

Ảnh hưởng của nhiệt độ cao đến cường độ chịu nén và mất khối lượng của bê tông sử dụng tro xỉ nhiệt điện

Đỗ Thị Phương^{1*}, Vũ Minh Đức²

^{*1} Khoa Xây dựng Cầu đường, trường Đại học Bách khoa, Đại học Đà Nẵng

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

TỪ KHOÁ

Bê tông
Tro xỉ nhiệt điện
Silica fume
Nhiệt độ cao
Cường độ chịu nén

TÓM TẮT

Bài báo thể hiện kết quả nghiên cứu bê tông sử dụng cốt liệu tro xỉ nhiệt điện, xi măng cùng 15 % tro bay và 5 % silica fume. Cường độ chịu nén và mất khối lượng của các mẫu bê tông được xác định sau khi sấy và đốt nóng ở nhiệt độ cao (100, 200, 400, 600 và 800 °C). Bốn cấp phối bê tông đã được chuẩn bị cùng với các tỷ lệ nước/chất kết dính (N/CKD) = 0,58 ÷ 0,64. Kết quả cho thấy, mẫu chứa N/CKD = 0,6 có cường độ chịu nén cao nhất là 13,8 MPa ở 800°C, còn lại 57,7 % so với ở 100°C. Cốt liệu tro xỉ làm gia tăng sự mất khối lượng ở nhiệt độ cao. Giá trị mất khối lượng của mẫu là 22,4 % ở 800°C, trong đó của cốt liệu là 34,7 % và đá chất kết dính là 16 %.

KEYWORDS

Concrete
Coal ash
Silica fume
High temperature
Compressive strength

ABSTRACT

In this study, concrete using coal ash aggregates, cement with 15 % fly ash and 5 % silica fume were investigated. Compressive strength and weight loss of the concretes were determined after being exposed to high temperatures (100, 200, 400, 600 and 800 °C). To achieve these objectives, four concrete mixtures were prepared with water/binder (w/b) ratios ranging from 0.58 ÷ 0.64. The results show that, compressive strength of specimen containing w/b = 0.6 was highest (13.8 MPa) at 800 °C, retain 57.7 % of the initial compressive strength. Coal ash aggregates increased the weight loss of the specimen at high temperature. The weight loss (in percent) of the specimen was about 22.4 % at 800 °C, of which the aggregate was 34.7 % and the binder was 16 %.

1. Giới thiệu

Một trong những nguyên nhân có sức tàn phá lớn nhất gây hư hỏng bê tông là nhiệt độ cao. Sự biến đổi các thành phần bê tông theo nhiệt độ sẽ làm thay đổi cũng như suy giảm các tính chất cơ lý, đặc biệt là khả năng chịu lực [1-4]. Bê tông làm việc trong môi trường đặc biệt này cần được nghiên cứu và ứng dụng với sự hiểu biết tốt nhất về hành vi của nó ở nhiệt độ cao, đặc biệt liên quan đến tính chất cốt liệu và chất kết dính được sử dụng [5]. Các cốt liệu tự nhiên như đá granit, đá vôi, cát, sa thạch không phù hợp cho bê tông chịu nhiệt [6, 7]. Cốt liệu nhân tạo như sa mốt, cốt liệu chịu lửa mulit, forsterit, cromit hay các cốt liệu nhẹ như keramzit, agloporit, vermiculit rất thích hợp chế tạo bê tông làm việc ở nhiệt độ cao [8-10]. Những cốt liệu này có nhiều lợi ích nhưng cũng có hạn chế, nguồn nguyên liệu hiếm, chi phí sản xuất cao và không phổ biến [10]. Một số tác giả chỉ ra có thể sử dụng xỉ lò cao, xỉ đáy lò làm cốt liệu cho bê tông làm việc ở khoảng 800 ÷ 1050 °C [10-13]. Tro xỉ nhiệt điện là sản phẩm phụ của công nghiệp nhiệt điện, một số ưu điểm khi sử dụng phế thải này làm cốt liệu cho bê tông làm việc ở nhiệt độ cao như (1) do đã qua khâu nung luyện nên ổn định về cấu trúc hơn so với các cốt liệu tự nhiên, (2) chi phí rẻ, (3) nguồn nguyên liệu dồi dào, (4) tái chế phế thải này sẽ ngăn ngừa ô nhiễm đất

và nước. Tuy nhiên cần lưu ý về thành phần SO₃, CaO, MgO tự do cũng như thành phần mất khi nung (MKN) trong tro xỉ nhiệt điện khi sử dụng làm cốt liệu cho bê tông làm việc ở nhiệt độ cao.

Xi măng poóc lăng là một chất kết dính phổ biến nhưng ở nhiệt độ cao sẽ bị biến đổi tính chất và cấu trúc do sự mất nước cũng như phân huỷ các thành phần khoáng. Đặc biệt, sự thủy hoá lần hai của CaO tự do (nếu làm nguội mẫu trong không khí ẩm) sẽ gây nở thể tích, phá huỷ cấu trúc đá xi măng [1, 14]. Để tăng khả năng chịu nhiệt cho đá xi măng, các nhà nghiên cứu đã đề xuất sử dụng phụ gia khoáng để hạn chế thành phần Ca(OH)₂ cũng như CaO tự do có trong đá xi măng [15]. Thông thường, tro bay (FA) chiếm khoảng 80 ÷ 90% tổng lượng tro xỉ nhiệt điện. Sử dụng loại phụ gia khoáng này thay thế xi măng chế tạo chất kết dính làm việc ở nhiệt độ cao đã được nghiên cứu rộng rãi [16-19]. Trong các công trình đã công bố về bê tông, chất kết dính sử dụng FA làm việc ở nhiệt độ cao, tỷ lệ FA thay thế được nghiên cứu với phạm vi khá rộng, chủ yếu từ 10 ÷ 30% [18-20], thậm chí 60 ÷ 80% [17, 21]. Để có thể loại trừ tốt hàm lượng Ca(OH)₂ trong đá xi măng, silica fume (SF) cũng được đưa vào nghiên cứu làm phụ gia khoáng cho xi măng. Một số nghiên cứu chỉ ra, SF được thay thế 5 ÷ 10% xi măng sẽ nâng cao chất lượng vữa, bê tông ở nhiệt độ cao [22-24].

Ngoài cốt liệu và chất kết dính ảnh hưởng đến khả năng chịu

*Liên hệ tác giả: dtphuongbmvldn@gmail.com

Nhận ngày 14/02/2025, sửa xong ngày 21/04/2025, chấp nhận đăng ngày 22/04/2025

Link DOI: <https://doi.org/10.54772/jomc.02.2025.839>

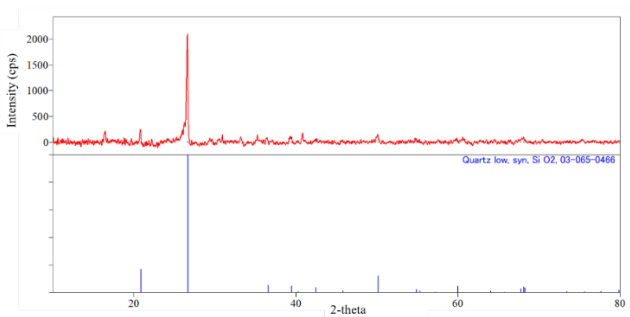
hiệt của bê tông, một số yếu tố như tỷ lệ nước/chất kết dính (N/CKD), thành phần hạt cốt liệu, các điều kiện thí nghiệm cũng ảnh hưởng đến độ chịu lực của bê tông. Tác giả M.Ghandehari [23] nghiên cứu bê tông với các tỷ lệ N/CKD = 0,4, 0,35 và 0,3 làm việc ở 100 ÷ 600 °C, SF thay thế 10 % xi măng cho cường độ còn lại là cao nhất. Với N/CKD = 0,77, bê tông chứa 20 % SF cho cường độ cao nhất ở các cấp nhiệt độ 200, 400 và 800 °C là công bố của H.Tanyildizi [25]. Tác giả X. Yigang [26] và các cộng sự nghiên cứu ảnh hưởng của hàm lượng FA, tỷ lệ N/CKD và điều kiện dưỡng hộ đến các tính chất của bê tông ở nhiệt độ cao.

Nghiên cứu này tập trung vào đánh giá khả năng làm việc của bê tông sử dụng cốt liệu tro xi nhiệt điện, chất kết dính từ xi măng kết hợp FA và SF ở nhiệt độ cao thông qua giá trị cường độ chịu nén và sự mất khối lượng. Một số yếu tố ảnh hưởng đến các tính chất trên của bê tông được xem xét. Những kết quả nghiên cứu này có thể góp phần tăng sự hiểu biết thêm về bê tông làm việc ở nhiệt độ cao, đặc biệt là bê tông sử dụng phế thải công nghiệp.

2. Vật liệu và phương pháp thí nghiệm

2.1. Vật liệu và tính chất

Cốt liệu tro xi nhiệt điện của máy nhiệt điện Vĩnh Tân được sử dụng trong nghiên cứu, có các cỡ hạt đến 5 mm, chủ yếu là khoáng SiO₂ thể hiện Hình 1. Thành phần hạt cốt liệu thể hiện ở Bảng 1.



Hình 1. Kết quả phân tích X-ray cốt liệu.

Xi măng PC50 Sông Gianh có các đặc tính đạt TCVN 2682:2020. Cường độ chịu nén ở tuổi 28 ngày của xi măng là 51,9 MPa. Tro bay (FA) loại F của máy nhiệt điện Vĩnh Tân có kích thước hạt ≤ 0,09 và silica fume (SF) cung cấp bởi hãng Sika được sử dụng làm phụ gia khoáng trong chất kết dính. Các phụ gia khoáng có đặc tính thỏa mãn TCVN 10302:2014 và TCVN 8827:2011. Chỉ số hoạt tính cường độ của FA và SF lần lượt là 89,8 % và 109,2 %. Diện tích bề mặt của xi măng là 3810 cm²/g, trong khi diện tích bề mặt của SF và FA lần lượt là

Bảng 1. Thành phần hạt của cốt liệu.

Cỡ sàng, mm	5	2,5	1,25	0,63	0,315	0,14	< 0,14
a_i , %	0	9,3	8,6	7,9	15,0	36,0	23,1
A_i , %	0	9,3	18,0	25,9	40,9	76,9	100

176600 cm²/g và 3550 cm²/g. Một số tính chất vật lý và thành phần hóa học của cốt liệu, xi măng và phụ gia khoáng được thể hiện ở Bảng 2.

2.2. Phương pháp thí nghiệm

Các mẫu bê tông được thiết kế thành phần theo Bảng 3. Lựa chọn tỷ lệ 15 % FA và 5 % SF thay thế xi măng dựa trên cơ sở các nghiên cứu trước đây [18-20, 22-24, 27]. Tỷ lệ N/CKD được lựa chọn trong khoảng 0,58 ÷ 0,64. Phụ gia siêu dẻo ADVA® CAST 5388V của hãng Grace gốc polymer có tỷ trọng 1,08 kg/l được sử dụng để đảm bảo độ linh động cần thiết của hỗn hợp bê tông. Các mẫu được chế tạo trong khuôn kích thước 7 × 7 × 7 cm. Bảo dưỡng mẫu bằng cách để khuôn mẫu trong điều kiện 27 ± 2 °C, độ ẩm không nhỏ hơn 90 % trong 24 h rồi tháo mẫu và đem ngâm trong nước 6 ngày. Tiếp theo, đưa mẫu đi sấy ở 100 °C và nung trong lò điện ở các cấp nhiệt 200, 400, 600 và 800 °C với tốc độ nâng nhiệt không lớn hơn 150 °C/h, thời gian hằng nhiệt 2 h. Sau khi nung ở từng cấp nhiệt, mẫu được làm nguội đến nhiệt độ phòng và được đặt lên một giá lưới đặt trong bể chứa nước. Khoảng cách từ bề mặt đáy của mẫu bê tông đến mực nước khoảng 4 ± 1 cm. Các mẫu được giữ trong bể 7 ngày, sau đó lấy ra, kiểm tra và xác định cường độ chịu nén (GOST 20910:2019). Khả năng làm việc của mẫu cũng có thể đánh giá qua giá trị cường độ còn lại – là giá trị cường độ ở nhiệt độ làm việc so với cường độ ở 100 °C.

Mất khối lượng và hình thái của mẫu bê tông, cốt liệu và đá chất kết dính được xác định bởi các phương pháp phân tích thay đổi trọng lượng theo nhiệt độ (Thermal Gravimetric analysis - TG) và kính hiển vi điện tử quét (Scanning electron microscopy - SEM).

3. Kết quả và thảo luận

3.1. Tính chất của hỗn hợp bê tông

Một số tính chất của hỗn hợp bê tông được thể hiện trong Bảng 4. Độ cứng của hỗn hợp bê tông được duy trì trong khoảng 20 ÷ 40 s. Sử dụng phụ gia siêu dẻo để có thể giảm lượng nước nhào trộn tương ứng. Nhu cầu nước của hỗn hợp bê tông tăng do sự hấp thụ nước của cốt liệu tro xi.

Bảng 4. Độ cứng và khối lượng thể tích của hỗn hợp bê tông.

Mẫu	Độ cứng, s	Khối lượng thể tích, kg/m ³
M1	36	1820
M2	27	1790
M3	25	1782
M4	21	1776

Bảng 2. Một số tính chất của các vật liệu.

Tính chất	Cốt liệu	Xi măng	FA	SF
<i>Thành phần hoá, %</i>				
SiO ₂	57,85	21,09	55,20	90,26
Al ₂ O ₃	22,64	6,53	20,97	1,05
Fe ₂ O ₃	5,59	3,34	6,27	1,03
CaO	3,57	64,21	0,95	1,23
MgO	1,69	0,85	1,54	1,41
Na ₂ O	0,78	-	0,54	0,91
K ₂ O	3,80	2,91	3,39	2,03
SO ₃	0,13	0,15	0,13	0,02
MKN	3,96	0,83	11,00	2,03
<i>Tính chất vật lý,</i>				
Khối lượng riêng, g/cm ³	2,07	3,11	2,29	2,22
Khối lượng thể tích, kg/m ³	790	973	982	699
Độ hút nước, %	12,1	-	-	-

trong đó: “-” là không xác định.

Bảng 3. Thành phần vật liệu.

Mẫu	N/CKD	FA, %	SF, %	SP, %	CL, kg	X, kg	FA, kg	SF, kg	N, l
M1	0,58	15	5	1,9	1050,2	426,8	80,0	26,7	309,4
M2	0,60	15	5	1,5	1057,3	414,8	77,8	25,9	311,1
M3	0,62	15	5	1,2	1064,5	403,4	75,6	25,2	312,6
M4	0,64	15	5	1,0	1071,7	392,4	73,6	24,5	313,9

trong đó: SP là phụ gia siêu dẻo, CL là cốt liệu, X là xi măng, N là nước.

3.2. Cường độ chịu nén

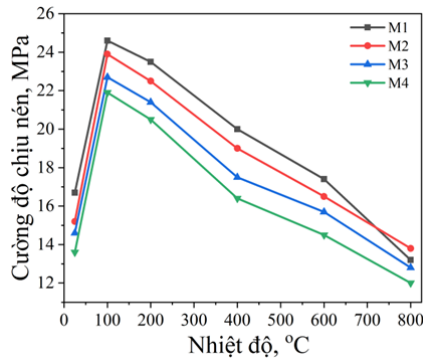
Hình 2 thể hiện giá trị cường độ chịu nén của các mẫu bê tông khi đốt nóng từ 100 ÷ 800 °C. Cường độ các mẫu ở 100 °C cao hơn 1,5 lần so với ở nhiệt độ thường do các phản ứng thủy hoá xi măng được thúc đẩy trong điều kiện hơi nước thoát ra và “tự chưng hấp”. Đến 200 °C, cường độ các mẫu suy giảm nhưng không nhiều, còn lại khoảng 93,6 ÷ 95,5 % so với ở 100 °C (Hình 3) do lúc này nước trong đá xi măng và cốt liệu vẫn thoát ra và thúc đẩy phản ứng thủy hoá [6, 27]. Đến 600 °C, cường độ các mẫu tiếp tục giảm. Sự phân hủy các thành phần khoáng trong đá xi măng như Ca(OH)₂, biến đổi thù hình của quắc có thể gây ra vết nứt tế vi khiến độ chịu lực giảm. Một số tác giả cho rằng cường độ của bê tông thường sử dụng cốt liệu tự nhiên ở khoảng nhiệt độ này chỉ còn lại khoảng 45 ÷ 65 % [6, 28]. Tuy nhiên, bê tông sử dụng cốt liệu nhân tạo (đã nung) cùng với việc kết hợp phụ gia khoáng FA và SF trong chất kết dính đã làm giảm sự mất cường độ chịu nén. Các mẫu lúc này có cường độ còn lại khoảng 66,2 ÷ 70,7 %. Đặc biệt, phản ứng giữa các thành phần SiO₂ và Al₂O₃ hoạt tính trong phụ gia FA và SF với thành phần khoáng thủy hoá của đá xi măng, đã hạn chế thành phần Ca(OH)₂, CaO tự do – một trong những nguyên nhân gây nứt mẫu khi làm nguội mẫu trong môi trường ẩm [15, 19]. Đến 800 °C, cường độ chịu nén của các mẫu giảm, còn lại khoảng 53,7 ÷ 57,7 % so với ở 100 °C. Trong khi đó một số tác giả công bố rằng cường độ

của mẫu bê tông thường chỉ còn lại khoảng 10 ÷ 20 % khi đốt nóng đến khoảng nhiệt độ này [2, 3].

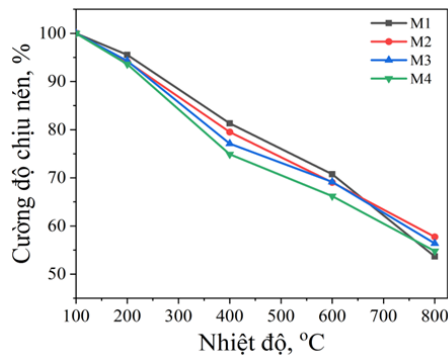
Mẫu có tỷ lệ N/CKD càng nhỏ thì cường độ chịu nén càng cao, theo quy luật của bê tông thường. Tuy nhiên, ở khoảng nhiệt độ cao 600 ÷ 800 °C, mẫu M2 với tỷ lệ N/CKD = 0,6 cho giá trị cường độ chịu nén cao nhất 13,8 MPa cũng như sự suy giảm cường độ chịu nén nhỏ nhất. Cường độ chịu nén của bê tông làm việc ở nhiệt độ cao không chỉ phụ thuộc vào tỷ lệ N/CKD mà còn phụ thuộc vào đặc tính cốt liệu, thành phần hạt cốt liệu, liên kết và dẫn nở giữa cốt liệu và chất kết dính, chế độ gia nhiệt, phương pháp làm nguội,[3]. Có thể ở khoảng nhiệt độ này, thành phần vật liệu hợp lý đã dẫn đến sự co ngót và dẫn nở của cốt liệu và đá chất kết dính tương đồng, dẫn đến ứng suất nhiệt phát sinh trong mẫu giảm.

3.3. Phân tích nhiệt

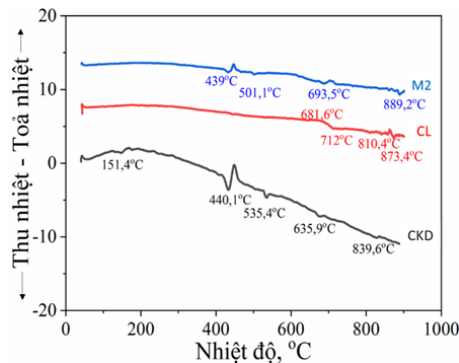
Sự gia tăng nhiệt độ là nguyên nhân làm giải phóng nước liên kết vật lý, nước liên kết hoá học và phân hủy các sản phẩm thủy hoá, thành phần hữu cơ cũng như biến đổi các thành phần khoáng trong đá xi măng và cốt liệu. Biểu đồ nhiệt DSC (Differential Scanning Calorimetry) và DTG (Derivative Thermal Gravimetric analysis) của mẫu bê tông M2, cốt liệu và chất kết dính được thể hiện ở Hình 4.



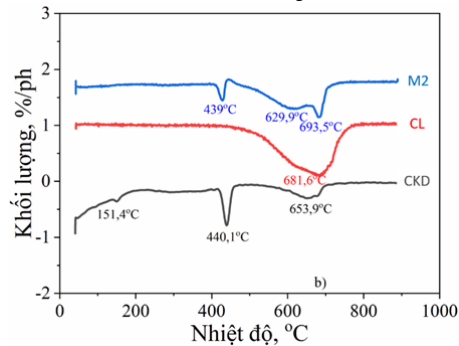
Hình 2. Cường độ chịu nén của các mẫu bê tông ở các cấp nhiệt độ.



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



(a) Phân tích DSC (đường heat flow)

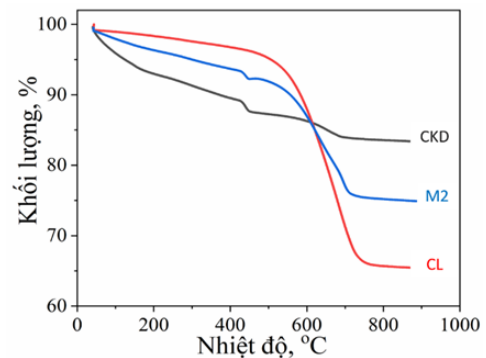


(b) Phân tích DTG

Hình 4. Kết quả phân tích DSC, DTG mẫu bê tông M2, cốt liệu và chất kết dính ở các cấp nhiệt độ.

Các pick thu nhiệt được quan sát thấy rõ ràng ở mẫu chất kết dính. Pick đầu tiên ở khoảng 151,4 °C tương ứng với sự mất nước trong các rỗng gel, mao quản [14]. Sự phân hủy $\text{Ca}(\text{OH})_2$ có thể diễn ra ở pick tương ứng với 440,1 °C [1, 14]. Sự phân hủy CaCO_3 cũng như $\text{Ca}(\text{OH})_2$, C-S-H, C-A-S-H có thể diễn ra ở khoảng 635,9 °C [1, 27, 29]. Và ở 839,6 °C có thể xảy ra sự phân hủy C-S-H thành C-S [20]. Trong khi đó mẫu cốt liệu có sự biến đổi thành phần vật chất nhận thấy rõ rệt ở khoảng 681,6 °C có thể liên quan quá trình cháy các thành phần hữu cơ. Mẫu bê tông M2 có các pick thu nhiệt ở 439 °C, 629,9 °C và 693,5 °C do liên quan đến sự biến đổi thành phần vật chất trong đá chất kết dính và cốt liệu [1, 14].

Hình 5 thể hiện kết quả phân tích nhiệt trọng lượng (TGA) mẫu bê tông M2, cốt liệu và chất kết dính. Đốt nóng đến khoảng 400 ÷ 600 °C, các mẫu đều giảm khối lượng, trong đó đá chất kết dính giảm khối lượng nhiều nhất liên quan đến sự phân hủy thành phần $\text{Ca}(\text{OH})_2$ thành CaO. Mẫu chất kết dính mất khối lượng khoảng 9,9 % ở 400 °C và 13,1 % ở 600 °C trong khi mẫu bê tông mất khoảng 4,7 % và 10,6 %. Sự hao hụt khối lượng lớn ở khoảng 600 °C tương ứng cường độ chịu nén giảm mạnh. Tác giả E. Sancak [30] cũng cho rằng khi đốt nóng đến 400 °C các mẫu bê tông thường và bê tông nhẹ sử dụng xỉ bọ và SF cũng giảm mạnh. Bê tông thường mất khối lượng khoảng 7 % ở 400 °C.



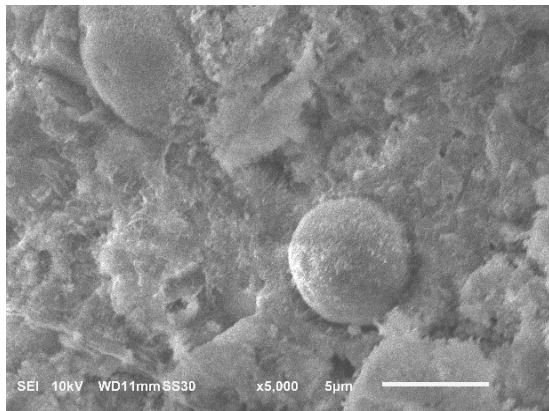
Hình 5. Kết quả phân tích TGA mẫu bê tông M2, cốt liệu và chất kết dính ở các cấp nhiệt độ.

Đến 800°C, mẫu cốt liệu mất 34,7 % phần khối lượng trong khi mẫu chất kết dính mất khoảng 16 % phần khối lượng. Hàm lượng MKN trong cốt liệu bị cháy cùng với sự biến đổi thù hình của SiO_2 có thể là nguyên nhân dẫn đến sự mất khối lượng trong cốt liệu lớn nhất. Theo G.A.Koury, M.Tufail [16] [31], sự biến đổi thù hình của quắc xảy ra ở khoảng 573 °C. Thành phần bê tông hợp lý cùng với sự kết hợp của các thành phần phụ gia khoáng và sản phẩm của đá xi măng tạo ra các khoáng mới lấp đầy các lỗ rỗng xốp, dẫn đến sự mất khối lượng của mẫu M2 nhỏ hơn so với cốt liệu, mất khoảng 22,4 % phần khối lượng. Hàm lượng MKN của cốt liệu mặc dù nhỏ hơn so với FA nhưng do cốt liệu chiếm tỷ lệ lớn trong bê tông nên ảnh hưởng nhiều đến sự mất khối lượng. Ngoài ra, kết quả cũng chứng minh rằng, FA và SF đã cản trở quá trình khử nước của hồ xi măng và bổ sung thêm các khoáng mới, cải thiện cấu trúc của đá xi măng cũng như của bê tông, giảm sự mất khối lượng ở nhiệt độ cao.

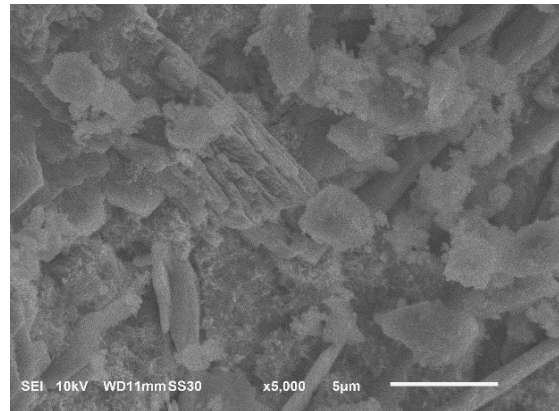
3.4. Phân tích SEM

Ảnh SEM của mẫu bê tông M2 và mẫu đá chất kết dính được đốt nóng ở 100, 200, 400, 600 và 800 °C thể hiện Hình 6. Những biến đổi về thành phần vật chất đi kèm với sự tăng độ rỗng trong đá xi măng cũng như vùng liên kết giữa đá xi măng và cốt liệu sẽ lan truyền các vết nứt, làm mất độ bền cơ học và giảm khối lượng. Quan sát các hình SEM mẫu bê tông cho thấy diện tích lỗ rỗng vùng tiếp xúc giữa cốt liệu và đá xi măng tăng khi nhiệt độ tăng từ 100 ÷ 800 °C. Lúc này sự biến đổi của các khoáng như $\text{Ca}(\text{OH})_2$, C-S-H cũng diễn ra. Có thể quan sát rõ hơn trong các hình SEM của đá xi măng. Khoáng $\text{Ca}(\text{OH})_2$ xuất hiện

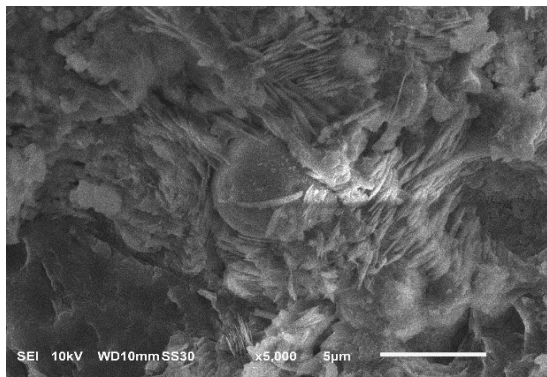
nhều ở mẫu sấy ở 100 °C (Hình 6b) trong khi đó lại quan sát thấy khoáng C-S-H ở các mẫu nung ở 200, 400 và 600 °C (Hình 6d, Hình 6f, Hình 6h). Phản ứng giữa các thành phần SiO_2 và Al_2O_3 hoạt tính trong phụ gia FA và SF với thành phần khoáng thủy hoá của đá xi măng có thể đã hạn chế thành phần $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Sự mất khối lượng trong mẫu đá chất kết dính nhỏ hơn có thể do sự tạo ra các khoáng mới ở nhiệt độ cao nên cấu trúc của đá chất kết dính đặc hơn so với mẫu bê tông. Hình 6i và Hình 6k cho thấy các lỗ rỗng, vết nứt kích thước lớn hơn xuất hiện trong đá xi măng và cả vùng giữa cốt liệu và đá xi măng có thể là nguyên nhân dẫn đến cường độ của mẫu bê tông suy giảm mạnh ở 800 °C.



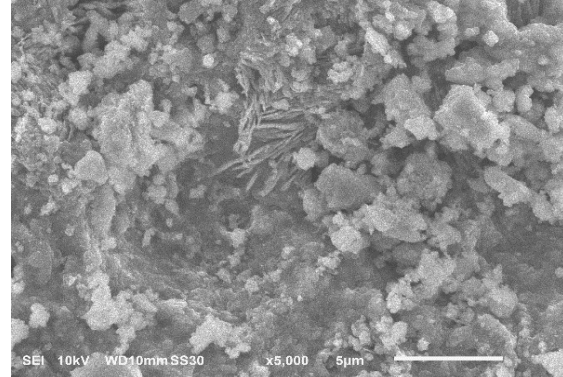
(a) Mẫu M2 tại 100°C



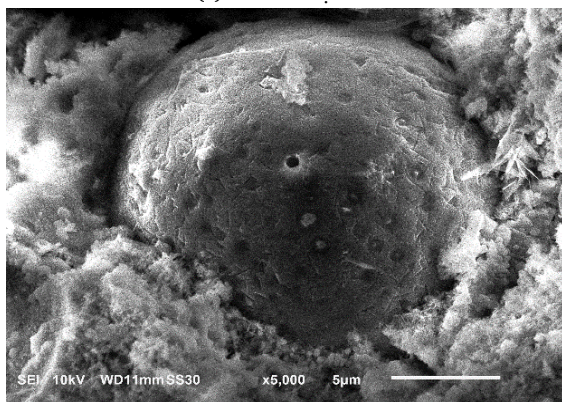
(b) Mẫu đá chất kết dính tại 100°C



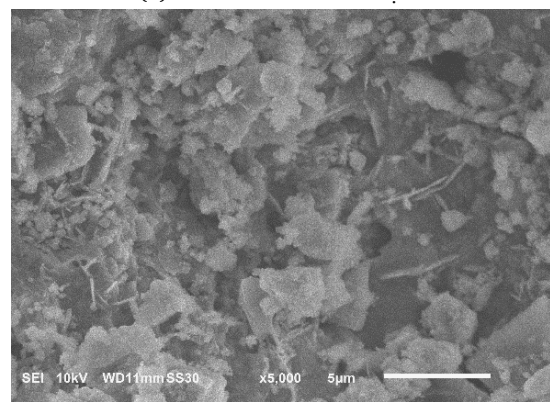
(c) Mẫu M2 tại 200°C



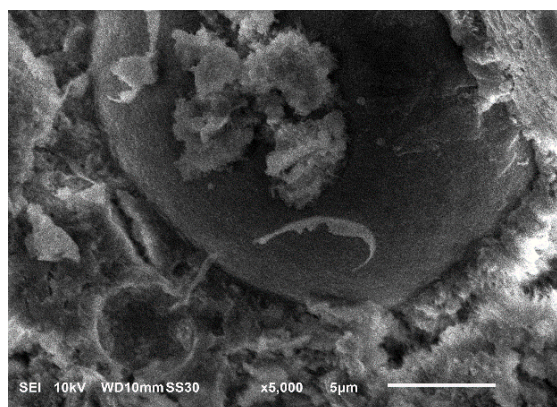
(d) Mẫu đá chất kết dính tại 200°C



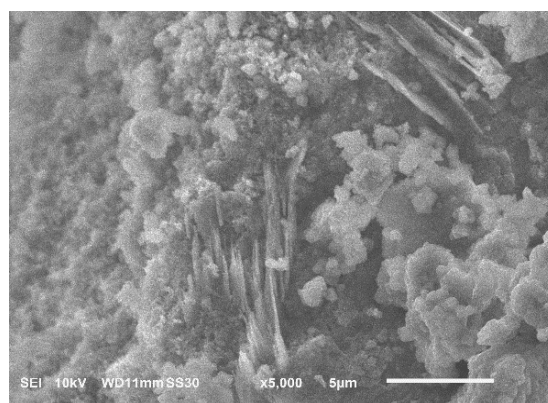
(e) Mẫu M2 tại 400°C



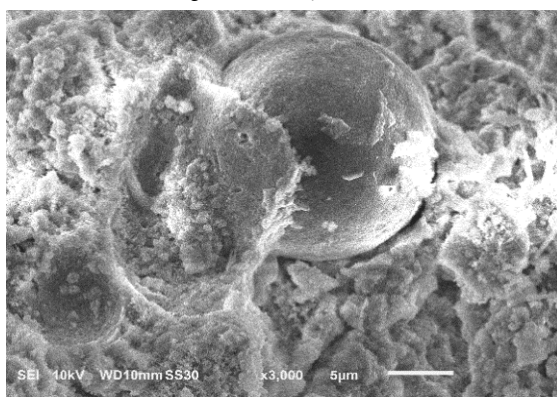
(f) Mẫu đá chất kết dính tại 400°C



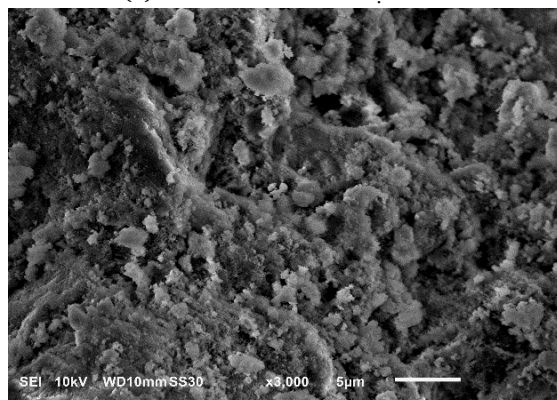
(g) Mẫu M2 tại 600°C



(h) Mẫu đá chất kết dính tại 600°C



(i) Mẫu M2 tại 800°C



(k) Mẫu đá chất kết dính tại 800°C

Hình 6. Kết quả phân tích SEM mẫu M2 và đá chất kết dính ở các cấp nhiệt độ.

4. Kết luận

Từ những kết quả nghiên cứu trên, một số kết luận của bài báo như sau:

- Cường độ chịu nén của bê tông tăng khoảng 1,5 lần khi sấy đến 100 °C và giảm khi nhiệt độ tăng. Ở 800 °C, các mẫu có cường độ chịu nén còn lại 53,7 ÷ 57,7 % so với ở 100 °C. Mẫu có tỷ lệ N/CKD = 0,60 cho cường độ chịu nén tốt nhất 13,8 MPa, còn lại 57,7 %.

- Mẫu bê tông mất khối lượng khoảng 4,7 % ở 400 °C, 10,6 % ở 600 °C và 22,4 % ở 800 °C. Cốt liệu tro xỉ làm mẫu bê tông gia tăng mất khối lượng ở nhiệt độ cao. Ở 800 °C, giá trị mất khối lượng của cốt liệu khoảng 34,7 % và đá chất kết dính khoảng 16 %.

- Nghiên cứu vi cấu trúc và sự biến đổi hoá lý của cốt liệu, đá chất kết dính và bê tông ở các khoảng nhiệt độ cũng đã phần nào giải thích cơ chế biến đổi cường độ của bê tông theo nhiệt độ.

Tài liệu tham khảo

- [1]. Hager, I., "Behaviour of cement concrete at high temperature," *Bull. Pol. Acad. Sci. Tech. Sci.*, no. 61(1), pp. 145–154, 2013.
- [2]. Xiao, J., & König, G., "Study on concrete at high temperature in China—An overview," *Fire Saf. J.*, vol. 39(1), pp. 89–103, 2004, [https://doi.org/10.1016/S0379-7112\(03\)00093-6](https://doi.org/10.1016/S0379-7112(03)00093-6).
- [3]. Schneider, U., "Concrete at high temperatures—A general review," *Fire Saf. J.*, vol. 13(1), pp. 55–68, 1988, [https://doi.org/10.1016/0379-7112\(88\)90033-1](https://doi.org/10.1016/0379-7112(88)90033-1).
- [4]. Bangi, M. R., Horiguchi, T., "Effect of fibre type and geometry on maximum pore pressures in fibre-reinforced high strength concrete at elevated temperatures," *Cem Concr Res*, vol. 42, pp. 459–466, 2013.
- [5]. Kim, G.Y., Kim, Y.S., Lee, T.G., "Mechanical properties of high-strength concrete subjected to high temperature by stressed test," *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*, vol. 19, pp. 128–133, 2009.
- [6]. Hager, I., Tracz, T., Sliwinski, J., Krzemien, K., "The influence of aggregate type on the physical and mechanical properties of high— Performance concrete subjected to high temperature," *Fire Mater. Publ. Online Wiley Online Libr.*, 2015, <https://doi.org/10.1002/fam.2318>.
- [7]. Nekrasov, K.D., Tarasova, A.P., *Heat-resistant concrete using Portland cement*. Structural Literature Publisher. Moscow. [in Russian]., 1969.
- [8]. Hlystov, A. I., Shirokov, V. A., & Vlasov, A. V., "Efficiency Improvement of Heat-resistant Concrete through the Use of Sludge Technogenic Raw Material," *Procedia Eng.*, vol. 111, pp. 290–296, 2015, <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.07.091>.
- [9]. Koksai, 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).
- [10]. Ahn, Y.B., Jang, J.G., Lee, H.K., "Mechanical properties of lightweight concrete made with coal ashes after exposure to elevated temperatures," *Cem. Concr. Compos.*, vol. 72, pp. 27–38, 2016, <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2016.05.028>.

- [11]. Angheliescu, L., Cruceru, M., Diaconu, B., "Bottom ash as granular aggregate to manufacturing of lightweight heat resistant concretes," *Int. J. Energy Environ.*, vol. 11, pp. 168–171, 2017.
- [12]. 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, <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2011.07.002>.
- [13]. Yüksel, İ., Siddique, R., Özkan, Ö., "Influence of high temperature on the properties of concretes made with industrial by-products as fine aggregate replacement," *Constr. Build. Mater.*, vol. 25 (2), pp. 967–972, 2011, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.06.085>.
- [14]. Bazant, Z.P., Kaplan, M.F., *Concrete at high temperatures: Material properties and mathematical models*. London: Longman., 1996.
- [15]. Remnev, V.V., "Heat-resistant properties of cement stone with finely milled refractory additives," *Refract. Ind. Ceram.*, vol. 37(5), pp. 151–152, 1996.
- [16]. Khoury, G.A., "Compressive strength of concrete at high temperature: A reassessment," *Mag. Concr. Res.*, vol. 44(161), pp. 291–309.
- [17]. Rashad, A. M., "An investigation of high-volume fly ash concrete blended with slag subjected to elevated temperatures," *J. Clean. Prod.*, vol. 93, pp. 47–55, 2015, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.01.031>.
- [18]. Rehsi, S.S., Garg, S.K., "Heat resistance of Portland fly ash cement," *Cement*, vol. 4(2), pp. 14–16, 1976.
- [19]. 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, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.07.033>.
- [20]. 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.
- [21]. Donatello, S., Kuenzel, C., Palomo, A., Fernández-Jiménez, A., "High temperature resistance of a very high volume fly ash cement paste," *Cem. Concr. Compos.*, vol. 45, pp. 234–242, 2014.
- [22]. Morsy M.S, Rashad A.M, Sheble, S.S., "Effect of elevated temperature on compressive strength of blended cement mortar," *Build Res J*, vol. 56(2–3), pp. 173–185, 2008.
- [23]. Ghandehari, M., Behnood, A., Khanzadi, M., "Residual mechanical properties of high-strength concretes after exposure to elevated temperature," *J Mater Civ. Eng ASCE*, pp. 59–64, 2010.
- [24]. Saad M, Abo-El-Enein, S.A., Hanna, G.B., Kotkata, M.F., "Effect of temperature on physical and mechanical properties of concrete containing silica fume," *Cem Concr Res*, vol. 26(5), pp. 669–675, 1996.
- [25]. Tanyildizi, H., Coskun, A., "Performance of lightweight concrete with silica fume after high temperature," *Constr. Build. Mater.*, vol. 22, pp. 2124–2129, 2008.
- [26]. 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.
- [27]. Đỗ Thị Phượng, 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 Xây Dựng - Bộ Xây Dựng*, vol. 11(5), pp. 1–5, 2021, <https://doi.org/10.54772/jomc.05.2021.221>.
- [28]. Kodur, V., "Properties of Concrete at Elevated Temperatures," *ISRN Civ. Eng.*, pp. 1–15, 2014, <https://doi.org/10.1155/2014/468510>.
- [29]. Heikal, M., "Effect of elevated temperature on the physico-mechanical and microstructural properties of blended cement pastes," *Build. Res. J.*, vol. 56, pp. 157–171, 2008.
- [30]. Sancak, E., Sari, Y.D., Sumsek, O., "Effects of elevated temperature on compressive strength and weight loss of the light-weight concrete with silica fume and superplasticizer," *Cem. Concr. Compos.*, vol. 30, pp. 715–721, 2008, doi:10.1016/j.cemconcomp.2008.01.004.
- [31]. Tufail, M., Shahzada, K., Gencturk, B., Wei, J., "Effect of elevated temperature on mechanical properties of limestone, quartzite and granite concrete," *Int. J. Concr. Struct. Mater.*, vol. 11(1), pp. 17–27, 2017.