoảng 500 ÷ 600°C kèm theo sự giãn nở [19]. Ngoài ra còn sự phân hủy của CH thành CaO 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. Đến 600°C, mẫu HRC có cường độ nén 16,3 MPa, còn lại 68,5 % so với cường độ nén ở 100°C. Tác giả như I. Hager, V. Kodur

cho rằng bê tông thường sử dụng các cốt liệu tự nhiên thì cường độ nén ở nhiệt độ 600°C còn lại khoảng 45 ÷ 65 % so với ở nhiệt độ thường [6, 20].

Từ 600 ÷ 800°C, cường độ nén các mẫu tiếp tục giảm. Lúc này, các mẫu có cường độ nén 13,8 MPa, còn lại 58,0 % so với cường độ nén ở 100°C. Trong khi đó, bê tông xi măng làm việc ở khoảng nhiệt độ này thì giá trị cường độ nén chỉ còn lại khoảng 10 ÷ 20 % [3, 4]. Sự lựa chọn vật liệu nghiên cứu, thành phần hợp lý đã hoàn toàn cải thiện được cường độ nén của bê tông sử dụng OPC ở nhiệt độ cao. Kết quả nghiên cứu của tác giả B. Demiel [21] cho thấy bê tông sử dụng đá bọt và SF có giá trị cường độ nén còn lại ở khoảng 400 ÷ 600°C cao hơn so với kết quả nghiên cứu trong bài báo nhưng cường độ lại giảm mạnh ở khoảng 600 ÷ 800°C, chỉ còn lại khoảng 22,1 ÷ 24,6 % so với ở nhiệt độ thường. Với HRC sử dụng phụ gia khoáng và cốt liệu sa mốt, tác giả Vũ Minh Đức [22] công bố cường độ nén của mẫu ở 600 ÷ 800°C là 14 ÷ 15,2 MPa, còn khoảng 51,5 ÷ 52,8 % so với giá trị ở 100°C.

3.3. Phân tích SEM

Nghiên cứu tiếp theo thể hiện vi cấu trúc mẫu HRC ở 100°C và 800°C. Nhiệt độ tăng kéo theo sự mất nước lý học, sự khử nước của các thành phần khoáng, sự phân hủy các sản phẩm của đá xi măng, co ngót dãn nở giữa phần đá xi măng và cốt liệu dẫn tới xuất hiện các vết nứt tế vi trong HRC. Các vết nứt có thể quan sát trong ảnh SEM của mẫu ở Hình 3 khi nhiệt độ thay đổi từ 100°C đến 800°C. Sự phân bố các vết nứt trong mẫu ở 800°C rộng hơn và kích thước lớn hơn so với mẫu ở 100°C.



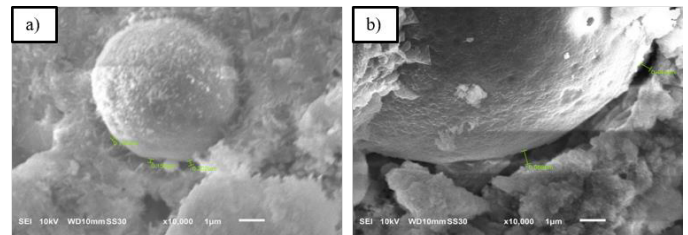
Hình 3. Hình ảnh vết nứt trong mẫu HRC.

a) Mẫu ở 100°C; b) Mẫu ở 800°C

Những thay đổi về thành phần khoáng hóa đi kèm với sự tăng độ rỗng trong đá xi măng cũng như vùng liên kết giữa đá xi măng và cốt liệu sẽ làm mất độ bền cơ học và lan truyền các vết nứt có hại. Khu vực chuyển tiếp giữa đá xi măng và cốt liệu (ITZ) được thể hiện trong các ảnh SEM (Hình 4) bao gồm chiều rộng từ 0,13 ÷ 0,57 μm tính từ bề mặt vi cốt liệu. Khoảng cách tăng khi nhiệt độ thay đổi từ 100°C đến 800°C. Theo tác giả Y.N. Chan [23], sự gia tăng lỗ rỗng ở nhiệt độ cao là một trong những nguyên nhân chính làm cường độ và độ bền của bê tông giảm.

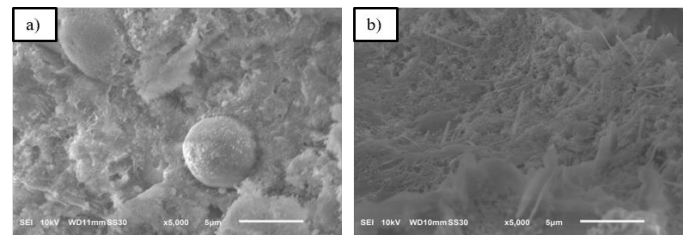
Ngoài ra, các sợi C-S-H được quan sát thấy trong ảnh SEM mẫu HRC ở 100°C và một số tinh thể dạng que nhỏ phân bố rải rác trong các lỗ rỗng ở hình SEM mẫu 800°C (Hình 5). Điều này có thể cho thấy có sự biến đổi pha, sự phân hủy C-S-H tạo ra những khoáng mới hoặc có

phản ứng xảy ra giữa thành phần của đá xi măng và các phụ gia khoáng đưa vào.



Hình 4. Hình ảnh vùng ITZ trong mẫu HRC.

a) Mẫu ở 100°C; b) Mẫu ở 800°C



Hình 5. Hình ảnh khoáng trong mẫu HRC.

a) Mẫu ở 100°C; b) Mẫu ở 800°C

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.

Cốt liệu tro xỉ nhiệt điện cùng OPC và các phụ gia FA, SF có thể chế tạo HRC có khối lượng thể tích 1443,5 kg/m³, cường độ nén 23,8 MPa (ở tuổi thiết kế) làm việc đến 800°C.

HRC có khối lượng thể tích giảm không đáng kể khoảng 0,5 ÷ 2 % khi tăng nhiệt độ từ 100 ÷ 800°C.

HRC có cường độ nén giảm khi tăng nhiệt độ. Ở khoảng 100 ÷ 200°C, cường độ nén mẫu giảm chậm, còn lại 95,8 % so với ở 100°C. Cường độ nén mẫu giảm nhanh ở khoảng 200 ÷ 600°C, còn lại 68,4 % và ở 600 ÷ 800°C, còn lại 58 %.

Sự hình thành các vết nứt và sự gia tăng lỗ rỗng ở vùng ITZ khi nhiệt độ tăng giải thích sự giảm cường độ nén của mẫu HRC.

Tài liệu tham khảo:

- [1]. Anupama, K.D., Priyadarsini, R.S., Naraynan, 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]. Hlystov, A. I., Shirokov, V. A., & Vlasov, A. V. (2015). Efficiency Improvement of Heat-resistant Concrete through the Use of Sludge Technogenic Raw Material. *Procedia Engineering*, 111, 290–296.

- [6]. Hager, I., Tracz, T., Sliwinski, J., Krzemien, K. (2015). The influence of aggregate type on the physical and mechanical properties of high-Performance concrete subjected to high temperature. *Fire and Materials, Published Online in Wiley Online Library*.
- [7]. 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.
- [8]. 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.
- [9]. Yüksel, İ., Siddique, R., & Özkan, Ö. (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.
- [10]. Remnev, V.V. (1996). Heat-resistant properties of cement stone with finely milled refractory additives. *Refractories and Industrial Ceramics, 37*, 10–11.
- [11]. Đỗ Thị Phương, Nguyễn Văn Đông. (2013). Sử dụng xi măng poóc-lăng hỗn hợp chế tạo chất kết dính chịu nhiệt. *Tạp Chí Khoa Học và Công Nghệ, ĐHQĐ, 8* (69), 43–49.
- [12]. Vũ Minh Đức. (2018). Nghiên cứu vữa chịu nhiệt (chống cháy) sử dụng cho các công trình xây dựng. *Tạp Chí Khoa Học Công Nghệ Xây Dựng (KHCNXD) - ĐHXD, 2*(1). <http://stce.nuce.edu.vn/index.php/vn/article/view/1056>
- [13]. Lưu Hoàng Sơn, Trần Thị Minh Hải, Nguyễn Thị Kim. (2021). Vữa phủ chống cháy siêu nhẹ cho kết cấu thép. *Tạp Chí Vật Liệu và Xây Dựng, 1*, 10–17.
- [14]. Poon, C.S., Azhar, S., Anson, M., Wong, Y.L. (2001). Comparison of the strength and durability performance of normal-and high-strength pozzolanic concretes at elevated temperatures. *Cement and Concrete Research, 31*, 1291–1300.
- [15]. Ghandehari, M., Behnood, A., Khanzadi, M. (2010). Residual mechanical properties of high-strength concretes after exposure to elevated temperature. *J Mater Civil Eng ASCE, 59*–64.
- [16]. Heikal, M., El-Diadamony, 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.
- [17]. Thi Phuong Do, Nguyen Lam, Minh Duc Vu. (2020). Effect of temperature on the physico-mechanical and microstructure properties of cement pastes containing fly ash and silica fume. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 869*. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/869/3/032045>
- [18]. Thi Phuong Do, Van Quang Nguyen, Minh Duc Vu. (2021). A Study on Property Improvement of Cement Pastes Containing Fly Ash and Silica Fume After Treated at High Temperature. *Advances in Intelligent Systems and Computing, GTSD 2020, 1284*, 532–542.
- [19]. Budnikov, P. P., & Savel'yev, V. G. (1962). Refractory concretes with a barium aluminate binder. *Refractories, 3*(9–10), 314–317.
- [20]. Kodur, V. (2014). Properties of Concrete at Elevated Temperatures. *ISRN Civil Engineering, 2014*, 1–15. <https://doi.org/10.1155/2014/468510>
- [21]. 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.
- [22]. Vũ Minh Đức. (1992). *Bê tông chịu nhiệt dùng xi măng poóc-lăng* [Luận án Phó tiến sĩ khoa học kỹ thuật chuyên ngành Vật liệu chi tiết và sản phẩm xây dựng]. Đại học Xây dựng.
- [23]. Chan, Y.N., Peng, G.F., Anson, M. (1999). Residual strength and pore structure of high-strength concrete and normal strength concrete after exposure to high temperatures. *Cement and Concrete Composites, 21*, 23–27.