

ẢNH HƯỞNG CỦA PHÉ THẢI GỐM SỨ NGHIÊN MỊN ĐẾN CÁC TÍNH CHẤT CỦA CHẤT KẾT DÍNH XI MĂNG

Tổng Tôn Kiên^{a,*}, Nguyễn Hoàng Minh Anh^a, Đào Trọng Tráng^a, Phạm Thị Vinh Lan^b

^aKhoa Vật liệu xây dựng, Trường Đại học Xây dựng Hà Nội,
55 đường Giải Phóng, quận Hai Bà Trưng, Hà Nội, Việt Nam

^bKhoa Xây dựng, Trường Cao đẳng Xây dựng số 1,
đường Trung Văn, quận Nam Từ Liêm, Hà Nội, Việt Nam

Nhận ngày 26/6/2024, Sửa xong 30/7/2024, Chấp nhận đăng 25/9/2024

Tóm tắt

Nghiên cứu này đánh giá khả năng sử dụng bột gốm sứ (BGS) được nghiền mịn từ phế thải gốm sứ và thiết bị vệ sinh trong sản xuất xi măng. Các quy luật ảnh hưởng của hàm lượng 10, 20, và 30% bột gốm sứ đến các tính chất của chất kết dính (CKD) xi măng hỗn hợp đã được phân tích. Mặc dù bột gốm sứ có hình dạng không đều và các cạnh sắc, nhưng bề mặt thủy tinh, độ rỗng xốp thấp và khả năng chống hóa học nên bột gốm sứ làm tăng nhẹ 3,2-4,8% lượng nước tiêu chuẩn, giảm 11,4-27,7% độ nhớt và kéo dài thời gian đông kết của hồ CKD. Kết quả nghiên cứu cho thấy bột gốm sứ hoàn toàn có thể sử dụng làm phụ gia khoáng hoạt tính cho xi măng do chỉ số hoạt tính cường độ ở tuổi 7 và 28 ngày đều đạt lớn hơn 75% theo TCVN 6882:2016. Độ hút nước của mẫu vữa tiêu chuẩn tăng 40,4-53,2% khi sử dụng bột gốm sứ thay thế xi măng từ 10-30%. Còn độ hút nước mao quản sau 24 giờ tăng 10,8% ở tỷ lệ thay thế 10%; nhưng lại giảm 10,8-16,9% khi tỷ lệ thay thế 20-30%. Điều này chứng tỏ, tùy thuộc vào hàm lượng thay thế, BGS có thể hạn chế hình thành lỗ rỗng mao quản và giảm kích thước lỗ rỗng nhờ vào hiệu ứng lấp đầy và các sản phẩm phản ứng pozolan.

Từ khóa: bột phế thải gốm sứ (BGS); phụ gia khoáng (PGK); độ nhớt; chỉ số hoạt tính cường độ; độ hút nước mao quản.

INFLUENCE OF GROUND SANITARY WARE WASTE ON CEMENTITIOUS BINDER PROPERTIES

Abstract

This study evaluated the possibility of using finely ground sanitary ware powder (SWP) from ceramic waste and sanitary ware in cement production. The influence of 10, 20, and 30% SWP on blended cement properties were analysed. Although SWP has an irregular shape and sharp edges, its glassy surface, low porosity and chemical inertness allow SWP to slightly increase the standard water content by 3.2-4.8%, reduce the viscosity by 11.4-27.7% and prolong the setting time of the binder paste. The results show that SWP can be completely used as an active mineral additive for cement because the strength activity index at 7 and 28 days is greater than 75% following TCVN 6882:2016. The water absorption increased by 40.4-53.2% in mortar samples containing 10-30% SWP-replaced cement. The capillary water absorption after 24 hours increased by 10.8% at a 10% replacement rate; but decreased by 10.8-16.9% at a replacement rate of 20-30%. This demonstrates that, depending on the replacement content, SWP can limit the formation of capillary pores and reduce pore diameter thanks to the filling effect and pozzolanic reaction products.

Keywords: sanitary ware powder (SWP); mineral additive; viscosity; strength activity index - SAI; capillary water absorption.

[https://doi.org/10.31814/stce.huce2024-18\(4V\)-11](https://doi.org/10.31814/stce.huce2024-18(4V)-11) © 2024 Trường Đại học Xây dựng Hà Nội (ĐHXDHN)

1. Giới thiệu

Phụ gia khoáng (PGK) là vật liệu vô cơ có nguồn gốc từ tự nhiên hoặc nhân tạo thường ở dạng nghiền mịn và được đưa vào trong quá trình trộn nhằm cải thiện thành phần cốt hạt và cấu trúc của đá

*Tác giả đại diện. Địa chỉ e-mail: kientt@huce.edu.vn (Kiên, T. T.)

xi măng, bê tông và vữa. Tùy theo mức độ hoạt tính, PGK được chia làm PGK hoạt tính và PGK đầy theo tiêu chuẩn Việt Nam TCVN 6882:2016 [1]. PGK hoạt tính là loại phụ gia có độ mịn cao, có hàm lượng SiO_2 hoặc Al_2O_3 ở dạng hoạt tính cao. Vì vậy khi sử dụng PGK hoạt tính thay thế một phần xi măng, các thành phần hoạt tính SiO_2 của phụ gia sẽ kết hợp với Ca(OH)_2 tạo thành do thủy hóa các khoáng của clanhke xi măng Poóc lăng làm giảm nồng độ Ca(OH)_2 có trong đá xi măng, đồng thời sinh ra các khoáng có lợi cho cường độ đá xi măng. Ngoài ra, các PGK với độ mịn cao còn có tác dụng lấp đầy lỗ rỗng nhỏ, giảm độ thấm hút nước, làm tăng độ đặc chắc, tăng khả năng liên kết trong cấu trúc của vữa và bê tông. Do đó, việc trộn lẫn PGK vào trong thành phần xi măng và bê tông sẽ làm tăng cường độ, tăng độ bền lâu của xi măng, vữa và bê tông [2].

Trong khi đó, xi măng là một trong những thành phần quan trọng nhất và đóng vai trò là chất kết dính để sản xuất vữa và bê tông. Sản lượng xi măng tăng đều đặn hàng năm và trở thành nguồn phát thải CO_2 nhân tạo lớn thứ ba (chiếm 8-10% tổng CO_2 do con người tạo ra) [3], sau CO và các kim loại nặng khác. Vì vậy, giảm lượng clanhke xi măng sử dụng là một trong những chiến lược quan trọng nhất để chống lại sự biến đổi khí hậu và giảm các tác động xấu đến môi trường của quá trình sản xuất xi măng, bê tông. Các loại vật liệu thay thế xi măng phổ biến như: Xi lò cao nghiền mịn, thạch cao, tro bay, đất puzolan, tro trấu, silica fume, ... Đặc biệt, việc sử dụng các vật liệu thay thế xi măng từ nguồn phế thải công nghiệp làm PGK cho xi măng đã đạt kết quả khả quan và được ứng dụng rộng rãi trong thực tế [2].

Tại Việt Nam, qua các tài liệu nghiên cứu cho thấy phế thải xây dựng và phá dỡ công trình (PTXD) phát sinh ngày càng nhiều, nhưng công tác quản lý chưa được quan tâm, lượng PTXD được tái chế còn khá thấp [4, 5]. PTXD là vật liệu thải chủ yếu phát sinh trong quá trình xây dựng, phá dỡ các tòa nhà và dự án cơ sở hạ tầng, hoặc từ quá trình sửa chữa, cải tạo và phá dỡ công trình [6]. Hiện nay đã có nhiều nghiên cứu tái sử dụng PTXD cho các mục đích khác nhau như làm cấp phối vật liệu san lấp, nền móng của mặt đường giao thông [7, 8], cốt liệu sản xuất các cấu kiện bê tông, bê tông cốt thép đúc sẵn [4, 9]. Cốt liệu tái chế có thể sử dụng cho sản xuất gạch không nung, vữa tiết kiệm tài nguyên đất sét và giải quyết bài toán về môi trường của việc phá dỡ các công trình xây dựng [10]. Để đảm bảo chất lượng của cốt liệu tái chế và cấp phối vật liệu tái chế từ PTXD, một số tiêu chuẩn Việt Nam (TCVN) cũng đã được ban hành như: TCVN 11969:2018 về cốt liệu lớn tái chế từ PTXD để sử dụng cho sản xuất bê tông, TCVN 13694:2023 về cấp phối vật liệu tái chế từ chất thải rắn xây dựng làm lớp móng đường giao thông đô thị, đường ô tô và đường giao thông nông thôn. Nhưng khi sản xuất cốt liệu tái chế cũng làm phát sinh lượng lớn bột mịn phế thải chưa được tận dụng hiệu quả và chưa có nhiều nghiên cứu về sử dụng PTXD nghiền mịn làm PGK cho xi măng và bê tông [11].

Thành phần vật liệu của PTXD bao gồm chủ yếu là các mảnh vụn bê tông từ các kết cấu bê tông và bê tông cốt thép, các mảnh gốm sứ từ các kết cấu tường xây và gạch ốp lát, các thiết bị gốm sứ vệ sinh (PTGS), bùn đất, ... [5]. Trong các thành phần trên, PTGS là thành phần thường được tách ra trước khi phá dỡ công trình hoặc dễ dàng tách ra khỏi hỗn hợp PTXD. Cho nên hoàn toàn có thể nâng cao hiệu quả sử dụng và gia tăng giá trị cho PTGS nếu được nghiền mịn để làm PGK cho xi măng. Trên thế giới đã có một số tác giả nghiên cứu khả năng sử dụng PTGS làm cốt liệu tái chế trong sản xuất bê tông [9, 12–14]. Gần đây, một số nghiên cứu đã chỉ ra rằng PTGS là nguồn nguyên liệu có hàm lượng lớn SiO_2 hoạt tính nên có thể sử dụng làm PGK thay thế một phần xi măng [11, 15–17]. Medina và cs. [15] đã nghiên cứu ảnh hưởng của 10 và 20% bột PTGS, bột PTXD thay thế xi măng đến độ nhớt và sự thủy hóa của chất kết dính (CKD) hỗn hợp. Kết quả cho thấy hoàn toàn có thể sử dụng các loại phế thải nghiền mịn này để chế tạo CKD. Mức độ và quy luật ảnh hưởng của hai loại bột phế thải này đến độ nhớt và tốc độ thủy hóa của CKD là trái ngược nhau. Gần đây, Pitarch và cs. [17] đã thay thế 0 đến 50% xi măng bằng ba loại bột phế thải gồm (phế thải gạch đỏ đất nung, gạch gốm ốp lát, PTGS)

và nhận thấy rằng các loại bột phế thải gốm (BGS) đều có hoạt tính puzolan, hoạt tính này đóng vai trò quyết định trong việc cải thiện tính chất cơ học của CKD theo thời gian bảo dưỡng. Có thể thấy rằng, các nghiên cứu sử dụng PTXD nghiền mịn, đặc biệt là BGS để làm PGK cho xi măng còn khá hạn chế, quy luật ảnh hưởng của BGS đến tính chất hỗn hợp CKD còn mâu thuẫn chưa thống nhất và hiệu ứng puzolan, hiệu ứng lấp đầy trong quá trình thủy hóa rắn chắc của CKD còn chưa được làm sáng tỏ.

Do đó, bài báo này sẽ tập trung nghiên cứu sử dụng PTGS nghiền mịn (BGS) từ các thiết bị gốm sứ vệ sinh cũ để làm vật liệu thay thế xi măng nhằm gia tăng giá trị và tận dụng tối đa nguồn PTGS trong sản xuất các loại CKD xi măng thân thiện với môi trường ở Việt Nam. Các quy luật ảnh hưởng của hàm lượng 10, 20, và 30% BGS đến lượng nước tiêu chuẩn (N_{tc}), thời gian đông kết và độ nhớt của hỗn hợp CKD xi măng được tập trung nghiên cứu. Bên cạnh đó, các hiệu ứng puzolan và hiệu ứng lấp đầy của BGS cũng được đánh giá thông qua sự thay đổi chỉ số hoạt tính cường độ, hàm lượng Ca(OH)_2 và CaCO_3 trong đá CKD; cũng như độ hút nước và độ hút nước mao quản của mẫu vữa tiêu chuẩn. Kết quả của nghiên cứu này không những là cơ sở khoa học của việc tận dụng BGS làm PGK sản xuất xi măng, góp phần tăng tỷ lệ tái chế PTXD, tăng vòng đời của vật liệu xây dựng, mà còn giảm lượng chất thải tồn chứa, giảm tiêu thụ tài nguyên không tái tạo, đồng thời thúc đẩy sản xuất CKD xi măng bền vững.

2. Vật liệu và phương pháp nghiên cứu

2.1. Vật liệu sử dụng

Xi măng sử dụng trong nghiên cứu là xi măng poóc lăng thường PC40 Thăng Long (XM). Kết quả tính chất kỹ thuật của xi măng đạt mức PC40 theo TCVN 2682:2020 [18] (Bảng 1). Cát sử dụng để chế tạo mẫu vữa tiêu chuẩn nhằm xác định cường độ và chỉ số hoạt tính cường độ của xi măng và CKD hỗn hợp là cát tiêu chuẩn ISO theo TCVN 6227:1996 [19]. Nước sử dụng là nước máy dùng trong sinh hoạt.

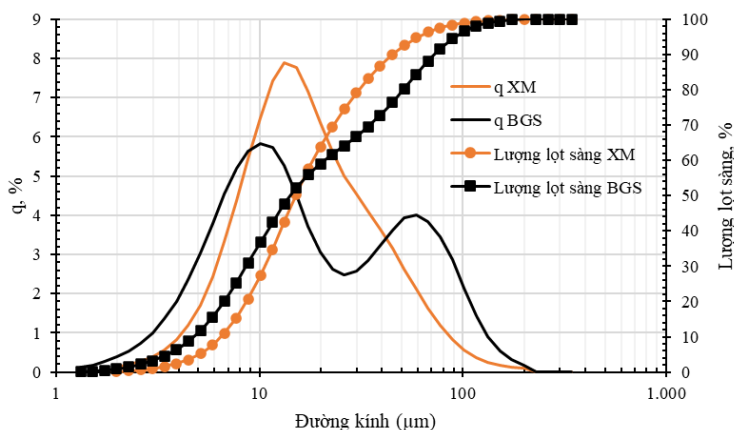
Bảng 1. Tính chất cơ lý của xi măng và bột gốm sứ

STT	Chỉ tiêu	Phương pháp thí nghiệm	XM	BGS
1	Khối lượng riêng, g/cm^3	TCVN 13605:2023 [20]	3,08	2,57
2	Độ mịn Blaine, cm^2/g	TCVN 13605:2023 [20]	3620	3810
3	Lượng nước tiêu chuẩn, %	TCVN 6017:2015 [21]	31,0	32,5
4	Thời gian đông kết:	TCVN 6017:2015 [21]		
	Bắt đầu đông kết, $T_{\text{bđđk}}$ (phút)		120	-
	Kết thúc đông kết, T_{ktdk} (phút)		180	-
5	Cường độ nén, MPa:	TCVN 6016:2011 [22]		
	3 ngày		30,4	-
	28 ngày		49,9	-

Từ Bảng 1 cho thấy XM có khối lượng riêng lớn hơn BGS, đồng thời lượng nước tiêu chuẩn (N_{tc}) của BGS cao hơn 4,8% so với XM. Điều này là do BGS có tỷ diện tích bề mặt $3810 \text{ cm}^2/\text{g}$, cao hơn so với XM là $3620 \text{ cm}^2/\text{g}$ nên lượng nước cần bao bọc và bôi trơn bề mặt hạt BGS để tạo độ dẻo tiêu chuẩn tăng lên.

Phế thải gốm sứ (PTGS) là các thiết bị vệ sinh cũ trong các công trình dân dụng được thu gom từ bãi phế thải hoặc các công trình chuẩn bị phá dỡ tại khu vực Hai Bà Trưng - Hà Nội. Sau đó được đập sơ bộ ($d < 10 \text{ mm}$), rửa và cho vào tủ sấy một ngày, PTGS được chuyển sang máy nghiền bi để nghiền mịn thành bột phế thải gốm sứ (BGS) có độ mịn tương đương so với độ mịn của xi măng và

sau đó được lưu giữ trong túi kín. Kết quả thành phần hạt của XM và BGS bằng phương pháp phân tích laser được thể hiện ở Hình 1. Từ Hình 1 cho thấy BGS có kích thước hạt trung bình gần tương đương với XM. Kích thước hạt trung bình của XM là 21,7 μm và có tỷ lệ phần trăm đường kính dưới 90 μm là 98,3% còn của BGS tương ứng là 28,6 μm và 94,2%, cao hơn XM không nhiều. Cả XM và BGS đều có tỷ lệ lọt sàng tại đường kính 90 μm lớn hơn 85% nên đạt yêu cầu độ mịn của vật liệu chất kết dính.



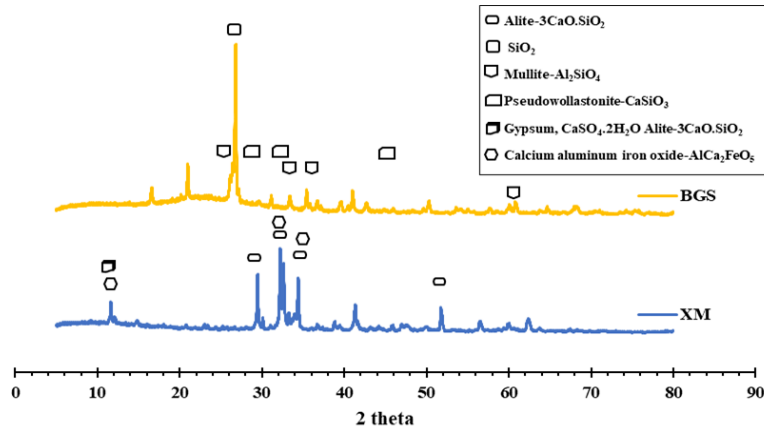
Hình 1. Thành phần hạt của XM và BGS

Kết quả thành phần hóa học và thành phần khoáng vật của XM và BGS theo phương pháp nhiễu xạ röntgen (XRF, XRD) được thể hiện ở Bảng 2 và Hình 2. Từ Bảng 2 cho thấy thành phần hóa học của BGS và của XM khác nhau khá lớn. BGS có hàm lượng $\text{Al}_2\text{O}_3 = 23,78\%$, $\text{SiO}_2 = 65,8\%$ cao hơn nhiều so với XM (tương ứng chỉ là 6,62% và 18,21%). Nhưng hàm lượng CaO trong BGS lại thấp hơn nhiều so với XM; SO_3 , K_2O có xuất hiện nhưng hàm lượng không đáng kể. Kết quả này phù hợp với đặc tính thành phần hóa của các nguyên liệu sản xuất, BGS được sản xuất từ nguyên liệu chính là đất sét có hàm lượng SiO_2 và Al_2O_3 cao, còn XM được sản xuất từ nguyên liệu chủ yếu là đá vôi có hàm lượng CaCO_3 cao. Hơn nữa tổng hàm lượng $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ trong XM chỉ là 28,38% trong khi BGS là 92,23% nên XM có hoạt tính thủy lực, còn BGS là PGK hoạt tính tiềm năng. Thậm chí BGS có thành phần hóa đạt yêu cầu làm vật liệu puzolan theo ASTM C618-19 [23]. Tuy nhiên do hàm lượng SiO_2 nhỏ hơn 85% nên không thuộc loại PGK hoạt tính cao theo TCVN 8827:2011 [24].

Bảng 2. Thành phần hóa học của XM và BGS

Vật liệu	Al_2O_3	SiO_2	SO_3	K_2O	CaO	Fe_2O_3	Khác
XM (%)	6,62	18,21	3,64	0,71	66,21	3,55	1,16
BGS (%)	23,78	65,80	-	3,29	2,51	2,56	1,97

Từ kết quả phân tích XRD cho thấy trong XM có 3 thành phần khoáng vật chính được xác định gồm 65,2% Alit ($3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$); 30,4% Canxi Alumino Ferit ($\text{AlCa}_2\text{FeO}_5$) và 4,4% đá thạch cao ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) còn trong BGS không xuất hiện các khoáng vật của XM (Hình 2). Điều này chứng tỏ BGS không có hoạt tính thủy lực như XM. Các khoáng chính của BGS bao gồm 36,3% thạch anh (SiO_2); 47,9% Mullite (Al_2SiO_4) và 7,9% Pseudo-Wollastonite ($\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$). Kết quả này phù hợp với nghiên cứu của Pitarch và cs. [17] do khoáng Mullite được tạo ra từ quá trình nung sứ ở nhiệt độ cao. Tuy nhiên do trong BGS vẫn còn thành phần SiO_2 nên nó có thể có chứa SiO_2 vô định hình và mang lại khả năng phản ứng puzolan nếu được sử dụng trong hỗn hợp CKD xi măng.



Hình 2. Kết quả phân tích XRD của XM so sánh với BGS

2.2. Cấp phối sử dụng

Dựa theo yêu cầu của các TCVN về PGK cho xi măng [1], bê tông và vữa [24], cũng như tham khảo một số nghiên cứu trước đây [15–17], các hàm lượng BGS thay thế XM được sử dụng là 10, 20, 30% khối lượng để đánh giá ảnh hưởng của hàm lượng BGS đến các tính chất của hỗn hợp CKD và CKD đã rắn chắc. Để xác định cường độ nén tiêu chuẩn và chỉ số hoạt tính cường độ, độ hút nước, độ hút nước mao quản khi sử dụng hàm lượng BGS khác nhau, các cấp phối vữa tiêu chuẩn đã được sử dụng theo TCVN 6016:2011 [22] (Bảng 3). Tỷ lệ nước/CKD được giữ cố định là 0,5 trong tất cả các hỗn hợp CKD và hỗn hợp vữa tiêu chuẩn có hoặc không có BGS.

Bảng 3. Thành phần cấp phối vữa tiêu chuẩn sử dụng XM và BGS ở các tỷ lệ khác nhau

STT	Kí hiệu cấp phối	BGS, g	XM, g	Cát tiêu chuẩn, g	Nước, g
1	XM	0	450	1350	225
2	10BGS	45	405	1350	225
3	20BGS	90	360	1350	225
4	30BGS	135	315	1350	225

2.3. Phương pháp nghiên cứu

Các phương pháp nghiên cứu tiêu chuẩn được sử dụng trong nghiên cứu bao gồm: xác định lượng nước tiêu chuẩn (N_{tc}) và thời gian đông kết của hỗn hợp CKD theo TCVN 6017:2015 [21]; kết quả thí nghiệm là giá trị trung bình của hai lần thí nghiệm. Cường độ nén và chỉ số hoạt tính cường độ của mẫu vữa tiêu chuẩn được xác định theo TCVN 6016:2011 [22] và TCVN 6882: 2016 [1]. Độ hút nước và độ hút nước mao quản của mẫu vữa tiêu chuẩn được xác định theo TCVN 3121-18:2022 [25]. Kết quả thí nghiệm là giá trị trung bình của ba mẫu vữa tiêu chuẩn kích thước $40 \times 40 \times 160$ mm. Chỉ số hoạt tính cường độ với xi măng poóc lăng tuổi 7 ngày hoặc 28 ngày (I_R) là tỷ số giữa độ bền nén của mẫu vữa xi măng Poóc lăng pha 20% PGK ở tuổi 7 ngày hoặc 28 ngày (R_B) và độ bền nén của mẫu xi măng Poóc lăng nền (không pha phụ gia) ở tuổi 7 ngày hoặc 28 ngày (R_A) tương ứng, tính bằng phần trăm (%), được xác định theo công thức (1):

$$I_R = \frac{R_B}{R_A} \times 100 \quad (1)$$

Các phương pháp nghiên cứu phi tiêu chuẩn như sau:

a. Phương pháp xác định độ nhớt

Nghiên cứu sử dụng máy đo độ nhớt DVNext Brookfield nhằm xác định độ nhớt và sự thay đổi độ nhớt của hỗn hợp hồ CKD theo thời gian. Máy đo độ nhớt Brookfield sử dụng là loại trục quay cánh khuấy. Nguyên tắc hoạt động của máy là đo lực xoắn cần thiết để quay một trục khuấy nhúng trong hỗn hợp hồ CKD. Trục khuấy (kiểu kim quay) được điều khiển bởi một động cơ thông qua một lò xo đã được hiệu chuẩn; độ lệch của lò xo được biểu thị qua lực xoắn và hiển thị trên màn hình kỹ thuật số. Giá trị ghi được bao gồm độ nhớt và giá trị lực xoắn sau mỗi lần thử cách nhau 30 phút, trong 180 phút kể từ khi cho nước vào hỗn hợp CKD.

b. Phương pháp phân tích nhiệt vi sai

Nghiên cứu này cũng sử dụng phương pháp phân tích nhiệt trọng lượng (Thermo Gravimetric-TG) và phân tích nhiệt vi sai (Differential Thermal Analysis-DTA) để nghiên cứu nhiệt chuyển pha, xác định hiệu ứng nhiệt, nhận biết các thành phần phản ứng trong mẫu CKD. Thiết bị TG-DTA 8122 Rigaku tại phòng thí nghiệm Dự án Satreps - Đại học Xây dựng Hà Nội đã được sử dụng. Các mẫu CKD được đúc và bảo dưỡng trong khuôn sau 1 ngày, sau đó tháo mẫu và bảo dưỡng trong nước tới các tuổi thí nghiệm 1, 3, 7, 28, 90 ngày. Các mẫu sau khi tới tuổi được dùng thủy hóa bằng phương pháp sấy 24 giờ ở nhiệt độ khoảng 70-80 °C, sau đó được nghiền mịn nhanh trong khoảng 30 phút bằng cối chày sứ và sàng qua sàng 0,075 mm để lấy khoảng 50-60 g lượng lọt sàng. Khối lượng của mỗi mẫu thử khoảng 20 đến 30 mg, tốc độ nâng nhiệt là 20 °C/phút từ nhiệt độ phòng khoảng 25 °C đến 1000 °C. Sự thay đổi về khối lượng của mẫu thử khi nhiệt độ nung tăng lên (% Δm) được xác định và thể hiện thông qua đường cong TG và DTG. Tại nhiệt độ xảy ra quá trình phân hủy portlandite ($\text{Ca(OH)}_2 - \text{CH}$) và phân hủy calcite (CaCO_3) đọc được giá trị lượng mất khối lượng và trên đường cong TG. Hàm lượng % CH trong mẫu nghiên cứu được xác định theo công thức (2), trong đó % Δm_1 là lượng mất khối lượng khi phân hủy portlandite trong khoảng nhiệt độ từ 400-600 °C; M_{CH} , $M_{\text{H}_2\text{O}}$ là khối lượng phân tử của CH và H_2O (kg/mol).

$$\% \text{CH} = \% \Delta m_1 \times \frac{M_{\text{CH}}}{M_{\text{H}_2\text{O}}} (\%) \quad (2)$$

Hàm lượng % CaCO_3 trong mẫu nghiên cứu được xác định theo công thức (3), trong đó % Δm_2 là lượng mất khối lượng khi phân hủy calcite trong khoảng nhiệt độ từ 600-800 °C; M_{CaCO_3} , M_{CO_2} là khối lượng phân tử của CaCO_3 và CO_2 (kg/mol).

$$\% \text{CaCO}_3 = \% \Delta m_2 \times \frac{M_{\text{CaCO}_3}}{M_{\text{CO}_2}} (\%) \quad (3)$$

c. Các phương pháp khác

Các mẫu XM, BGS cũng được xác định thành phần khoáng vật bằng phương pháp quang phổ nhiễu xạ tia X (XRD); thành phần hóa sử dụng phương pháp phân tích quang phổ huỳnh quang tia X (XRF) nhằm xác định hàm lượng phần trăm các oxit có mặt trong các mẫu XM, BGS. Phương pháp nhiễu xạ laser là phương pháp được sử dụng để phân tích kích thước hạt, cỡ hạt trong mẫu XM và BGS. Phương pháp này có thể xác định cỡ hạt và sự phân bố kích thước hạt của các hạt trong một dải kích thước rộng trong khoảng 11 nm - 5000 μm .

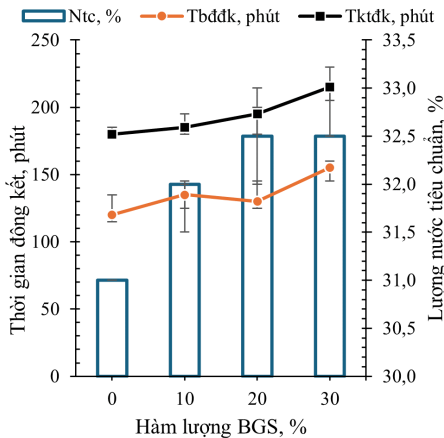
3. Kết quả và bàn luận

3.1. Ảnh hưởng của BGS đến tính chất của hỗn hợp CKD

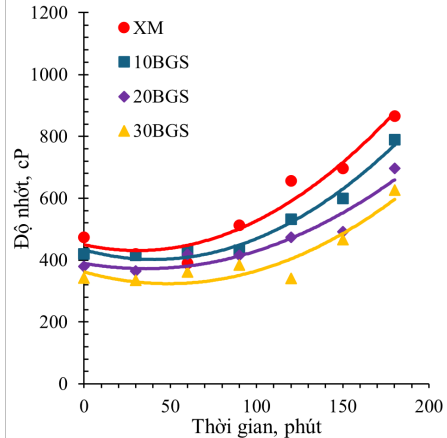
a. Lượng nước tiêu chuẩn và thời gian đông kết

Ảnh hưởng của hàm lượng BGS đến lượng nước tiêu chuẩn (N_{tc}), thời gian bắt đầu đông kết ($T_{bđđk}$) và thời gian kết thúc đông kết (T_{ktdk}) của hỗn hợp hồ XM và hồ CKD có BGS được thể hiện trên Hình 3. Kết quả thể hiện là giá trị trung bình của hai mẫu thí nghiệm. Từ Hình 3 cho thấy khi sử dụng BGS lượng nước tiêu chuẩn của hỗn hợp hồ XM tăng lên rõ rệt. Cụ thể, lượng nước tiêu chuẩn của XM là 31,0%; nhưng khi sử dụng 10, 20 và 30% BGS thay thế XM thì lượng nước tiêu chuẩn của hỗn hợp hồ CKD lần lượt là 32%-32,5% (tăng 3,2÷4,8%). Do các hạt gốm sứ có hình dạng góc cạnh [16, 26] và tỷ diện tích bề mặt cao hơn hạt clanhke XM (Bảng 1) đã làm tăng lượng nước cần thiết để bao bọc và bôi trơn dẫn tới lượng nước tiêu chuẩn tăng. Kết quả này mâu thuẫn với các nghiên cứu [17, 27]. Điều này có thể là do hạt BGS trong nghiên cứu này có kích thước thô ráp hơn so với hạt BGS sử dụng trong các nghiên cứu của Pitarch và Ferrara.

Đối với thời gian đông kết, cả thời gian bắt đầu đông kết và thời gian kết thúc đông kết của các hỗn hợp CKD đều có xu hướng tăng lên khi sử dụng BGS so với mẫu hồ xi măng (Hình 3). $T_{bđđk}$ và T_{ktdk} của XM chỉ là 120 phút và 180 phút, còn của hỗn hợp CKD sử dụng 10-30% BGS có $T_{bđđk}$ là 130-155 phút (tăng 8,3÷29,2%), T_{ktdk} là 185-215 phút (tăng 2,8÷19,4%). Điều này có thể do lượng XM giảm đã làm giảm tốc độ phản ứng thủy hóa và BGS đóng vai trò là chất trợ không thực hiện hydrat hóa trong quá trình đông kết của hỗn hợp CKD [15, 28].



Hình 3. Ảnh hưởng của BGS đến lượng nước tiêu chuẩn và thời gian đông kết của hồ CKD



Hình 4. Độ nhớt của hồ XM và CKD sử dụng 10%, 20%, 30% BGS theo thời gian

b. Độ nhớt

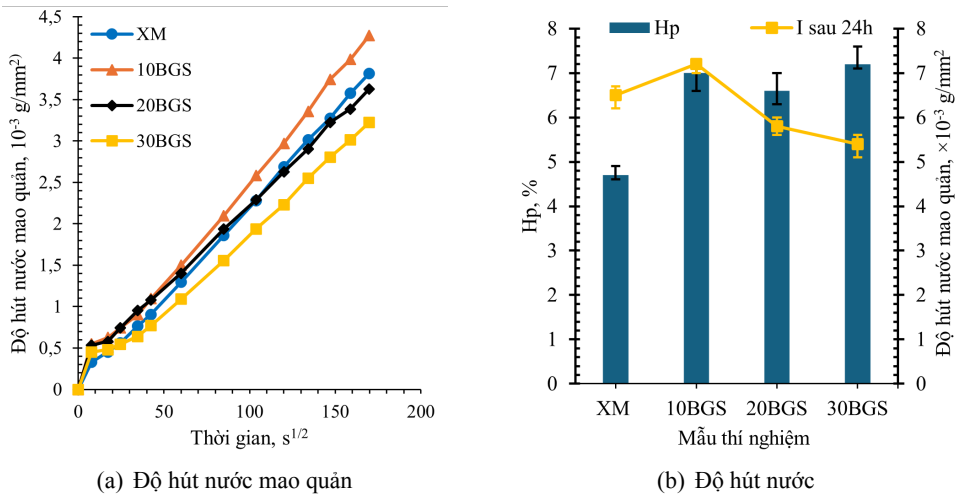
Sự ảnh hưởng của hàm lượng BGS đến độ nhớt hỗn hợp hồ CKD theo thời gian được thể hiện qua Hình 4. Kết quả thể hiện là giá trị trung bình của hai mẫu thí nghiệm. Có thể thấy rằng, độ nhớt của hồ CKD có BGS luôn thấp hơn độ nhớt của hồ XM ở tất cả các thời điểm đo. Độ nhớt của hồ XM và hồ CKD sử dụng 10%, 20%, 30% BGS ở thời điểm ban đầu lần lượt là 474 cP, 420 cP, 380 cP và 342 cP (thấp hơn 11,4-19,8%). Điều này chứng tỏ mặc dù hạt BGS có hình dạng góc cạnh nhưng bề mặt hạt có cấu trúc thủy tinh, lỗ rỗng ít lại làm giảm ứng suất cắt và độ nhớt của hỗn hợp hồ CKD có BGS [15, 17]. Tuy nhiên sự tăng độ nhớt của hồ XM cao hơn sự tăng độ nhớt của hỗn hợp hồ CKD có BGS theo thời gian. Ở thời điểm 180 phút, độ nhớt của hồ CKD sử dụng 10%, 20%, 30% BGS lần lượt thấp hơn 8,8%; 19,6% và 27,7% so với độ nhớt của hồ XM (866 cP) nhưng tăng tương ứng 2,22 lần và 1,67-1,84 lần so với độ nhớt của các hỗn hợp XM và CKD ở thời điểm 60 phút. Điều này do lượng xi măng trong CKD giảm đã làm cho tốc độ thủy hóa của hồ CKD có BGS giảm đáng kể và đặc tính thành phần hóa học của BGS có chứa các oxit gần như không phản ứng với nước nên sự tăng độ

nhớt theo thời gian của hỗn hợp hồ CKD có BGS thấp hơn so với của hồ XM [15]. Kết quả này cũng phù hợp với quy luật ảnh hưởng của BGS đến thời gian đông kết của hồ CKD.

3.2. Ảnh hưởng của BGS đến tính chất của CKD đã rắn chắc

a. Độ hút nước và độ hút nước mao quản

Kết quả độ hút nước theo khối lượng (H_p) và độ hút nước mao quản (I) của các mẫu vữa tiêu chuẩn có và không có BGS được thể hiện qua Hình 5 và Bảng 4. Kết quả thể hiện là giá trị trung bình của ba mẫu thí nghiệm.



Hình 5. Ảnh hưởng của BGS đến tính hút nước của mẫu vữa tiêu chuẩn ở tuổi 28 ngày

Bảng 4. Kết quả độ hút nước mao quản của các mẫu vữa tiêu chuẩn

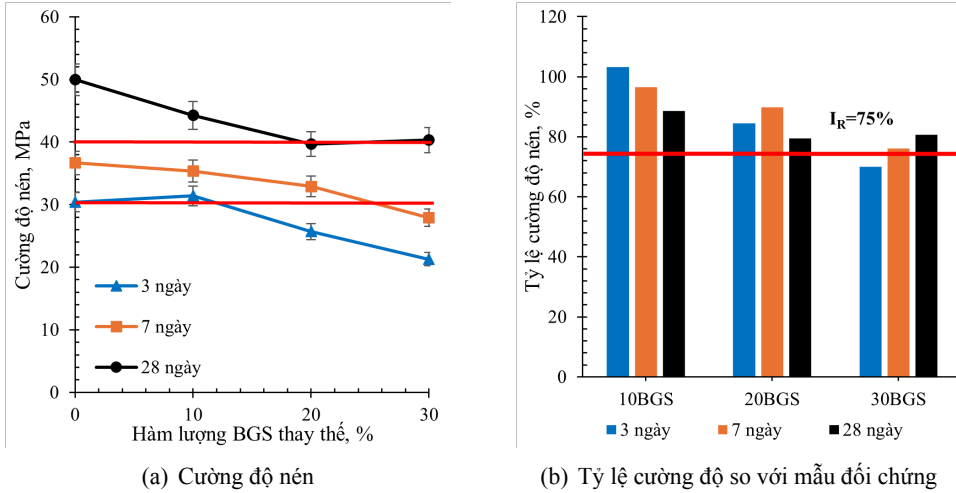
Mẫu vữa	Phương trình hồi quy	Sai số bình phương	Độ hút nước mao quản sau 24h ($\times 10^{-3} \text{ g/mm}^2$)
XM	$y = 0,0221 \sqrt{t} + 0,0322$	$R^2 = 0,9983$	6,5
10BGS	$y = 0,0239 \sqrt{t} + 0,1583$	$R^2 = 0,9960$	7,2
20BGS	$y = 0,0197 \sqrt{t} + 0,0271$	$R^2 = 0,9986$	5,8
30BGS	$y = 0,0181 \sqrt{t} + 0,1014$	$R^2 = 0,9930$	5,4

Độ hút nước của mẫu vữa tăng lên rõ rệt khi tăng tỷ lệ sử dụng BGS. Khi tăng hàm lượng BGS 10, 20, 30% thì độ hút nước của mẫu vữa tăng 48,9; 40,4; 53,2% tương ứng so với mẫu đối chứng chỉ sử dụng XM (4,7%). Điều này có thể do kích thước hạt BGS thô hơn hạt XM đã làm tăng tổng lỗ rỗng trong cấu trúc vữa (cả lỗ rỗng hở và lỗ rỗng mao quản). Tuy nhiên độ hút nước mao quản sau 24 giờ của mẫu vữa lại chỉ tăng 10,8% khi sử dụng 10% BGS, giảm lần lượt là 10,8% và 16,9% khi sử dụng 20% và 30% BGS. Tốc độ hút nước mao quản của các mẫu vữa còn được thể hiện qua hệ số góc của các phương trình hồi quy tuyến tính ở Bảng 4. Tốc độ hút nước mao quản của mẫu sử dụng 10% BGS là $0,0239 \times 10^{-3} \text{ g/mm}^2 \text{ s}^{1/2}$ (tăng 8,1%) so với mẫu đối chứng $0,0221 \times 10^{-3} \text{ g/mm}^2 \text{ s}^{1/2}$, nhưng của mẫu sử dụng 20% BGS và 30% BGS lại chỉ đạt $0,0197 \times 10^{-3} \text{ g/mm}^2 \text{ s}^{1/2}$ và $0,0181 \times 10^{-3} \text{ g/mm}^2 \text{ s}^{1/2}$ (giảm 10,9% và 18,1%). Việc giảm độ hút nước mao quản trong mẫu vữa sử dụng 20% và 30% BGS có thể do hiệu quả lấp đầy lỗ rỗng, hạn chế hệ thống lỗ rỗng hở thông nhau trong cấu trúc đá CKD và vữa đã rắn chắc của thành phần hạt mịn có kích thước nhỏ hơn hạt XM đã phát huy tác

dụng [29]. Vì vậy có thể kết luận rằng việc sử dụng hàm lượng BGS thích hợp sẽ cải thiện khả năng chống thấm nước của vữa. Hoạt tính puzolan và hiệu ứng điền đầy của BGS đã cải thiện hệ thống lỗ rỗng hờ và làm giảm khả năng hấp thụ nước của CKD xi măng.

b. Cường độ nén và hoạt tính cường độ

Cường độ nén theo thời gian bảo dưỡng ở tuổi 3, 7, 28 ngày của các mẫu vữa tiêu chuẩn sử dụng XM và hàm lượng BGS thay thế khác nhau được thể hiện qua Hình 6(a). Kết quả thể hiện là giá trị trung bình của ba mẫu thí nghiệm. Kết quả so sánh cường độ nén với mẫu đối chứng sử dụng 100% XM và chỉ số hoạt tính cường độ ở các tuổi bảo dưỡng được thể hiện trên Hình 6(b).



Hình 6. Ảnh hưởng của BGS đến cường độ nén ở tuổi 3, 7 và 28 ngày bảo dưỡng

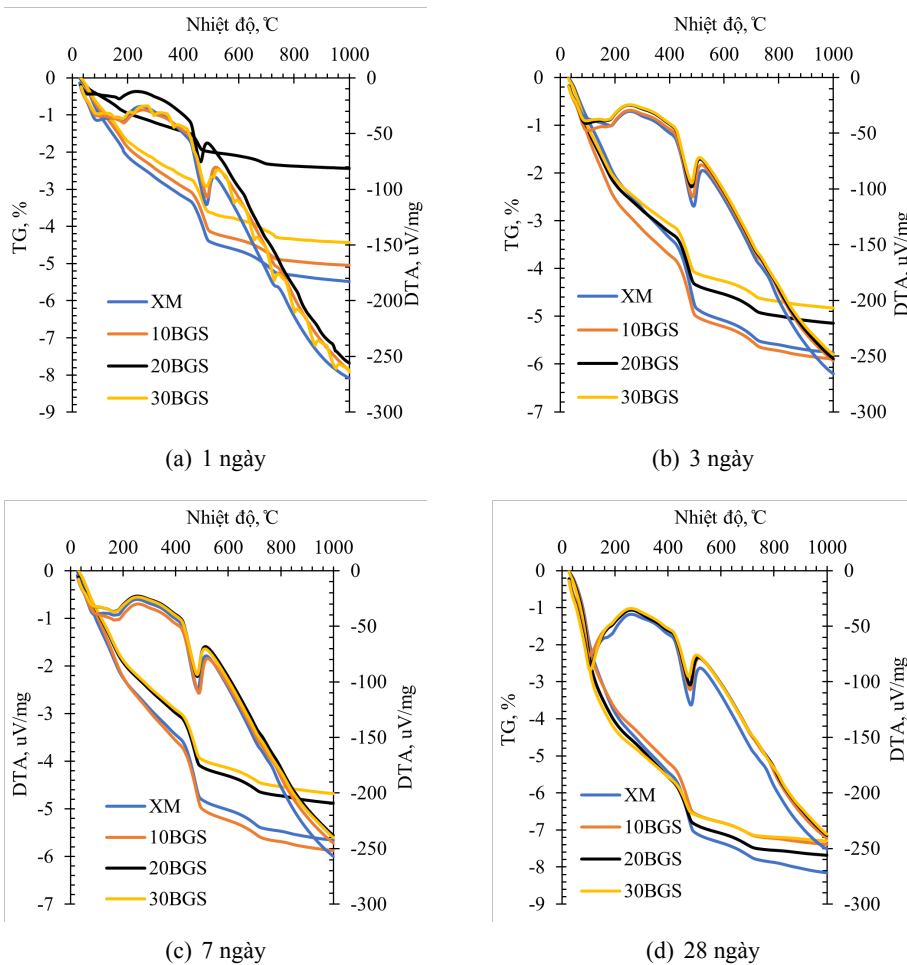
Rõ ràng cường độ nén của mẫu vữa có chứa BGS giảm dần khi tăng tỷ lệ BGS thay thế XM nhưng mức độ suy giảm tùy thuộc vào hàm lượng thay thế và thời gian bảo dưỡng (Hình 6(a)). Cường độ nén của mẫu vữa giảm 15,5% ÷ 30,0% ở tuổi 3 ngày; 3,5% ÷ 23,9% ở tuổi 7 ngày và 11,4 ÷ 19,3% ở tuổi 28 ngày. Điều này phù hợp với các kết quả nghiên cứu trước đó [28]. Nhưng mẫu vữa sử dụng 10% BGS ở tuổi 3 ngày có kết quả cường độ nén cao hơn 3,3% so với mẫu XM đối chứng. Một số nghiên cứu đã chỉ ra rằng do BGS có hoạt tính thấp hơn so với XM, dẫn đến lượng sản phẩm thủy hóa tạo ra ít hơn trong XM và làm giảm cường độ của mẫu vữa [17, 26, 28], ngoài ra BGS có kích thước hạt lớn hơn cũng có thể làm tăng độ rỗng xốp trong cấu trúc đá CKD [11] hoặc có độ hút nước cao [30] đã dẫn tới cường độ của mẫu vữa tiêu chuẩn giảm. Mức độ suy giảm cường độ nén cũng giảm dần theo thời gian bảo dưỡng do quá trình phản ứng puzolan giữa BGS với sản phẩm thủy hóa của XM ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) đã phát huy hiệu quả và thể hiện rõ rệt khi tăng thời gian bảo dưỡng [17, 26]. Hơn nữa, cường độ nén tiêu chuẩn của các mẫu vữa sử dụng 10, 20, 30% BGS lần lượt là 44,3; 39,9; 40,3 MPa đạt lớn hơn hoặc bằng 40 MPa nên chứng tỏ hoàn toàn có thể sử dụng tới 30% BGS mà vẫn chế tạo được CKD xi măng hỗn hợp đạt mức 40.

Khi tăng hàm lượng BGS thay thế, tỷ lệ cường độ nén của mẫu vữa có xu hướng giảm (Hình 6(b)). Mẫu vữa 10BGS cho kết quả tỷ lệ cường độ nén cao nhất ở tất cả các tuổi và đạt 103,3% ở tuổi 3 ngày; 96,5% ở tuổi 7 ngày; và 88,6% ở tuổi 28 ngày. Điều này chứng tỏ có thể sử dụng BGS làm PGK có hoạt tính cao cho vữa và bê tông do có hoạt tính cường độ ở tuổi 7 ngày $\geq 85\%$, mặc dù tỷ lệ cát trên CKD của mẫu vữa này là 3,0 và hàm lượng SiO_2 chỉ đạt 65,8% (Bảng 2) $< 85\%$ [24]. Cường độ ở tuổi sớm (3 ngày) của mẫu 10BGS đạt cao hơn mẫu đối chứng chỉ sử dụng XM có thể do sự có mặt của BGS đóng vai trò như phụ gia tạo mầm tinh thể đã thúc đẩy quá trình rắn chắc, làm tăng tốc độ phát

triển cường độ ở tuổi sớm [11]. Đối với mẫu vữa có 20% BGS thay thế XM, chỉ số hoạt tính cường độ ở tuổi 28 ngày đạt $79,5\% \geq 75\%$ (Hình 8(b)), thỏa mãn yêu cầu về chỉ số hoạt tính cường độ với xi măng của PGK hoạt tính dùng cho xi măng theo TCVN 6882:2016 [1]. Còn đối với mẫu vữa 30BGS có tỷ lệ cường độ nén so với mẫu đối chứng giảm mạnh, chỉ đạt lần lượt là 70,0%; 76,1%; 80,7% ở các tuổi bảo dưỡng 3, 7, 28 ngày. Điều này là do khi tỷ lệ thay thế lên tới 30%, lượng XM ít đi nhiều dẫn đến lượng sản phẩm thủy hóa giảm đáng kể và hiệu quả phản ứng puzolan không bù đắp lại được nên đã làm cho cường độ nén bị giảm mạnh [26].

c. Phân tích nhiệt vi sai TG-DTA

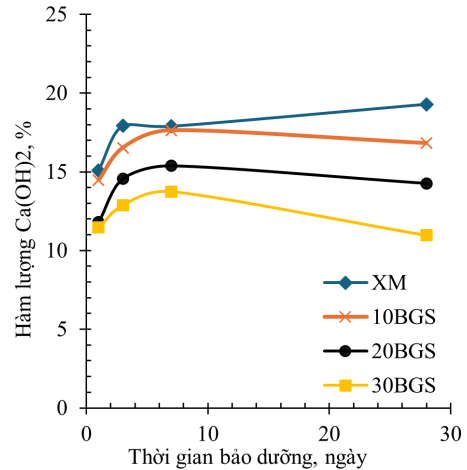
Biểu đồ phân tích nhiệt vi sai (Hình 7) có thể chỉ rõ các peak nhiệt (trên đường cong DTA) và sự suy giảm khối lượng (trên đường cong TG) của các mẫu CKD ở các tuổi bảo dưỡng 1, 3, 7, 28 ngày. Các khoảng nhiệt độ bao gồm: Peak 1 trong khoảng nhiệt độ từ 30-300 °C: chủ yếu xảy ra là quá trình mất nước tự do và nước hấp phụ của mẫu và các sản phẩm thủy hóa. Khoảng 30–105 °C: Nước bay hơi và một phần nước liên kết thoát ra ngoài. Nước bay hơi thường được loại bỏ hoàn toàn ở nhiệt độ 120 °C. Khoảng 120–180 °C: xảy ra quá trình phân hủy thạch cao (với phản ứng thu nhiệt kép), phân hủy ettringite và mất nước một phần từ carboaluminate. Khoảng 180–300 °C: mất nước liên kết từ sự phân giải C-S-H và sản phẩm thủy hóa carboaluminate. Peak 2 trong khoảng nhiệt độ từ 400-600 °C,



Hình 7. Biểu đồ phân tích TG-DTA của mẫu XM và CKD sử dụng BGS ở các tuổi bảo dưỡng

sản phẩm của quá trình thủy hóa XM là khoáng portlandite (CH) bị phân hủy $\text{Ca(OH)}_2 \xrightarrow{t^0} \text{CaO} + \text{H}_2\text{O} \uparrow$. Có thể thấy các mẫu đá CKD sử dụng BGS có phần trăm mất khối lượng (Δm) thấp hơn so với XM, đồng thời giảm dần khi tăng hàm lượng BGS thay thế. Peak 3 trong khoảng nhiệt độ từ 600-800 °C, calcite bị phân giải $\text{CaCO}_3 \xrightarrow{t^0} \text{CaO} + \text{CO}_2 \uparrow$.

Căn cứ vào lượng mất khối lượng $\% \Delta m$ tại quá trình phân giải portlandite và phân giải calcite, nhóm nghiên cứu xác định được hàm lượng Ca(OH)_2 và CaCO_3 trong mẫu đá chất kết dính ở các tuổi bảo dưỡng, kết quả cụ thể được thể hiện trong Hình 8 và Bảng 5. Qua Hình 8 ta thấy hàm lượng CH trong các mẫu đá CKD sử dụng BGS thay thế xi măng đều thấp hơn 5-40% hàm lượng CH trong mẫu đối chứng sử dụng 100% XM. Hàm lượng portlandite giảm dần khi tăng hàm lượng BGS thay thế và tăng tuổi bảo dưỡng. Ở tuổi 28 ngày, đá CKD sử dụng 30% BGS có hàm lượng CH thấp nhất, giảm 43% so với đá XM. Điều này chứng tỏ hàm lượng SiO_2 vô định hình có trong BGS đã thực hiện phản ứng puzolanic với sản phẩm thủy hóa CH của xi măng, từ đó làm giảm hàm lượng CH trong đá chất kết dính [26].



Hình 8. Ảnh hưởng của BGS đến hàm lượng Ca(OH)_2 quy đổi trong các mẫu CKD

Bảng 5. Hàm lượng CaCO_3 quy đổi trong mẫu CKD ở các tuổi bảo dưỡng

Mẫu	Hàm lượng CaCO_3 quy đổi trong đá CKD ở các tuổi bảo dưỡng, %			
	1 ngày	3 ngày	7 ngày	28 ngày
XM	2,8	0,7	-	-
10BGS	3,5	1,5	-	-
20BGS	9,6	3,4	3,1	-
30BGS	3,0	2,8	2,7	-

Kết quả từ Bảng 5 cho thấy các mẫu đá XM và đá CKD sử dụng BGS đều có hàm lượng CaCO_3 ở tuổi 1 và 3 ngày lớn hơn hàm lượng CaCO_3 trong mẫu đối chứng. Ở tuổi 7 ngày, mẫu đá XM và đá CKD sử dụng 10% BGS không còn khoáng calcite. Tất cả các mẫu ở tuổi 28 ngày không còn ghi nhận sự xuất hiện khoáng CaCO_3 . Vì vậy, hàm lượng canxit ở tất cả các mẫu giảm dần theo thời gian và gần như không xuất hiện khi mẫu bảo dưỡng sau 7 ngày. Do cấu trúc rỗng của mẫu và quá trình bảo dưỡng mẫu đá CKD nên một lượng CO_2 trong không khí đã thực hiện quá trình cacbonat hóa. Nhưng quá trình thủy hóa và silicat hóa (phản ứng puzolan) trong mẫu CKD ngày càng tăng theo thời gian bảo dưỡng đã làm tăng độ đặc chắc vi cấu trúc của bề mặt mẫu [14], dẫn tới quá trình cacbonat hóa (hàm lượng CaCO_3) giảm dần theo thời gian bảo dưỡng; các mẫu có BGS thì quá trình cacbonat hóa mạnh hơn.

4. Kết luận

Từ các kết quả nghiên cứu có thể rút ra một số kết luận như sau:

Hoàn toàn có thể sử dụng phế thải gồm sứ nghiền mịn làm phụ gia khoáng hoạt tính cho xi măng với độ mịn và chỉ số hoạt tính cường độ đạt yêu cầu theo TCVN 6882:2016.

Do bột gốm sứ có tỷ diện tích bề mặt lớn và hình dạng góc cạnh, nhưng bề mặt trơn nhẵn và trợ về hóa học nên làm tăng nhẹ lượng nước tiêu chuẩn; giảm độ nhớt; kéo dài thời gian đông kết (thời gian bắt đầu đông kết tăng 8,3%-29,2% và thời gian kết thúc đông kết tăng 2,8%-19,4%) của chất kết dính xi măng Poóc lăng hỗn hợp.

Cường độ nén của mẫu vừa tiêu chuẩn có bột gốm sứ giảm dần khi tăng tỷ lệ thay thế xi măng nhưng mức độ giảm tùy thuộc vào sản lượng các sản phẩm thủy hóa CSH tạo ra. Cụ thể, cường độ nén ở 7 ngày của mẫu vừa sử dụng bột gốm sứ giảm 3,5%-23,9% còn ở tuổi 28 ngày giảm 11,4%-19,3% tương ứng với các tỷ lệ thay thế là 10-30%. Tuy nhiên ở tuổi sớm (3 ngày), mẫu sử dụng 10% bột gốm sứ có cường độ cao hơn mẫu đối chứng có thể là do bột gốm sứ đã thúc đẩy phản ứng tạo mầm tinh thể, làm tăng tốc độ phát triển cường độ.

Độ hút nước của mẫu vừa tiêu chuẩn tăng 40,4-53,2% và khi sử dụng 10-30% bột gốm sứ thay thế xi măng. Độ hút mao quản sau 24 giờ tăng 10,8% ở tỷ lệ thay thế 10%; nhưng lại giảm 10,8-16,9% khi tỷ lệ bột gốm sứ thay thế 20-30%. Điều này có thể do thành phần hạt mịn trong bột gốm sứ đã phát huy tác dụng cải thiện độ đặc trong cấu trúc đá xi măng và mẫu vừa.

Hàm lượng khoáng portlandite hình thành trong mẫu đá chất kết dính giảm dần khi tăng hàm lượng bột gốm sứ thay thế xi măng và tăng thời gian bảo dưỡng. Nhưng ngược lại hàm lượng khoáng cacbonat lại tăng theo hàm lượng bột gốm sứ thay thế và giảm theo thời gian bảo dưỡng mẫu chất kết dính xi măng.

Nghiên cứu này đã tập trung đánh giá ảnh hưởng của bột gốm sứ đến các tính chất của hỗn hợp hồ chất kết dính và chất kết dính rắn chắc ở tuổi 3 đến 28 ngày, cần tiếp tục nghiên cứu các tính chất này ở tuổi dài ngày và sự ảnh hưởng của độ mịn bột gốm sứ đến các tính chất khác của hỗn hợp chất kết dính và bê tông.

Lời cảm ơn

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Trường Đại học Xây Dựng Hà Nội (HUCE) trong đề tài mã số 21-2024/KHXD-TĐ; Tác giả trân trọng cảm ơn dự án SATREPS JPMJSA1701 đã hỗ trợ các thiết bị sử dụng trong quá trình nghiên cứu.

Tài liệu tham khảo

- [1] TCVN 6882:2016. *Phụ gia khoáng cho xi măng*. Bộ Khoa học và Công nghệ, Việt Nam.
- [2] Nwankwo, C. O., Bamigboye, G. O., Davies, I. E. E., Michaels, T. A. (2020). [High volume Portland cement replacement: A review](#). *Construction and Building Materials*, 260:120445.
- [3] Worrell, E., Price, L., Martin, N., Hendriks, C., Meida, L. O. (2001). [Carbon dioxide emission from the global cement industry](#). *Annual Review of Energy and the Environment*, 26(1):303–329.
- [4] Kien, T. T., Thanh, L. T., Lu, P. V. (2013). Recycling construction demolition waste in the world and in Vietnam. *The International Conference on Sustainable Built Environment for Now and the Future*. Hanoi, 26:247–256.
- [5] Hoang, N. H., Ishigaki, T., Kubota, R., Tong, T. K., Nguyen, T. T., Nguyen, H. G., Yamada, M., Kawamoto, K. (2020). [Waste generation, composition, and handling in building-related construction and demolition in Hanoi, Vietnam](#). *Waste Management*, 117:32–41.
- [6] Bộ Xây dựng (2017). *Thông tư số 08/2017/TT-BXD Quy định về quản lý chất thải rắn xây dựng*.
- [7] Agrela, F., Barbudo, A., Ramírez, A., Ayuso, J., Carvajal, M. D., Jiménez, J. R. (2012). [Construction of road sections using mixed recycled aggregates treated with cement in Malaga, Spain](#). *Resources, Conservation and Recycling*, 58:98–106.
- [8] Iqbal, M. R. (2020). [Compaction characteristics and CBR of sludge blended with recycled clay bricks for road subgrade application](#). *International Journal of GEOMATE*, 19(75).
- [9] Medina, C., Sánchez de Rojas, M. I., Thomas, C., Polanco, J. A., Frías, M. (2016). [Durability of recycled concrete made with recycled ceramic sanitary ware aggregate. Inter-indicator relationships](#). *Construction and Building Materials*, 105:480–486.

- [10] Kiên, T. T., Phát, N. M., Hanh, P. H., Sáng, L. V. (2017). [Nghiên cứu chế tạo gạch không nung và vữa từ phế thải công nghiệp phục vụ phát triển bền vững](#). *Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng*, 32:3–10.
- [11] Kim, J., Nciri, N., Sicakova, A., Kim, N. (2023). [Characteristics of waste concrete powders from multi-recycled coarse aggregate concrete and their effects as cement replacements](#). *Construction and Building Materials*, 398:132525.
- [12] Halicka, A., Ogrodnik, P., Zegardlo, B. (2013). [Using ceramic sanitary ware waste as concrete aggregate](#). *Construction and Building Materials*, 48:295–305.
- [13] Vieira, T., Alves, A., de Brito, J., Correia, J. R., Silva, R. V. (2016). [Durability-related performance of concrete containing fine recycled aggregates from crushed bricks and sanitary ware](#). *Materials & Design*, 90:767–776.
- [14] Pacheco-Torgal, F., Jalali, S. (2010). [Reusing ceramic wastes in concrete](#). *Construction and Building Materials*, 24(5):832–838.
- [15] Medina, C., Banfill, P. F. G., Sánchez de Rojas, M. I., Frías, M. (2013). [Rheological and calorimetric behaviour of cements blended with containing ceramic sanitary ware and construction/demolition waste](#). *Construction and Building Materials*, 40:822–831.
- [16] Reig, L., Borrachero, M. V., Monzó, J. M., Savastano, H., Tashima, M. M., Payá, J. (2015). [Use of ceramic sanitaryware as an alternative for the development of new sustainable binders](#). *Key Engineering Materials*, 668:172–180.
- [17] Pitarch, A. M., Reig, L., Tomás, A. E., Forcada, G., Soriano, L., Borrachero, M. V., Payá, J., Monzó, J. M. (2021). [Pozzolanic activity of tiles, bricks and ceramic sanitary-ware in eco-friendly Portland blended cements](#). *Journal of Cleaner Production*, 279:123713.
- [18] TCVN 2682:2020. *Xi măng poóc lăng*. Bộ Khoa học và Công nghệ, Việt Nam.
- [19] TCVN 6227:1996. *Cát tiêu chuẩn ISO để xác định cường độ của xi măng*. Bộ Khoa học và Công nghệ, Việt Nam.
- [20] TCVN 13605:2023. *Xi măng - Phương pháp xác định độ mịn*. Bộ Khoa học và Công nghệ, Việt Nam.
- [21] TCVN 6017:2015. *Xi măng - Phương pháp xác định thời gian động kết và độ ổn định thể tích*. Bộ Khoa học và Công nghệ, Việt Nam.
- [22] TCVN 6016:2011. *Xi măng - Phương pháp thử - Xác định cường độ*. Bộ Khoa học và Công nghệ, Việt Nam.
- [23] ASTM C618-19 (2019). *Standard specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use in concrete*. ASTM International, West Conshohocken, PA.
- [24] TCVN 8827:2011. *Phụ gia khoáng hoạt tính cao dùng cho bê tông và vữa-Silicafume và tro trấu nghiền mịn*. Bộ Khoa học và Công nghệ, Việt Nam.
- [25] TCVN 3121-18:2022. *Vữa xây dựng - Phần 18: Xác định hệ số hút nước do mao dẫn của vữa đông rắn*. Bộ Khoa học và Công nghệ, Việt Nam.
- [26] Reig, L., Soriano, L., Borrachero, M. V., Monzó, J. M., Payá, J. (2022). [Potential use of ceramic sanitary ware waste as pozzolanic material](#). *Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*, 61(6):611–621.
- [27] Ferrara, L., Deegan, P., Pattarini, A., Sonebi, M., Taylor, S. (2019). [Recycling ceramic waste powder: effects its grain-size distribution on fresh and hardened properties of cement pastes/mortars formulated from SCC mixes](#). *Journal of Sustainable Cement-Based Materials*, 8(3):145–160.
- [28] Zhang, H., Zhang, C., He, B., Yi, S., Tang, L. (2023). [Recycling fine powder collected from construction and demolition wastes as partial alternatives to cement: A comprehensive analysis on effects, mechanism, cost and CO2 emission](#). *Journal of Building Engineering*, 71:106507.
- [29] Ma, Z., Tang, Q., Wu, H., Xu, J., Liang, C. (2020). [Mechanical properties and water absorption of cement composites with various fineness and contents of waste brick powder from C&D waste](#). *Cement and Concrete Composites*, 114:103758.
- [30] Ho, H.-J., Iizuka, A., Shibata, E. (2021). [Chemical recycling and use of various types of concrete waste: A review](#). *Journal of Cleaner Production*, 284:124785.