

Đánh giá một số tính chất của xi măng poóclăng ở nhiệt độ cao khi sử dụng phế thải ngói làm phụ gia khoáng

Đỗ Thị Phương¹, Nguyễn Văn Quang¹, 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 KHÓA

Chất kết dính
Xi măng poóclăng
Phế thải ngói
Bột ngói
Nhiệt độ
Cường độ chịu nén

TÓM TẮT

Vật liệu chịu nhiệt không những rất cần thiết trong công nghiệp sản xuất vật liệu xây dựng mà còn có vai trò quan trọng trong xây dựng dân dụng ở một số hạng mục cần chịu nhiệt, chống cháy. Nghiên cứu và phát triển vật liệu chịu nhiệt sử dụng xi măng poóclăng và phế thải công nghiệp góp phần giải quyết được nhu cầu của vật liệu chịu nhiệt trong nước. Bài báo giới thiệu sử dụng phế thải ngói lợp làm phụ gia khoáng cải thiện tính chất của xi măng poóclăng, hướng đến làm vữa, bê tông chịu nhiệt cho các công trình xây dựng. Các tính chất của chất kết dính được nghiên cứu như độ co, cường độ chịu nén ở các cấp nhiệt độ 100, 200, 400, 600, 800 và 1000 °C. Phân tích nhiệt trọng lượng và kính hiển vi điện tử quét cũng được thể hiện trong bài báo này. Kết quả chỉ ra bột ngói với hàm lượng 30 % (khối lượng, so với xi măng) có thể chế tạo chất kết dính làm việc đến 800 °C, mẫu có độ co 1,19 % và cường độ chịu nén còn lại 53,4 %.

KEYWORDS

Binder
Portland cement
Roof tile waste
Tile powder
Temperature
Compressive strength

ABSTRACT

Heat-resistant materials are essential in the building materials industry and play an important role in civil construction in some items requiring heat and fire resistance. Research and development of heat-resistant materials using Portland cement and industrial waste contribute to solving the country's need for heat-resistant materials. The article introduces the use of roof tile waste as a fine mineral additive to improve the properties of Portland cement towards making mortar, heat-resistant concrete for construction works. The shrinkage and compressive strength of the binder at temperatures of 100, 200, 400, 600, 800, and 1000 °C are determined. Thermal Gravimetric analysis and Scanning Electron Microscopy are also shown in this paper. The results show that tile powder with 30 % content to replace Portland cement can make a binder working up to 800 °C; the sample has a shrinkage of 1.19 % and a residual compressive strength of 53.4 %.

1. Giới thiệu

Vật liệu chịu nhiệt được sử dụng đa dạng trong các lĩnh vực luyện kim, hoá chất, chế tạo máy và trong sản xuất vật liệu xây dựng như các hầm lò, ống khói, kênh dẫn khí, bê đỡ, ... Ngoài ra nó còn có vai trò quan trọng trong xây dựng dân dụng ở một số hạng mục cần chịu nhiệt, chống cháy. Chế tạo vật liệu chịu nhiệt từ xi măng poóclăng (PC) và các phế thải công nghiệp là cách giải quyết có hiệu quả khi nguồn vật liệu chế tạo trong nước còn hạn chế. Xi măng poóclăng là một chất kết dính (CKD) 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. Sự thủy hoá của thành phần CaO tự do có trong đá xi măng gây nở thể tích và có thể phá huỷ mẫu. Để tăng khả năng chịu nhiệt, sử dụng phụ gia khoáng để hạn chế thành phần Ca(OH)₂ cũng như CaO tự do có trong đá xi măng, ngoài ra còn làm giảm co ngót của đá xi măng ở nhiệt độ cao [1].

Tro bay và xi lò cao là những sản phẩm phụ từ các quy trình công nghiệp, được nghiên cứu sử dụng để thay thế xi măng chế tạo vữa, bê tông làm việc ở nhiệt độ cao, là một trong những cách giải

quyết thân thiện môi trường. Tỷ lệ tro bay thay thế xi măng được nghiên cứu với phạm vi rộng, chủ yếu từ 20 ÷ 50 % và thí nghiệm đốt nóng mẫu đến 800 ÷ 1000 °C [2-5]. Thậm chí tro bay còn được nghiên cứu với hàm lượng lớn 40 ÷ 60 % chế tạo vữa, bê tông làm việc đến 900 °C [6], [7] và chế tạo bê tông geopolymer làm việc đến 1000 °C [8]. Tác giả Q. Li [9] đã nghiên cứu xi lò cao với các hàm lượng 10 %, 30 % và 50 % tính theo khối lượng xi măng chế tạo bê tông và thí nghiệm ở các mức nhiệt độ từ 150 °C đến 700 °C, các tính chất được xác định như mất khối lượng, cường độ chịu nén, mô đun đàn hồi và cho rằng cường độ nén còn lại cao nhất ở 400 °C. Tác giả O. Karahan [10] sử dụng tro bay và xi lò cao với hàm lượng 0 %, 30 %, 50 %, 70 % và 90 % chế tạo bê tông làm việc ở các nhiệt độ 400, 600 và 800 °C. Một số tính chất thu được, tác giả cho rằng 30 ÷ 50 % tro bay và 50 ÷ 70 % xi lò cao thay thế xi măng làm hàm lượng tối ưu cho bê tông có thể làm việc ở nhiệt độ cao. Silica fume cũng được đưa vào sử dụng làm phụ gia cho CKD và bê tông làm việc đến 800 °C [11-13]. Tuy nhiên, hiện nay silica fume được đưa vào thương mại hoá nên giá thành cao. Tác giả A.Hlystov và các cộng sự [14] đã nghiên cứu sử dụng hỗn hợp CKD từ xi măng PC, bột nanô

*Liên hệ tác giả: dtphuong@dut.udn.vn

Nhận ngày 11/03/2023, sửa xong ngày 21/05/2023, chấp nhận đăng 13/06/2023

Link DOI: <https://doi.org/10.54772/jomc.03.2023.520>

caoalumin và bùn phế thải alumin chế tạo bê tông có thể chịu nhiệt đến 1300 ÷ 1500 °C. Theo thống kê, mỗi năm tại Nga, hàng trăm nghìn tấn phế thải công nghiệp gốc caoalumin được thải ra với hàm lượng Al₂O₃ chiếm 45 ÷ 50 %, là nguồn phụ gia khá tốt cho bê tông chịu nhiệt.

Một lượng lớn phế thải vật liệu ceramic được thải ra hàng năm bởi ngành công nghiệp gốm sứ. Theo báo cáo, ngành công nghiệp gốm sứ loại bỏ khoảng 3 ÷ 7 % sản phẩm của họ do lỗi sản xuất. Tuy nhiên, phế thải gạch ngói đất sét nung là loại rác thải khó phân huỷ nên việc tái chế là một trong những giải pháp để loại bỏ việc xử lý chúng. Ngoài ra, chúng có các thành phần SiO₂ và Al₂O₃ cao, độ bền cơ học nhất định, hệ số dẫn nở nhiệt và hệ số dẫn nhiệt thấp nên có thể nghiên cứu sử dụng làm phụ gia khoáng cho chất kết dính chịu nhiệt [15]. Bột gạch vỡ với hàm lượng 20 % và 45 % thay thế xi măng có thể tăng khả năng chịu nhiệt của CKD từ xi măng lần lượt ở 800 °C và 1000 °C [16], [17]. Tác giả S. Wild [18] cho rằng gạch đất sét nung được sử dụng ở 600 ÷ 1000 °C sẽ thể hiện hoạt tính đáng kể tương đương với tro bay. Hỗn hợp bột ngói vỡ và tro bay có thể chế tạo CKD từ xi măng PC và bê tông làm việc tốt nhất ở 800 °C [19], [20]. Tác giả M.Y. Durgun [15] sử dụng 10 %, 20 % và 30 % bột ngói tái chế làm chất kết dính từ thạch cao, các mẫu được nung ở 600 °C và 800 °C. Kết quả cho thấy cường độ của mẫu giảm khi bổ sung phụ gia nhưng tăng khả năng chịu nhiệt độ, sự thay đổi thể tích do nhiệt độ cao giảm. Các công bố cho thấy khả năng sử dụng phế

thải gạch ngói làm phụ gia chế tạo vật liệu làm việc ở nhiệt độ cao. Tuy nhiên, chưa có báo cáo nào ở trong nước về việc sử dụng phế thải ngói đất sét nung làm phụ gia khoáng đơn cho chất kết dính làm việc ở nhiệt độ cao trong khi công nghiệp gạch ngói đất sét nung là một trong những ngành công nghiệp truyền thống của Việt Nam. Bài báo này nghiên cứu đánh giá một số tính chất, cấu trúc của đá xi măng ở khoảng 800 ÷ 1000 °C khi sử dụng phế thải ngói làm phụ gia khoáng, hướng đến chế tạo vữa, bê tông chịu nhiệt cho các công trình xây dựng.

2. Vật liệu và phương pháp thí nghiệm

2.1. Vật liệu và tính chất

Xi măng PC40 Kim Đình (PC) có khối lượng riêng 3,07 g/cm³ và sót sàng 0,09 mm là 0,98 % được sử dụng làm chất kết dính. Lượng nước tiêu chuẩn của xi măng là 31,5 %, thời gian bắt đầu đông kết là 105 phút và kết thúc là 165 phút. Các tính chất của PC thỏa mãn yêu cầu kỹ thuật theo TCVN 2682:2009. Bột ngói (N) được gia công từ các phế thải ngói vỡ đến cỡ hạt nhỏ hơn 0,09 mm, có khối lượng riêng 2,68 g/cm³, được sử dụng thay thế xi măng nhằm cải thiện các đặc tính của xi măng PC ở nhiệt độ cao. Thành phần hoá của các vật liệu được giới thiệu trong Bảng 1.

Bảng 1. Thành phần hoá của các vật liệu.

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
PC	20,8	7,12	3,29	63,7	0,75	0,13	2,56	-	1,95
N	63,03	18,72	11,03	1,80	1,34	0,99	0,89	1,13	1,07

2.2. Tỷ lệ thành phần vật liệu

Phụ gia khoáng ảnh hưởng đến tính chất, cấu trúc của đá xi măng PC ở nhiệt độ cao thông qua các yếu tố như loại và lượng phụ gia khoáng, độ mịn và thành phần hạt và lượng nước sử dụng. Trong nghiên cứu này, phụ gia khoáng bột ngói có cỡ hạt nhỏ hơn 0,09 mm, lượng nước sử dụng cho CKD là lượng nước tiêu chuẩn, lượng bột ngói thay thế xi măng là 20 %, 25 %, 30 %, 40 %, 45 % và 50 % (theo khối lượng), đồng thời ký hiệu các mẫu tương ứng N20, N25, N30, N40, N45 và N50.

2.3. Phương pháp thí nghiệm

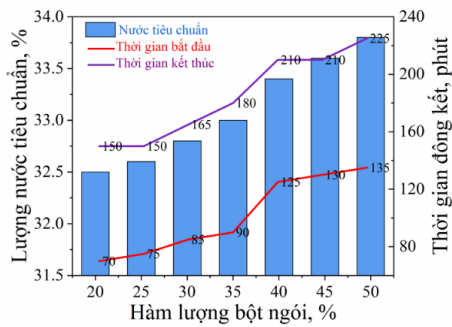
Nghiên cứu đã sử dụng các tiêu chuẩn TCVN 6017:2015, TCVN 4030:2003 và TCVN 6016:2011 để thí nghiệm các tính chất của vật liệu. Vật liệu được nhào trộn trong máy trộn với thời gian 3 phút. Lượng nước tiêu chuẩn và thời gian đông kết được xác định. Sau đó chế tạo 180 mẫu với kích thước 2 × 2 × 2 cm. Bảo dưỡng mẫu bằng cách để khuôn mẫu trong điều kiện 27 ± 2 °C, độ ẩm không nhỏ hơn 95 %

trong 20 h rồi tháo mẫu và đem chưng hấp (nhiệt độ 100 °C với thời gian 4 h kể từ khi sôi). Để xác định các tính chất ở nhiệt độ cao, đưa mẫu đi sấy ở 100°C đến khối lượng không đổi và nung trong lò điện ở các cấp nhiệt 200, 400, 600, 800 và 1000 °C với tốc độ nâng nhiệt không lớn hơn 5 °C/ph, thời gian hằng nhiệt 2 h. Sau khi nung ở từng cấp nhiệt, mẫu được làm nguội đến nhiệt độ phòng, xác định độ co và cường độ chịu nén [19]. Khả năng làm việc của mẫu 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 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. Nước tiêu chuẩn và thời gian đông kết

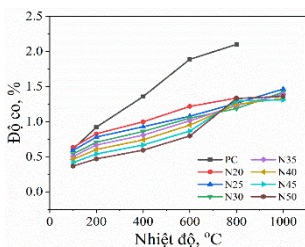
Ảnh hưởng của hàm lượng bột ngói đến lượng nước tiêu chuẩn và thời gian đông kết của các hỗn hợp CKD thể hiện trong Hình 1. So với mẫu PC, mẫu chứa bột ngói có lượng nước tiêu chuẩn cao hơn và tăng theo hàm lượng phụ gia do bột ngói có cấu trúc xốp nên khả năng hấp phụ nước lớn hơn [16]. Tuy nhiên, sự mất nước của mẫu chứa bột ngói xảy ra nhanh hơn nên hỗn hợp CKD đông kết nhanh. Khi hàm lượng bột ngói tăng trên 30 ÷ 40 % thì thời gian đông kết của hỗn hợp CKD cao hơn so với mẫu PC do lượng nước tiêu chuẩn tăng cao, mẫu hấp phụ nhiều nước và giữ nước.



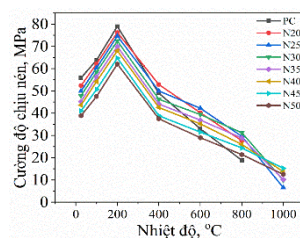
Hình 1. Lượng nước tiêu chuẩn và thời gian đông kết của hỗn hợp chất kết dính.

3.2. Độ co

Giá trị độ co của đá chất kết dính khi nung từ 100 ÷ 1000 °C thể hiện Hình 2. Sự mất nước của đá CKD khi sấy và đốt nóng làm độ co của đá CKD tăng lên. Đầu tiên là sự mất nước tự do trong các lỗ rỗng mao quản ở nhiệt độ nhỏ hơn 105 °C làm mẫu co 0,37 ÷ 0,63 %, sự mất nước vật lý và hoá học khi nung đến 600 °C làm mẫu co 0,8 ÷ 1,22 % [21]. Ở các mức nhiệt độ này, độ co giảm dần khi hàm lượng bột ngói tăng. Đến 800 °C, sự phân hủy các khoáng C-S-H, CaCO₃ làm khối lượng mẫu tiếp tục giảm, độ co tăng lên 1,19 ÷ 1,34 % [21], [22]. Lúc này, độ co giảm khi hàm lượng bột ngói tăng lên 30 % và có xu hướng tăng lên khi lượng phụ gia tăng. Đến 1000 °C, mẫu PC và mẫu chứa 20 % N bị nứt vỡ, độ co tăng lên 1,31 ÷ 1,46 %, trong đó mẫu chứa 45 % N có độ co nhỏ nhất. Ở khoảng 200 ÷ 800 °C, độ co của mẫu PC là 0,60 ÷ 2,08 %, cao hơn mẫu chứa phụ gia. Sử dụng bột ngói thay thế xi măng PC trong CKD đã giảm sự mất nước và sự phân hủy của các sản phẩm của PC, là những nguyên nhân gây giảm kích thước mẫu ở nhiệt độ cao [19], [20].



Hình 2. Độ co của đá chất kết dính theo nhiệt độ.



Hình 3. Cường độ chịu nén của đá chất kết dính theo nhiệt độ.

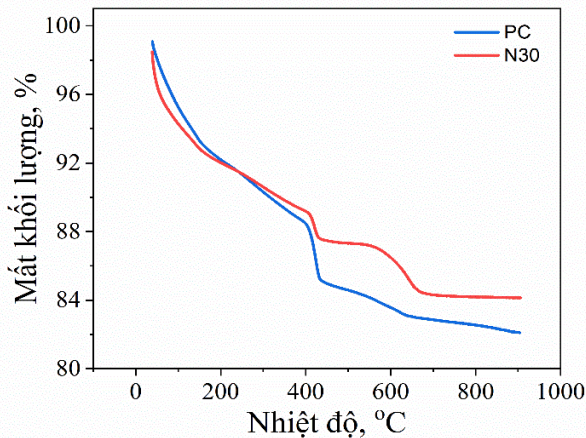
3.3. Cường độ chịu nén

Sự thay đổi cường độ chịu nén của các mẫu CKD khi nâng nhiệt độ từ 25 ÷ 1000 °C được thể hiện ở Hình 3. Cường độ chịu nén của các mẫu có xu hướng tăng lên khi nhiệt độ lên đến 200 °C, sau đó giảm khi tăng nhiệt độ đến 1000 °C. Hiện tượng “tự chưng hấp” diễn ra ở khoảng 200 °C, làm tăng sản phẩm hydrat, các mẫu có cường độ tăng 145,6 ÷ 159,6 % so với ở nhiệt độ thường [2], [19]. Trong khi đó cường độ chịu nén giảm ở 400 ÷ 1000 °C có thể do sự phân hủy các thành phần như Ca(OH)₂, C-S-H, CaCO₃ [21], [22]. Đặc biệt, thành phần CaO tự do sẽ nguy hiểm khi mẫu được làm nguội trong môi trường ẩm, CaO sẽ hút ẩm, thủy hoá lần hai và gây nở thể tích [1]. Các mẫu chứa hàm lượng bột ngói nhiều sẽ giảm cường độ của mẫu ở nhiệt độ lớn hơn 400 ÷ 600 °C. Tuy nhiên ở trên 600 °C các mẫu chứa 25 % N, 30 % N và 35 % N có giá trị cường độ chịu nén còn lại so với ở 100 °C cao hơn. Trong đó, ở 800 °C, mẫu chứa 30 % N cho mẫu có cường độ chịu nén cao nhất 31,3 MPa, còn lại 53,4 %. Đến 1000 °C, mẫu chứa 20 % N bị nứt vỡ hoàn toàn, các mẫu có cường độ chịu nén suy giảm lớn, trong đó mẫu chứa 45 % N có cường độ cao nhất là 15,3 MPa, còn lại 30,2 %.

Mẫu PC có cường độ chịu nén cao hơn mẫu chứa bột ngói ở khoảng 25 ÷ 200 °C. Bột ngói là phụ gia khoáng không có hoạt tính ở nhiệt độ thường nên đã giảm sản phẩm hydrat của mẫu, giảm cường độ nén. Tuy nhiên, ở nhiệt độ cao hơn 200 °C mẫu PC có cường độ chịu nén thấp hơn mẫu chứa bột ngói và ở 1000 °C bị phá hủy hoàn toàn. Sự mất nước của các thành phần như Ca(OH)₂, C-S-H trong đá xi măng không gây ảnh hưởng đến cấu trúc đá xi măng chứa bột ngói. Sự nở của nó có thể phù hợp với đá xi măng ở nhiệt độ cao, có thể làm giảm co và hạn chế sự suy giảm cường độ. Như vậy, khả năng làm việc tốt nhất của đá CKD là 800 °C. Việc thay thế một phần xi măng PC bằng 30 % N sẽ cải thiện được cường độ nén còn lại của xi măng ở 800 °C. Một số nghiên cứu chỉ ra, sử dụng 20 % sa mốt hoặc 20 % bột gạch thay thế xi măng cũng có thể chế tạo được CKD, vừa có khả năng chịu nhiệt ở mức nhiệt độ này [16], [17]. Nghiên cứu khác cho rằng, sự kết hợp giữa phụ gia khoáng 20 % tro bay và 10 % bột ngói với cho chất kết dính có cường độ chịu nén 37,7 MPa và độ co 1,26 % [19]. Mẫu chứa bột ngói mặc dù có cường độ chịu nén thấp hơn nhưng độ co giảm do thành phần tro bay với độ hoạt tính cao hơn đã thể hiện vai trò pozzolanic, hạn chế thành phần Ca(OH)₂ trong đá xi măng nhưng sự mất nước của các thành phần khoáng cũng như nóng chảy làm tăng độ co.

3.4. Phân tích nhiệt trọng lượng (TG)

Kết quả phân tích TG mẫu chứa 30 % N và mẫu đối chứng PC thể hiện ở Hình 4.

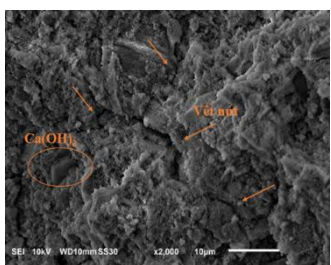


Hình 4. Kết quả phân tích TG mẫu 30N và PC.

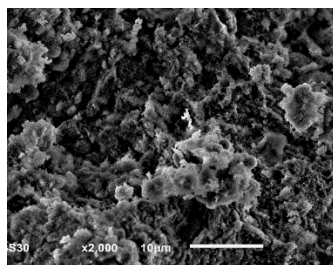
Mẫu chứa bột ngói có lượng nước tiêu chuẩn cao hơn mẫu PC nên sự bay hơi nước diễn ra mạnh mẽ hơn khi đốt nóng dẫn đến mất khối lượng nhiều hơn ở khoảng nhiệt nhỏ hơn 200 °C. Nhiệt độ tăng, khối lượng của mẫu 30 N giảm ít hơn so với mẫu PC và nhiều hơn ở khoảng nhiệt độ 400 ÷ 800 °C. Lúc này khối lượng mẫu PC mất khoảng 10 ÷ 16 % trong khi mẫu 30 N mất khoảng 8 ÷ 13 %. Quá trình mất nước hoá học, sự phân hủy các khoáng trong đá xi măng diễn ra trong giai đoạn này làm khối lượng đá xi măng giảm mạnh [21], [22]. Sử dụng bột ngói làm phụ gia khoáng thay thế xi măng đã giảm sự mất khối lượng của đá xi măng ở nhiệt độ cao.

3.5. Phân tích kính hiển vi điện tử quét (SEM)

Ảnh SEM của mẫu CKD chứa 30 % N và mẫu PC được nung ở 800 °C thể hiện Hình 5 và Hình 6. Ảnh SEM mẫu chứa 30 % N quan sát chủ yếu thấy pha nóng chảy, các tinh thể và lỗ rỗng nhỏ. Bột ngói dưới dạng hạt mịn lấp đầy các lỗ rỗng trong đá xi măng, tăng độ đặc cho mẫu. Các vết nứt nhỏ quan sát thấy trong ảnh SEM mẫu PC khi nung ở 800 °C. Các vết nứt này có xu hướng giảm dần cường độ chịu nén của mẫu. Ngoài ra, khoáng Ca(OH)₂ với dạng phiến lục giác vẫn quan sát thấy trong mẫu. Sự khử nước của Ca(OH)₂ tạo CaO có thể gây bất lợi cho mẫu khi nó hút ẩm và thủy hoá [1].



Hình 5. Kết quả SEM mẫu PC ở 800°C.



Hình 6. Kết quả SEM mẫu N30 ở 800°C.

4. Kết luận

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

- Mẫu PC bị phá hủy hoàn toàn ở nhiệt độ lớn hơn 800 °C. Mẫu chứa 30 % bột ngói có thể cải thiện tốt nhất độ co và cường độ chịu nén của đá xi măng ở 800 °C. Mẫu có độ co 1,39 % và cường độ chịu nén còn lại trên 50 %.

- So với mẫu PC, mẫu chứa bột ngói có lượng nước tiêu chuẩn cao hơn và tăng theo hàm lượng ngói nhưng thời gian đông kết rút ngắn, hàm lượng ngói khoảng trên 30 ÷ 40 % cho thời gian đông kết kéo dài hơn.

- Tìm được quy luật biến đổi độ co và cường độ chịu nén của mẫu đá chất kết dính theo nhiệt độ và hàm lượng phụ gia. Nhiệt độ tăng thì độ co của mẫu tăng lên, cường độ chịu nén tăng ở khoảng 25 đến 200 °C và giảm khi gia nhiệt đến 1000 °C. Hàm lượng phụ gia nhiều sẽ giảm độ co và cường độ của mẫu trong khoảng 100 đến 600 °C. Nhưng ở 800 đến 1000 °C, giá trị độ co và cường độ thay đổi tùy thuộc vào hàm lượng phụ gia.

- Phế thải ngói có thể giảm sự mất khối lượng của đá xi măng, đặc biệt ở khoảng 400 đến 800 °C.

- Những vết nứt được quan sát thấy trong ảnh SEM của mẫu PC khi nung ở 800 °C có thể giải thích cho sự giảm cường độ của mẫu.

Tài liệu tham khảo

- [1]. Remnev, V.V., "Heat-resistant properties of cement stone with finely milled refractory additives.," *Refract. Ind. Ceram.*, vol. 37(5), pp. 151–152, 1996.
- [2]. Đỗ Thị Phương, Nguyễn Ngọc Lâm Nguyễn Nhân Hoà, Vũ Minh Đức, "Thành phần và vi cấu trúc của chất kết dính sử dụng xi măng poóc-lăng và tro bay ở nhiệt độ cao," *Tạp Chí Khoa Học Công Nghệ Xây Dựng KHCNXD - ĐHXD*, vol. 15 (6V), pp. 137–145, 2021, [https://doi.org/10.31814/stce.huice\(nuce\)2021-15\(6V\)-12](https://doi.org/10.31814/stce.huice(nuce)2021-15(6V)-12).
- [3]. 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>.
- [4]. Rehsi, S.S., Garg, S.K., "Heat resistance of Portland fly ash cement," *Cement*, vol. 4(2), pp. 14–16, 1976.
- [5]. Abid Nadeem, Shazim Ali Memon, Tommy Yiu Lo, "The performance of Fly ash and Metakaolin concrete at elevated temperatures," *Constr. Build. Mater.*, vol. 62, pp. 67–76, 2014, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.02.073>.
- [6]. 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, <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2007.02.005>.
- [7]. Khan, M.S. & Abbas, H., "Effect of elevated temperature on the behavior of high volume fly ash concrete," *KSCE J. Civ. Eng. Vol.*, vol. 19, pp. 1825–1831, 2015.
- [8]. Mohd Mustafa Al Bakri Abdullah et al, "Fly Ash Porous Material using Geopolymerization Process for High Temperature Exposure," *Int. J. Mol. Sci.*, vol. 13(4), pp. 4388–4395, 2012, <https://doi.org/10.3390/ijms13044388>.

- [9]. Li, Q., Li, Z., Yuan, G., “Effects of elevated temperatures on properties of concrete containing ground granulated blast furnace slag as cementitious material,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 35, pp. 687–692, 2012, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.04.103>.
- [10]. Karahan, O., “Transport properties of high volume fly ash or slag concrete exposed to high temperature,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 152, pp. 898–906, 2017, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.07.051> Get rights and content.
- [11]. 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.
- [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. https://doi.org/10.1007/978-3-030-62324-1_45.
- [13]. 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.
- [14]. 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>.
- [15]. Durgun, M.Y., “Experimental research on gypsum-based mixtures containing recycled roofing tile powder at ambient and high temperatures,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 285, p. 122956, 2012, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122956>.
- [16]. Đỗ Thị Phương, Nguyễn Văn Đông, “Sử dụng xi măng poóc-lăng hỗn hợp chế tạo chất kết dính chịu nhiệt,” *Tạp Chí Khoa Học Và Công Nghệ ĐHQĐHN*, vol. 8 (69), pp. 43–49, 2013.
- [17]. Nguyen, N.L., “Heat resistant mortar using Portland cement and waste clay bricks,” in *CIGOS 2019, Innovation for Sustainable Infrastructure*, 2019. https://doi.org/10.1007/978-981-15-0802-8_86.
- [18]. Wild, S., Khati, B., Addis, S.D., *Concrete in the Service of Mankind— Concrete for Environment Enhancement*. Publication E & Fn Spon, Dundee, 1996.
- [19]. Đỗ Thị Phương, Vũ Minh Đức, “Tính chất của chất kết dính sử dụng phụ gia tro bay và ngói đất sét nung ở nhiệt độ cao,” *Tạp Chí Vật Liệu Xây Dựng - Bộ Xây Dựng*, vol. 11(6), pp. 49–54, 2021, <https://doi.org/10.54772/jomc.6.2021.209>.
- [20]. Đỗ Thị Phương, Vũ Minh Đức, “Tối ưu hoá thành phần bê tông sử dụng tro xi nhiệt điện và bột ngói đất sét nung ở nhiệt độ cao,” *Tạp Chí Khoa Học Công Nghệ Xây Dựng KHCNXD - ĐHXD*, vol. 15 (6V), pp. 125–136, 2021, [https://doi.org/10.31814/stce.huice\(nuce\)2021-15\(6V\)-11](https://doi.org/10.31814/stce.huice(nuce)2021-15(6V)-11).
- [21]. Hager, I., “Behaviour of cement concrete at high temperature,” *Bull. Pol. Acad. Sci. Tech. Sci.*, no. 61(1), pp. 145–154, 2013.
- [22]. Klieger, P., Lamond, J., “Significance of tests and properties of concrete and concrete-making materials,” *ASTM Int.*, 1994.