

ẢNH HƯỞNG CỦA SA MỐT VÀ SILICAFUME ĐẾN TÍNH CHẤT CỦA CHẤT KẾT DÍNH HỖN HỢP CHỨA XI MĂNG ALUMIN Ở NHIỆT ĐỘ CAO

Hoàng Vĩnh Long^{a,*}, Nguyễn Đức Toàn^b, Nguyễn Quang Minh^b, Đàm Đức Sơn^a, Đoàn Đình Huy^a

^aKhoa Vật liệu xây dựng, Trường Đại học Xây dựng Hà Nội,
số 55 đường Giải Phóng, phường Bạch Mai, Hà Nội, Việt Nam

^bCông ty Cổ phần Tư vấn khoa học công nghệ và kiểm định xây dựng,
Nhà N3, phòng 3, tập thể Đại học Xây dựng, phường Bạch Mai, Hà Nội, Việt Nam

Nhận ngày 19/5/2026, Sửa xong 13/8/2026, Chấp nhận đăng 13/8/2026

Tóm tắt

Nghiên cứu này đánh giá ảnh hưởng của sa mốt nghiền mịn và silica fume đến tính chất của chất kết dính hỗn hợp chứa xi măng alumin trong điều kiện nhiệt độ cao. Tổng hàm lượng phụ gia thay thế từ 30–70% khối lượng chất kết dính, trong đó silica fume được sử dụng với hàm lượng cố định 5%. Các tính chất của hỗn hợp và đá chất kết dính được xác định gồm lượng nước tiêu chuẩn, thời gian đông kết, khối lượng thể tích, độ co ngót và cường độ chịu nén ở các chế độ: dưỡng hộ, sấy ở 100 °C và nung ở 800 °C, 1000 °C. Kết quả cho thấy việc sử dụng sa mốt nghiền mịn và silica fume làm giảm lượng nước tiêu chuẩn và cải thiện tính ổn định nhiệt của vật liệu. Khi chịu nhiệt độ cao, các mẫu có tổng hàm lượng phụ gia 50–70% thể hiện khả năng phục hồi và phát triển cường độ chịu nén. Ngược lại, mẫu đối chứng sử dụng 100% xi măng alumin bị suy giảm cường độ. Đặc biệt, cấp phối chứa 65% sa mốt nghiền mịn và 5% silica fume có cường độ chịu nén tăng khoảng 75,75% sau khi nung ở 1000 °C so với mẫu sau sấy.

Từ khoá: xi măng alumin; sa mốt; silica fume; chất kết dính chịu nhiệt; biến đổi cường độ.

INFLUENCE OF CHAMOTTE AND SILICA FUME ON THE PROPERTIES OF CALCIUM ALUMINATE CEMENT-BASED BLENDED BINDERS AT ELEVATED TEMPERATURES

Abstract

This study evaluates the effects of finely ground chamotte and silica fume on the properties of blended binders containing calcium aluminate cement under high-temperature conditions. The total amount of supplementary materials ranged from 30–70% (wt.), with silica fume at a fixed content of 5%. The properties of the fresh and hardened binders, including normal consistency, setting time, bulk density, shrinkage, and compressive strength after curing, drying at 100 °C, and firing at 800 °C and 1000 °C, were investigated. The results show that the use of finely ground chamotte and silica fume reduced the standard water requirement and improved the material's thermal stability. Under high-temperature exposure, specimens containing 50–70% total supplementary materials exhibited recovery and an increase in compressive strength. In contrast, the control sample made with 100% calcium aluminate cement showed a reduction in strength. In particular, the mixture containing 65% finely ground chamotte and 5% silica fume achieved an approximately 75.75% increase in compressive strength after firing at 1000 °C compared with the dried specimen.

Keywords: calcium aluminate cement; chamotte; silica fume; heat-resistant binder; strength degradation.

© 2026 Trường Đại học Xây dựng Hà Nội (ĐHXDHN)

1. Giới thiệu

Ngành luyện kim là lĩnh vực tiêu thụ vật liệu chịu lửa lớn nhất, chiếm khoảng 60% tổng nhu cầu. Theo quy hoạch, sản lượng phôi thép Việt Nam dự kiến đạt 52 triệu tấn vào năm 2035. Đồng thời, yêu cầu bảo đảm an toàn cháy cho công trình dân dụng và công nghiệp ngày càng cấp thiết. Theo QCVN 06:2022/BXD và sửa đổi 1:2023 [1], các giải pháp chống cháy cần đáp ứng cấp chịu lửa REI, bảo đảm khả năng chịu lực, tính toàn vẹn và cách nhiệt của kết cấu.

*Tác giả đại diện. Địa chỉ e-mail: longhv@huce.edu.vn (Long, H. V.)

Bê tông và vữa chịu nhiệt, chịu lửa là những vật liệu được sử dụng rộng rãi trong các môi trường làm việc ở nhiệt độ cao và trong các giải pháp bảo vệ kết cấu chống cháy. Các vật liệu này thường sử dụng chất kết dính vô cơ hỗn hợp như xi măng alumin, xi măng Poóc lăng, chất kết dính geopolymer trên cơ sở $\text{SiO}_2\text{--Al}_2\text{O}_3$, kết hợp với các phụ gia khoáng đã qua nhiệt như tro bay, silicafume, sa mốt... Vì vậy, nghiên cứu chất kết dính chịu nhiệt có ý nghĩa quan trọng, tạo cơ sở phát triển bê tông và vữa chịu nhiệt, chịu lửa có tính năng phù hợp, đáp ứng nhu cầu của ngành luyện kim, các ngành công nghiệp nhiệt độ cao và lĩnh vực xây dựng tại Việt Nam.

Xi măng alumin (Calcium Aluminate Cement - CAC) được sử dụng rộng rãi làm chất kết dính trong vật liệu chịu lửa nhờ khả năng phát triển cường độ sớm và độ ổn định nhiệt cao. Thành phần khoáng chủ yếu của CAC gồm các pha canxi aluminat như CA ($\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$), CA_2 ($\text{CaO} \cdot 2 \text{Al}_2\text{O}_3$) và C_{12}A_7 , trong đó CA là pha hoạt tính chính quyết định quá trình thủy hóa và phát triển cường độ. Khác với xi măng poóc lăng, hệ CAC thể hiện cơ chế đóng rắn đặc thù thông qua quá trình thủy hóa tạo thành các hydrat aluminat canxi. Ở điều kiện nhiệt độ thường, các sản phẩm hydrat chủ yếu bao gồm CAH_{10} và C_2AH_8 . Các pha này không bền về mặt nhiệt động và có xu hướng chuyển hóa dần thành pha ổn định hơn là C_3AH_6 và gel $\text{Al}(\text{OH})_3$ (AH_3) [2–5]. Quá trình chuyển hóa này có ảnh hưởng quan trọng đến cấu trúc vi mô và độ bền cơ học của vật liệu.

Trong lĩnh vực vật liệu chịu nhiệt, CAC được sử dụng làm chất kết dính cho bê tông và vữa chịu lửa. Các vật liệu này không chỉ cần đạt cường độ ban đầu cao mà còn phải duy trì độ ổn định cơ học và thể tích khi làm việc ở nhiệt độ từ 300°C đến trên 1000°C . Sự suy giảm cường độ trong vùng nhiệt độ trung gian (khoảng $300\text{--}800^\circ\text{C}$) vẫn là một trong những hạn chế lớn của hệ chất kết dính CAC. Hiện tượng này chủ yếu liên quan đến quá trình mất nước của các pha hydrat và sự thay đổi cấu trúc vi mô [6, 7]. Tuy nhiên, khi nhiệt độ vượt quá khoảng $800\text{--}1000^\circ\text{C}$, vật liệu bắt đầu trải qua quá trình thiêu kết và hình thành liên kết gốm (ceramic bonding). Các pha tinh thể ổn định nhiệt như CA_2 , CA_6 ($\text{CaO} \cdot 6 \text{Al}_2\text{O}_3$) và mullite ($3 \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2 \text{SiO}_2$) có thể được hình thành, góp phần cải thiện hoặc phục hồi cường độ của vật liệu. Điều này cho thấy cơ chế liên kết của hệ CAC chuyển dần từ liên kết thủy hóa sang liên kết gốm khi nhiệt độ tăng cao.

Nhiều nghiên cứu gần đây cho thấy rằng sự thay đổi cường độ không chỉ phụ thuộc vào thành phần pha mà còn chịu ảnh hưởng mạnh của cấu trúc vi mô, như: độ đặc chắc, phân bố kích thước lỗ rỗng và cơ chế phát triển vi nứt. Do đó, việc kiểm soát cấu trúc vi mô đóng vai trò quan trọng trong việc cải thiện tính năng của vật liệu chịu nhiệt. Silica fume là phụ gia khoáng hoạt tính cao thường được sử dụng để cải thiện tính chất cơ học và độ bền nhiệt của các hệ chất kết dính chịu nhiệt. Nhờ kích thước hạt siêu mịn và hàm lượng SiO_2 vô định hình cao, silica fume giúp cải thiện độ đặc chắc của hệ thông qua hiệu ứng lấp đầy và tinh chỉnh cấu trúc lỗ rỗng [7–9]. Ngoài ra, silica fume còn thúc đẩy sự hình thành các pha aluminosilicat ổn định nhiệt, góp phần cải thiện tính ổn định nhiệt và cường độ sau nung của vật liệu [8, 9].

Trong các hệ chất kết dính CAC, sa mốt đóng vai trò như bộ khung chịu nhiệt, giúp duy trì hình dạng và hạn chế biến dạng của vật liệu khi làm việc ở nhiệt độ cao. Nhờ được nung trước, sa mốt có cấu trúc ổn định, ít bị biến đổi pha và có hệ số giãn nở nhiệt thấp, từ đó góp phần cải thiện khả năng chịu sốc nhiệt [10]. Ngoài vai trò là chất điền đầy, sa mốt nghiền mịn còn góp phần cải thiện cấu trúc vi mô, phân tán ứng suất nhiệt và hạn chế sự phát triển vi nứt trong vật liệu [11, 12].

Mặc dù vai trò riêng lẻ của silica fume và sa mốt trong hệ CAC đã được đề cập trong các công bố trước, ảnh hưởng kết hợp của sa mốt nghiền mịn và silica fume đến tính chất của chất kết dính chứa CAC ở các mức thay thế lớn, đặc biệt sau gia nhiệt đến 800°C và 1000°C , vẫn chưa được làm rõ đầy đủ. Hơn nữa, mối quan hệ giữa biến đổi khối lượng thể tích, độ co ngót và cường độ nén của hệ chất kết dính này sau nung cần được nghiên cứu thêm.

Trên cơ sở đó, nghiên cứu này đánh giá ảnh hưởng đồng thời của sa mốt nghiền mịn và silica fume, với tổng hàm lượng thay thế CAC từ 30–70% khối lượng chất kết dính, đến lượng nước tiêu chuẩn, thời gian đông kết, khối lượng thể tích, độ co ngót và cường độ nén sau bảo dưỡng, sấy ở 100 °C và nung ở 800 °C, 1000 °C. Kết quả nghiên cứu góp phần làm rõ xu hướng phát triển tính chất cơ lý của hệ chất kết dính CAC–SA–SF và cung cấp cơ sở lựa chọn thành phần cho bê tông, vữa chịu nhiệt và chịu lửa.

2. Nguyên vật liệu và phương pháp nghiên cứu

2.1. Nguyên vật liệu

a. Xi măng alumin (CAC)

Xi măng được sử dụng trong nghiên cứu là AC50 có nguồn gốc từ Trung Quốc, đáp ứng được các yêu cầu kỹ thuật theo TCVN 7569:2022 [13]. Các tính chất cơ lý và thành phần hóa của xi măng được trình bày trong Bảng 1.

Bảng 1. Các tính chất cơ lý của xi măng AC50

STT	Chỉ tiêu	Kết quả	Yêu cầu	Phương pháp thử
1	Khối lượng riêng, g/cm ³	3,1	-	TCVN 13605:2023 [14]
2	Lượng sót sàng 45 µm, %	15	≤ 20	TCVN 13605:2023 [14]
3	Bề mặt riêng (Blaine), cm ² /g	3200	≥ 3000	TCVN 13605:2023 [14]
4	Lượng nước tiêu chuẩn, %	34	-	TCVN 6017:2015 [15]
5	Thời gian đông kết			TCVN 6017:2015 [15]
	- Bắt đầu (phút)	95	≥ 30	
	- Kết thúc (giờ)	2	≤ 6	
6	Cường độ chịu nén, MPa			TCVN 6016:2011 [16]
	- 6 giờ	21	≥ 20	
	- 1 ngày	42	≥ 40	
	- 3 ngày	51	≥ 50	

b. Sa mốt nghiền mịn (SA)

Sa mốt được lấy từ nhà máy Vật liệu chịu lửa Cầu Đuống, sau đó được nghiền mịn và kiểm tra lượng sót trên sàng 0,09 mm. Thành phần hóa và tính chất của SA được trình bày trong Bảng 2 và Bảng 3.

Bảng 2. Tính chất của sa mốt nghiền mịn

STT	Tên chỉ tiêu	Đơn vị	Kết quả	Phương pháp thử
1	Khối lượng riêng	g/cm ³	2,6	TCVN 13605:2023 [14]
2	Khối lượng thể tích xốp	kg/m ³	1500	TCVN 7572-6:2006 [17]
3	Sót sàng 0,09 mm	%	1,8	TCVN 13605:2023 [14]

Bảng 3. Thành phần hóa của sa mốt nghiền mịn

Oxit	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	SO ₃	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅
Hàm lượng, %	61,62	5,45	25,35	2,96	0,23	2,35	1,51	0,12

c. Silica fume (SF)

Silica fume dạng hạt rời của hãng Sika được dùng trong nghiên cứu, có các tính chất cơ lý của Silicafume được trình bày trong Bảng 4, đáp ứng yêu cầu kỹ thuật theo TCVN 8827:2011 [18]. Thành phần hoá của silicafume được thể hiện trong Bảng 5.

Bảng 4. Tính chất cơ lý của silicafume

Chỉ tiêu thí nghiệm	Đơn vị	Kết quả	Yêu cầu	Phương pháp thử
Khối lượng riêng	g/cm ³	2,06	-	TCVN 13605:2023 [14]
Khối lượng thể tích xốp	kg/m ³	633	-	TCVN 7572-6:2006 [17]
Độ mịn sàng 45 µm	%	0	≤ 5	TCVN 8827:2011 [18]
Chỉ số hoạt tính cường độ	%	115	≥ 85	TCVN 8827:2011 [18]
Độ ẩm	%	0	-	TCVN 7572-7:2006 [19]

Bảng 5. Thành phần hoá của silicafume

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃	MKN
92,1	0,96	1,92	0,34	0,86	0,38	1,21	0,3	1,7

d. Nước

Nước trộn dùng trong nghiên cứu là nước máy sinh hoạt của thành phố Hà Nội. Nước trộn thỏa mãn yêu cầu theo tiêu chuẩn TCVN 4506:2012 [20].

2.2. Phương pháp nghiên cứu

a. Thành phần chất kết dính hỗn hợp (CKD)

Các hệ chất kết dính hỗn hợp được chế tạo từ CAC kết hợp với SA và SF. Tổng hàm lượng phụ gia thay thế CAC dao động từ 30–70% theo khối lượng chất kết dính. Theo các nghiên cứu trước đây, hàm lượng SF thích hợp cho hệ chất kết dính chịu nhiệt sử dụng CAC thường nằm trong khoảng 5–8% khối lượng chất kết dính [12, 21]. Trong nghiên cứu này, hàm lượng 5% được lựa chọn nhằm cải thiện độ đặc chắc vi cấu trúc và khả năng chịu nhiệt của vật liệu. Thành phần và ký hiệu của từng cấp phối CKD được trình bày trong Bảng 6.

Bảng 6. Thành phần và ký hiệu của các cấp phối chất kết dính

STT	Ký hiệu cấp phối	Thành phần chất kết dính		
		Xi măng alumin	Sa mốt	Silicafume
1	CAC	100	0	0
2	Sa30	70	30	0
3	Sa40	60	40	0
4	Sa50	50	50	0
5	Sa60	40	60	0
6	Sa70	30	70	0
7	Sa25Sf5	70	25	5
8	Sa35Sf5	60	35	5
9	Sa45Sf5	50	45	5
10	Sa55Sf5	40	55	5
11	Sa65Sf5	30	65	5

b. Phương pháp chế tạo và bảo dưỡng mẫu CKD

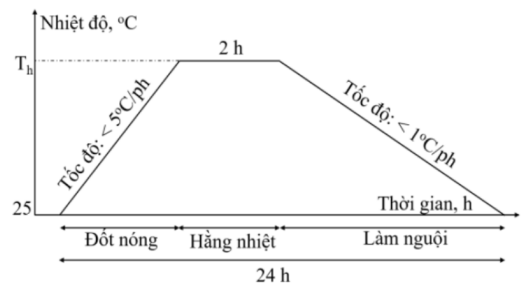
Lượng nước tiêu chuẩn và thời gian đông kết của các chất kết dính hỗn hợp được xác định theo TCVN 6017:2015 [15].

Sau khi trộn với lượng nước tiêu chuẩn tương ứng, hồ CKD được đổ vào khuôn thép kích thước $50 \times 50 \times 50$ mm và đầm chặt bằng bàn rung. Các mẫu được bảo dưỡng trong khuôn ở nhiệt độ 27 ± 2 °C và độ ẩm tương đối không nhỏ hơn 95% trong 24 h. Sau đó, mẫu được tháo khuôn và tiếp tục ngâm nước trong 48 h ở nhiệt độ 27 ± 2 °C.

Sau khi đúc mẫu và bảo dưỡng ngâm nước đến 3 ngày tuổi, quy trình nghiên cứu được thực hiện theo các bước sau: (1) sấy mẫu ở 100 °C đến khối lượng không đổi; (2) nung mẫu tại 800 °C và 1000 °C và làm nguội tự nhiên trong lò; (3) xác định các chỉ tiêu khối lượng thể tích, độ co ngót và cường độ chịu nén sau từng giai đoạn bảo dưỡng và gia công nhiệt. Mỗi chỉ tiêu thí nghiệm được xác định bằng cách lấy giá trị trung bình trên 03 mẫu lặp độc lập cho mỗi cấp phối và chế độ ở từng bước nghiên cứu. Cụ thể các bước và cách xác định chỉ tiêu trình bày cụ thể ở các mục tiếp theo.

c. Chế độ gia công nhiệt các mẫu CKD

Sau khi bảo dưỡng mẫu trong nước, mẫu sấy ở 100 °C đến khối lượng không đổi. Tiếp theo mẫu được đưa vào nung ở các nhiệt độ khảo sát 800 °C và 1000 °C. Thời gian giữ nhiệt tại nhiệt độ cao nhất là 2 h. Tốc độ nâng nhiệt không quá 5 °C/ph. Từ 100–200 °C tốc độ nâng nhiệt là 20 °C/h; từ 300–400 °C tốc độ nâng nhiệt là 100 °C/h; từ 400–600 °C tốc độ nâng nhiệt là 80 °C/h; từ 600 °C đến nhiệt độ làm việc, tốc độ nâng nhiệt là 100 °C/h. Sau khi giữ nhiệt, mẫu được làm nguội tự nhiên trong lò đến nhiệt độ phòng. Chế độ gia nhiệt của mẫu CKD được thể hiện trong Hình 1 [12].



Hình 1. Biểu đồ đường cong nung mẫu CKD

d. Phương pháp nghiên cứu các tính chất của mẫu CKD

Khối lượng thể tích của mẫu CKD

Trước khi xác định khối lượng thể tích (KLTT), các mẫu ngâm nước được lau khô bề mặt, hoặc làm nguội đến nhiệt độ phòng với mẫu gia nhiệt. KLTT của mẫu (γ_0 , g/cm³) được xác định theo công thức (1). Trong đó, G là khối lượng của mẫu (g); V là thể tích của mẫu (cm³).

$$\gamma_0 = \frac{G}{V} \quad (1)$$

Sự suy giảm KLTT (γ_{0m} , %) của mẫu ở các cấp nhiệt độ so với KLTT sau khi sấy ở 100 °C được tính theo công thức (2). Trong đó, γ_0^t là KLTT của mẫu ở nhiệt độ t , γ_0^{100} là KLTT của mẫu sau khi sấy ở 100 °C.

$$\gamma_{0m} = \left(1 - \frac{\gamma_0^t}{\gamma_0^{100}} \right) \times 100\% \quad (2)$$

Độ co ngót của mẫu CKD

Kích thước mẫu tính bằng giá trị trung bình của 3 lần đo kích thước tương ứng 3 vị trí theo 3 phương của mẫu. Từ đó, độ co thể tích của mẫu (C_v , %) được xác định theo công thức (3). Trong đó, V_0 (cm³) là thể tích của mẫu ở nhiệt độ phòng sau bảo dưỡng đến 3 ngày tuổi; V_t là thể tích của mẫu

sau khi gia nhiệt sấy hoặc nung (cm^3). Độ co dài của mẫu (C_l , %) được tính theo công thức (4) thông qua độ co thể tích.

$$C_v = \frac{V_0 - V_t}{V_0} \times 100\% \quad (3)$$

$$C_l = \left[1 - \left(1 - \frac{C_v}{100} \right)^{1/3} \right] \times 100\% \quad (4)$$

Cường độ nén của mẫu CKD

- Xác định cường độ nén của mẫu CKD

Trước khi xác định cường độ nén, mẫu được lau khô bề mặt nếu ngâm nước hoặc để nguội đến nhiệt độ phòng nếu sấy hoặc nung. Giá trị cường độ nén (R_n , MPa) tính theo công thức (5). Trong đó: P là tải trọng nén (N), F là diện tích chịu nén (mm^2).

$$R_n = \frac{P}{F}, \text{ MPa} \quad (5)$$

- Xác định biến đổi cường độ nén của mẫu CKD khi nung

Sự biến đổi cường độ nén (ΔR_n , %) sau khi nung ở 800°C và 1000°C so với sau khi sấy được tính theo công thức (6). Trong đó, R_n^t là cường độ nén của mẫu ở nhiệt độ t , R_n^{100} là cường độ nén của mẫu sau khi sấy ở 100°C .

$$\Delta R_n = \frac{R_n^t - R_n^{100}}{R_n^{100}} \times 100\% \quad (6)$$

3. Kết quả nghiên cứu và bàn luận

3.1. Ảnh hưởng của SF và SA đến lượng nước tiêu chuẩn và thời gian đông kết của CKD

Kết quả thí nghiệm lượng nước tiêu chuẩn và thời gian đông kết của 11 cấp phối CKD được trình bày trong Bảng 7.

Bảng 7. Lượng nước tiêu chuẩn và thời gian đông kết của các mẫu CKD

STT	Cấp phối	Lượng nước tiêu chuẩn (%)	Thời gian bắt đầu đông kết (phút)	Thời gian kết thúc đông kết (phút)
1	CAC	34	95	120
2	Sa30	32	105	170
3	Sa40	31,5	90	150
4	Sa50	32	100	135
5	Sa60	31,5	115	155
6	Sa70	32,5	120	160
7	Sa25Sf5	32	70	110
8	Sa35Sf5	30,5	60	105
9	Sa45Sf5	30,5	75	105
10	Sa55Sf5	30	75	100
11	Sa65Sf5	30	80	105

Từ Bảng 7 có thể thấy cấp phối sử dụng 100% CAC có lượng nước tiêu chuẩn lớn nhất, đạt khoảng 34%. Việc bổ sung SA làm giảm lượng nước tiêu chuẩn khoảng 2–2,5%, trong khi sự kết hợp thêm SF tiếp tục làm giảm lượng nước khoảng 1–1,5%. Cấp phối chứa 65% SA và 5% SF cho lượng nước

tiêu chuẩn thấp nhất, khoảng 30%, thấp hơn khoảng 4% so với mẫu đối chứng sử dụng 100% CAC. Xu hướng này có thể được giải thích bởi sự cải thiện khả năng sắp xếp chặt của hệ hạt khi sử dụng SA và SF. Sa một đóng vai trò là phụ gia ít hoạt tính, không yêu cầu lượng nước đáng kể cho các phản ứng thủy hóa, trong khi SF với kích thước hạt siêu mịn góp phần lấp đầy các khoảng rỗng giữa các hạt chất kết dính, từ đó làm giảm lượng nước cần thiết để đạt độ dẻo tiêu chuẩn [22].

Đối với các cấp phối chỉ sử dụng SA, thời gian bắt đầu đông kết biến động từ 90 đến 120 phút và không thể hiện quan hệ tăng đơn điệu theo hàm lượng SA. Ở hàm lượng SA thấp đến trung bình, thời gian bắt đầu đông kết thay đổi không đáng kể so với mẫu đối chứng; trong khi đó, tại hàm lượng SA cao từ 60–70%, thời gian bắt đầu đông kết tăng lên 115–120 phút. Thời gian kết thúc đông kết của các cấp phối chứa SA đều dài hơn mẫu CAC, dao động từ 135 đến 170 phút, so với 120 phút của mẫu đối chứng. Xu hướng kéo dài thời gian kết thúc đông kết có thể liên quan đến hiệu ứng pha loãng do SA có hoạt tính thủy lực thấp hơn CAC, làm giảm lượng pha chất kết dính tham gia thủy hóa trong hệ. Tuy nhiên, tất cả các cấp phối đều có thời gian đông kết đáp ứng yêu cầu của TCVN 7569:2022 [13].

3.2. Ảnh hưởng của SF và SA đến KLTT của CKD ở các cấp nhiệt độ

Kết quả xác định KLTT của các mẫu CKD sau khi gia công nhiệt được trình bày trong Bảng 8 và Hình 2.

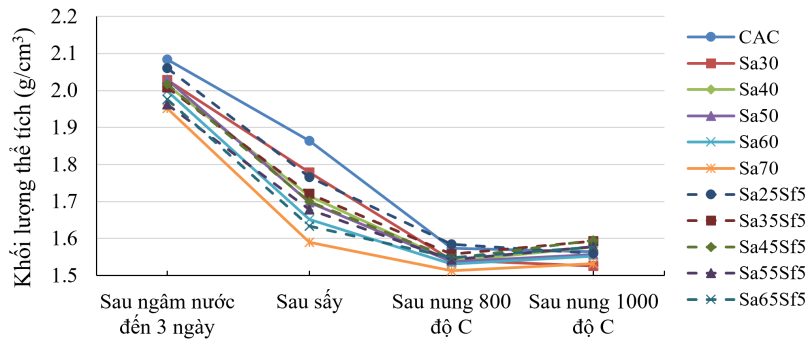
Bảng 8. KLTT của các mẫu CKD sau các quá trình gia công nhiệt

STT	Cấp phối	Khối lượng thể tích, g/cm ³				MKN (%)
		Sau ngâm nước đến 3 ngày	Sau sấy	Sau nung 800 °C	Sau nung 1000 °C	
1	CAC	2,08	1,86	1,57	1,56	19,68
2	Sa30	2,03	1,78	1,54	1,53	13,87
3	Sa40	2,01	1,71	1,54	1,58	12,46
4	Sa50	2,03	1,70	1,54	1,56	10,37
5	Sa60	2,00	1,65	1,53	1,55	8,13
6	Sa70	1,95	1,59	1,51	1,53	6,48
7	Sa25Sf5	2,06	1,77	1,58	1,56	15,42
8	Sa35Sf5	2,01	1,72	1,56	1,59	13,43
9	Sa45Sf5	2,02	1,70	1,55	1,59	11,69
10	Sa55Sf5	1,96	1,68	1,54	1,58	9,95
11	Sa65Sf5	1,98	1,63	1,55	1,58	7,83

Trước khi gia công nhiệt, KLTT của các mẫu tương đối tương đồng, dao động trong khoảng 1,95–2,08 g/cm³ và có xu hướng giảm khi hàm lượng SA tăng lên. Xu hướng này có thể được giải thích bởi khối lượng riêng của SA (~2,6 g/cm³) thấp hơn so với CAC (~3,1 g/cm³).

Sau khi sấy ở 100 °C, KLTT của các cấp phối giảm khoảng 10–18%, trong đó mức suy giảm tăng theo hàm lượng SA. Hiện tượng này chủ yếu liên quan đến sự loại bỏ nước tự do và nước hấp phụ vật lý trong hệ lỗ rỗng của chất kết dính, làm khối lượng vật liệu giảm đáng kể trong khi mức độ co ngót thể tích còn tương đối nhỏ. Do đó, mức giảm khối lượng lớn hơn mức giảm thể tích, dẫn đến sự suy giảm KLTT của các mẫu sau sấy.

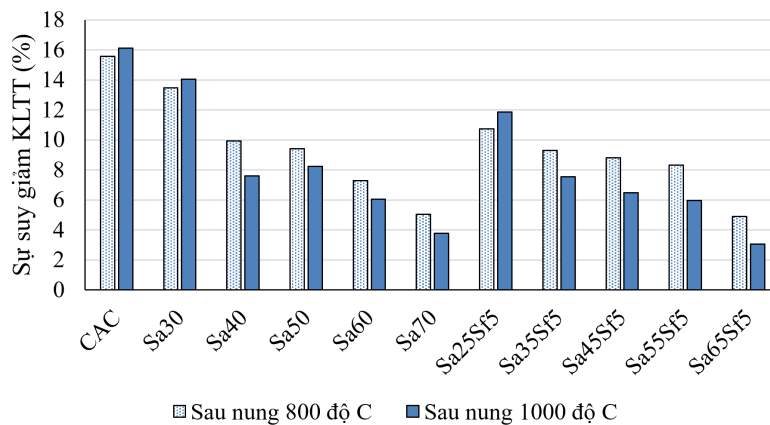
Sự thay đổi KLTT của các mẫu sau nung được trình bày trong Bảng 9 và Hình 3. Sau khi nung ở nhiệt độ cao, KLTT của các mẫu đều giảm do sự phân hủy các pha hydrat trong nền CAC và sự giải phóng nước liên kết hóa học khỏi cấu trúc vật liệu. Quá trình này làm gia tăng độ rỗng và hình thành vi nứt trong hệ chất kết dính, dẫn đến sự suy giảm KLTT của vật liệu.



Hình 2. So sánh KLTT của các mẫu CKD sau các quá trình gia công nhiệt

Bảng 9. Sự suy giảm KLTT của các mẫu CKD sau các quá trình gia công nhiệt

STT	Cấp phối	Sự suy giảm KLTT, %	
		Sau nung 800 °C	Sau nung 1000 °C
1	CAC	15,59	16,13
2	Sa30	13,48	14,04
3	Sa40	9,94	7,60
4	Sa50	9,41	8,24
5	Sa60	7,27	6,06
6	Sa70	5,03	3,77
7	Sa25Sf5	10,73	11,86
8	Sa35Sf5	9,30	7,56
9	Sa45Sf5	8,82	6,47
10	Sa55Sf5	8,33	5,95
11	Sa65Sf5	4,91	3,07



Hình 3. Sự suy giảm KLTT của các mẫu CKD sau các quá trình gia công nhiệt

Sau khi nung trong 2 h, mức suy giảm KLTT ở 1000 °C có xu hướng thấp hơn một chút so với ở 800 °C. Điều này có thể liên quan đến sự bắt đầu của quá trình thiêu kết và hình thành liên kết gốm ở nhiệt độ cao hơn, góp phần làm giảm một phần độ rỗng của vật liệu. Tuy nhiên, mức độ thiêu kết ở giai đoạn này vẫn chưa đủ mạnh để bù đắp hoàn toàn sự gia tăng độ rỗng do mất nước và phân hủy

hydrat [23].

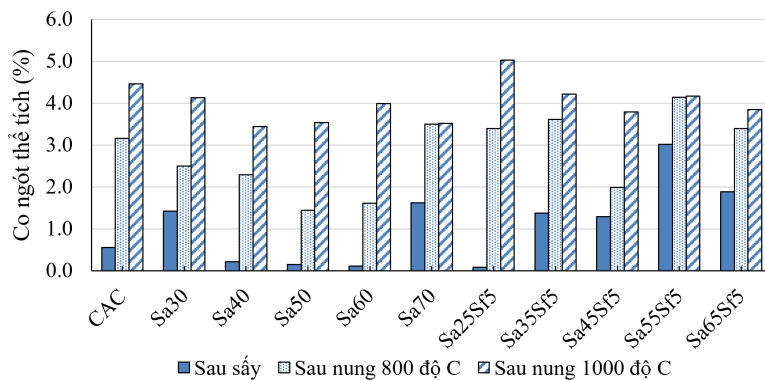
Ngoài ra, mức suy giảm KLTT có xu hướng giảm khi hàm lượng SA và SF tăng lên. Cấp phối sử dụng 100% CAC có mức suy giảm lớn nhất, đạt 15,59% ở 800 °C và 16,13% ở 1000 °C. Trong khi đó, cấp phối chứa 65% SA và 5% SF có mức suy giảm thấp nhất, tương ứng là 4,91% và 3,07%. Kết quả này cho thấy sự hiện diện của sa mốt và SF góp phần cải thiện độ ổn định nhiệt và hạn chế sự suy giảm cấu trúc của hệ chất kết dính ở nhiệt độ cao.

3.3. Ảnh hưởng của SF và SA đến co ngót của CKD sử dụng CAC ở các cấp nhiệt độ

Sự co ngót của các mẫu CKD sau các chế độ gia công nhiệt được trình bày trong Bảng 10 và Hình 4.

Bảng 10. Co ngót của các mẫu CKD sau các chế độ gia công nhiệt

STT	Cấp phối	Co ngót thể tích, %			Co ngót dài, %		
		Sau sấy	Sau nung 800 °C	Sau nung 1000 °C	Sau sấy	Sau nung 800 °C	Sau nung 1000 °C
1	CAC	0,56	3,16	4,46	0,19	1,06	1,51
2	Sa30	1,42	2,50	4,13	0,48	0,84	1,40
3	Sa40	0,22	2,29	3,44	0,07	0,77	1,16
4	Sa50	0,15	1,44	3,53	0,05	0,48	1,19
5	Sa60	0,11	1,61	3,99	0,04	0,54	1,35
6	Sa70	1,62	3,50	3,52	0,54	1,18	1,19
7	Sa25Sf5	0,08	3,39	5,03	0,03	1,14	1,71
8	Sa35Sf5	1,38	3,61	4,22	0,46	1,22	1,43
9	Sa45Sf5	1,29	1,99	3,79	0,43	0,67	1,28
10	Sa55Sf5	3,02	4,14	4,17	1,02	1,40	1,41
11	Sa65Sf5	1,89	3,39	3,85	0,63	1,14	1,30



Hình 4. So sánh sự co ngót thể tích của các mẫu CKD ở các chế độ gia công nhiệt

Sau khi sấy đến khối lượng không đổi, phần lớn các mẫu chất kết dính có độ co ngót thể tích nhỏ hơn 2%, ngoại trừ cấp phối Sa55Sf5 đạt khoảng 3,02%. Các mẫu nung ở 1000 °C đều có độ co ngót lớn hơn so với ở 800 °C. Ngoài ra, các mẫu chỉ chứa SA có xu hướng co ngót thấp hơn so với các mẫu chứa đồng thời SA và SF với tổng hàm lượng phụ gia tương đương.

Kết quả này phù hợp với nhận định của Lee và cs. [24]. Độ co ngót lớn hơn ở 1000 °C chủ yếu liên quan đến sự bắt đầu của quá trình thiêu kết và hình thành liên kết gốm trong nền chất kết dính

CAC. Ở nhiệt độ này, sự tái sắp xếp hạt, hình thành cổ nối giữa các hạt và sự đóng kín một phần lỗ rỗng đã làm tăng mức độ densification và dẫn đến co ngót thể tích của vật liệu. Ngoài ra, sự chuyển pha và hình thành các pha aluminosilicat ổn định nhiệt cũng góp phần làm gia tăng mức độ co ngót. Sự hiện diện của SF có thể thúc đẩy quá trình đặc chắc cấu trúc (densification) ở nhiệt độ cao, do đó làm tăng độ co ngót của vật liệu.

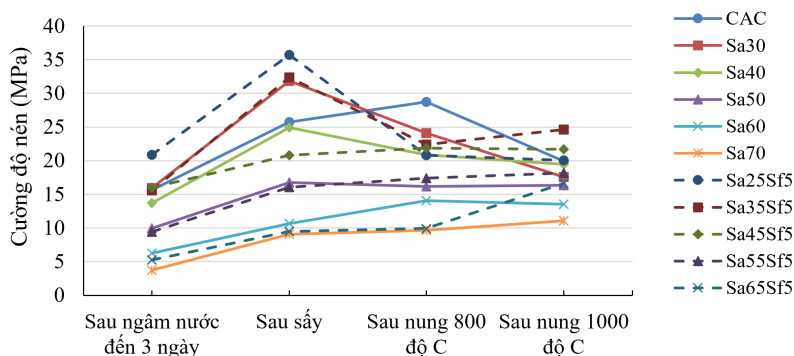
Kết quả nghiên cứu về KLTT và co ngót cho thấy độ co ngót lớn hơn ở 1000 °C không đồng nghĩa với sự gia tăng KLTT. Mặc dù quá trình thiêu kết ban đầu và sự hình thành liên kết gốm gây ra sự co thể tích, sự phân hủy tiếp tục của các pha hydrat cùng với sự hình thành lỗ rỗng và vi nứt nhiệt làm cho mức giảm khối lượng lớn hơn mức giảm thể tích. Do đó, KLTT của vật liệu vẫn tiếp tục giảm mặc dù độ co ngót tăng lên [24].

3.4. Ảnh hưởng của SF và SA đến cường độ của CKD sử dụng CAC ở các cấp nhiệt độ

Cường độ nén của các mẫu CKD ở các môi trường và tuổi ngày khác nhau được trình bày trong Bảng 11 và Hình 5.

Bảng 11. Cường độ nén của các mẫu CKD sau các chế độ gia công nhiệt

STT	Cấp phối	Cường độ chịu nén, MPa				
		Sau ngâm nước đến 3 ngày	Sau ngâm nước đến 28 ngày	Sau sấy	Sau nung 800 °C	Sau nung 1000 °C
1	CAC	15,64	18,13	25,72	28,72	19,91
2	Sa30	15,95	19,08	31,83	24,12	17,56
3	Sa40	13,71	15,22	24,90	20,88	19,49
4	Sa50	9,93	9,25	16,74	16,16	16,34
5	Sa60	6,26	6,16	10,67	14,09	13,55
6	Sa70	3,73	3,17	9,08	9,66	11,08
7	Sa25Sf5	20,88	18,88	41,74	20,83	20,03
8	Sa35Sf5	15,57	16,52	32,39	22,38	24,64
9	Sa45Sf5	16,00	13,74	20,82	21,90	21,68
10	Sa55Sf5	9,42	7,50	16,07	17,43	18,16
11	Sa65Sf5	5,24	3,37	9,48	9,93	16,66



Hình 5. So sánh cường độ nén của các mẫu CKD sau các chế độ gia công nhiệt

Kết quả cho thấy sau 3 ngày bảo dưỡng ngâm nước, các cấp phối sử dụng SF có cường độ chịu nén cao hơn so với nhóm mẫu chỉ sử dụng SA và mẫu đối chứng. Cấp phối sử dụng 25% SA và 5%

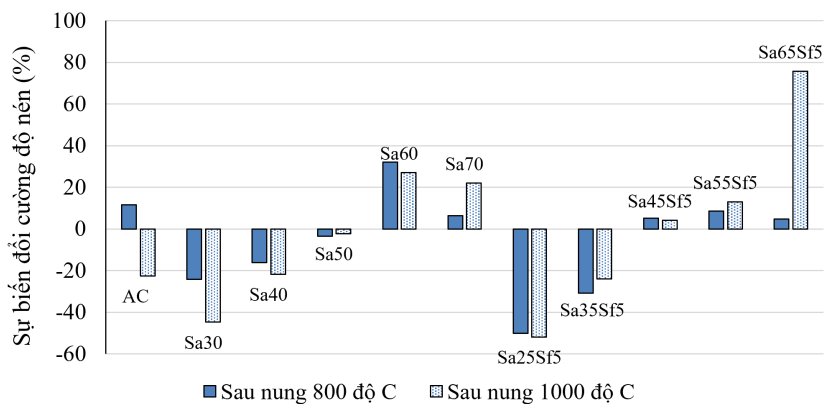
SF đạt cường độ lớn nhất, khoảng 20,88 MPa. Tuy nhiên, cường độ chịu nén có xu hướng giảm dần khi hàm lượng SA tăng lên. Xu hướng này có thể được giải thích bởi hiệu ứng pha loãng chất kết dính do sự thay thế một phần CAC bằng SA có hoạt tính thấp hơn.

Đối với nhóm mẫu bảo dưỡng ngâm nước 28 ngày, ảnh hưởng của hàm lượng SA đến cường độ chịu nén gần tương tự như ở tuổi 3 ngày. Hiệu quả cải thiện cường độ của SF không còn rõ rệt. Điều này cho thấy hệ chất kết dính CAC phát triển cường độ sớm tương đối nhanh, làm cho sự khác biệt về vi cấu trúc giữa các cấp phối giảm dần theo thời gian dưỡng hộ. Do đó, việc lựa chọn tuổi bảo dưỡng ngâm nước đến 3 ngày tuổi trước khi tiến hành sấy và nung là phù hợp để đánh giá ảnh hưởng của nhiệt độ đến sự phát triển cường độ của vật liệu.

Sau khi sấy ở 100 °C đến khối lượng không đổi, tất cả các mẫu đều có cường độ chịu nén tăng đáng kể, với mức tăng khoảng 1,3–2,44 lần so với mẫu trước sấy. Hiện tượng này có thể liên quan đến sự loại bỏ nước tự do trong hệ lỗ rỗng, làm giảm độ rỗng và tăng mức độ đặc chắc của cấu trúc vật liệu. Đồng thời, quá trình gia nhiệt ở nhiệt độ này có thể thúc đẩy sự tiếp tục thủy hóa và chuyển hóa hydrat trong hệ CAC theo cơ chế “tự chưng hấp” (self-autoclaving), góp phần cải thiện cường độ của vật liệu. Cấp phối sử dụng 25% SA và 5% SF đạt cường độ lớn nhất sau sấy, khoảng 41,74 MPa.

Bảng 12. Sự biến đổi cường độ nén của các mẫu CKD sau khi nung

STT	Cấp phối	Sự biến đổi cường độ nén, %	
		Sau nung 800 °C	Sau nung 1000 °C
1	CAC	11,66	-22,61
2	Sa30	-24,21	-44,81
3	Sa40	-16,15	-21,72
4	Sa50	-3,47	-2,35
5	Sa60	32,03	27,01
6	Sa70	6,36	22,04
7	Sa25Sf5	-50,10	-52,01
8	Sa35Sf5	-30,91	-23,94
9	Sa45Sf5	5,19	4,12
10	Sa55Sf5	8,46	12,97
11	Sa65Sf5	4,77	75,75



Hình 6. So sánh sự biến đổi cường độ nén của các mẫu CKD sau nung

Sự thay đổi cường độ nén sau khi nung ở nhiệt độ 800 °C và 1000 °C được trình bày trong Bảng 12 và Hình 6. Kết quả cho thấy ảnh hưởng của hàm lượng phụ gia thay thế đến cường độ chịu nén phụ thuộc rõ rệt vào mức độ thay thế SA và SF. Đối với các cấp phối có tổng hàm lượng SA+SF trong khoảng 30–40%, cường độ chịu nén sau nung giảm đáng kể so với mẫu sau sấy. Đặc biệt, mẫu Sa25Sf5 suy giảm cường độ mạnh nhất, với mức giảm khoảng 50% sau nung ở cả 800 °C và 1000 °C. Hiện tượng này chủ yếu liên quan đến sự phân hủy các pha hydrat trong nền CAC, làm gia tăng độ rỗng và vi nứt nhiệt trong vật liệu, trong khi quá trình thiêu kết và hình thành liên kết gốm chưa đủ mạnh để bù đắp sự suy giảm cấu trúc.

Ngược lại, khi tổng hàm lượng SA+SF tăng lên đến khoảng 50–70%, xu hướng suy giảm cường độ giảm dần và chuyển sang tăng cường độ sau nung. Đặc biệt, cấp phối chứa 65% SA và 5% SF có cường độ tăng khoảng 75,75% sau nung ở 1000 °C trong 2 h so với mẫu sau sấy. Kết quả này cho thấy ở hàm lượng phụ gia cao, vai trò của liên kết gốm và quá trình thiêu kết bắt đầu chiếm ưu thế so với cơ chế liên kết thủy hóa ban đầu. Sự tái sắp xếp hạt, hình thành cổ nối giữa các hạt và sự densification của cấu trúc vật liệu ở nhiệt độ cao có thể đã góp phần phục hồi và gia tăng cường độ của vật liệu sau nung.

Ngoài ra, sự hiện diện của SF cho thấy ảnh hưởng tích cực đến khả năng duy trì và phát triển cường độ ở nhiệt độ cao. SF có hàm lượng SiO₂ vô định hình cao; bên cạnh hiệu ứng lấp đầy của hạt siêu mịn, silica hòa tan từ SF có thể ảnh hưởng đến động học thủy hóa và sự phát triển vi cấu trúc của hệ CAC [8]. Khi gia nhiệt, nguồn SiO₂ từ SF kết hợp với Al₂O₃ sẵn có trong CAC và SA có thể thúc đẩy quá trình phát triển liên kết gốm của hệ, góp phần cải thiện tính ổn định nhiệt và tính chất cơ học của vật liệu sau nung [7].

Cần lưu ý rằng, khối lượng thể tích không phải là chỉ tiêu duy nhất quyết định cường độ nén sau nung. Sự mất nước liên kết và thoát khí làm khối lượng mẫu giảm, trong khi mức co ngót thể tích không tương ứng hoàn toàn, dẫn đến khối lượng thể tích giảm. Tuy nhiên, ở 1000 °C, sự hiện diện của SA và SF có thể hỗ trợ việc cải thiện sự sắp xếp hạt và thúc đẩy phát triển cấu trúc aluminosilicat bền nhiệt. Xu hướng tương tự đã được ghi nhận đối với các vật liệu chịu lửa aluminosilicat chứa CAC và phụ gia giàu SiO₂–Al₂O₃ [25, 26].

4. Kết luận

Từ các kết quả nghiên cứu về ảnh hưởng của SA và SF đến tính chất của chất kết dính chứa CAC ở nhiệt độ cao, có thể rút ra một số kết luận sau:

- Với tổng hàm lượng thay thế từ 30–70% khối lượng chất kết dính, SA và SF đều làm giảm lượng nước tiêu chuẩn của hỗn hợp chất kết dính. Cấp phối sử dụng 65% sa mốt và 5% SF có lượng nước tiêu chuẩn thấp nhất, khoảng 30%, thấp hơn khoảng 4% so với mẫu đối chứng sử dụng 100% CAC.
- SA có xu hướng kéo dài thời gian bắt đầu và kết thúc đông kết của chất kết dính, trong khi SF làm rút ngắn thời gian đông kết của hệ. Mặc dù có sự thay đổi về động học ninh kết, tất cả các cấp phối đều có thời gian đông kết phù hợp với yêu cầu của TCVN 7569:2022.
- Sau khi sấy ở 100 °C đến khối lượng không đổi, KLTT của các mẫu giảm khoảng 10–18%, với xu hướng hàm lượng SA càng lớn thì mức giảm càng rõ rệt. Sau khi nung ở nhiệt độ cao, sự suy giảm KLTT có xu hướng giảm dần khi tăng hàm lượng phụ gia thay thế. Cấp phối sử dụng 65% SA và 5% SF có mức giảm KLTT nhỏ nhất, tương ứng khoảng 4,91% ở 800 °C và 3,07% ở 1000 °C, trong khi mẫu đối chứng sử dụng 100% CAC có mức giảm lớn nhất, tương ứng khoảng 15,59% và 16,13%.
- Sau khi sấy, đa số các mẫu chất kết dính chỉ co ngót thể tích dưới 2%. Khi nung ở nhiệt độ cao, các mẫu đều có xu hướng co ngót mạnh hơn ở 1000 °C so với 800 °C. Hiện tượng này liên quan đến sự bắt đầu của quá trình thiêu kết và hình thành liên kết gốm trong nền chất kết dính CAC ở nhiệt độ cao.

- Các mẫu sau khi sấy ở 100 °C đều có cường độ chịu nén tăng đáng kể, đạt khoảng 1,3–2,44 lần so với mẫu trước sấy. Khi nung ở 800 °C và 1000 °C, hằng nhiệt trong 2 h, ảnh hưởng của nhiệt độ đến cường độ chịu nén thay đổi theo hàm lượng phụ gia thay thế. Đối với các cấp phối có hàm lượng phụ gia 30–40%, cường độ chịu nén suy giảm do sự phân hủy các pha hydrat trong hệ CAC. Ngược lại, khi hàm lượng SA và SF tăng lên, cường độ sau nung có xu hướng được phục hồi và gia tăng. Đặc biệt, cấp phối sử dụng 65% SA và 5% SF có cường độ chịu nén tăng khoảng 75,75% sau nung ở 1000 °C so với mẫu sau sấy.

Lời cảm ơn

Nhóm tác giả chân thành cảm ơn sự hỗ trợ tài chính của Sở Khoa học Công nghệ Hà Nội cho đề tài “Nghiên cứu chế tạo vật liệu phủ chống cháy–cách nhiệt sử dụng cenospheres để bảo vệ kết cấu thép cho các công trình xây dựng trên địa bàn thành phố Hà Nội”, mã số CT05/01-2024-3.

Tài liệu tham khảo

- [1] QCVN 06:2022/BXD và sửa đổi 1:2023. *Quy chuẩn kỹ thuật quốc gia về An toàn cháy đối với nhà và công trình*. Bộ Xây dựng, Hà Nội.
- [2] Khaliq, W., Khan, H. A., (2015). [High temperature material properties of calcium aluminate cement concrete](#). *Construction and Building Materials*, 94:475–487.
- [3] Kim, H., Son, H., Lee, H. K., (2021). [Review on recent advances in securing the long-term durability of calcium aluminate cement \(CAC\)-based systems](#). *Functional Composites and Structures*, 3(3):035002.
- [4] Sarkar, R., (2020). [Binders for refractory castables: An overview](#). *Interceram - International Ceramic Review*, 69(4-5):44–53.
- [5] Scrivener, K., Capmas, A., (2003). Calcium aluminate cements. Hewlett, P. C., editor, *Lea's Chemistry of Cement and Concrete*, Oxford, Butterworth-Heinemann, 713–782.
- [6] Bentsen, S., Seltveit, A., Sandberg, B., (1990). Effects of microsilica on conversion of high alumina cement. Mangabhai, R. J., editor, *Calcium Aluminate Cements: Proceedings of a Symposium*, London, Taylor & Francis, 294–319.
- [7] Hidalgo, A., García, J. L., Alonso, M. C., Fernández, L., Andrade, C., (2009). [Microstructure development in mixes of calcium aluminate cement with silica fume or fly ash](#). *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 96(2):335–345.
- [8] Schramm, T., Neubauer, J., Götz-Neunhoffer, F., (2024). [Influence of silica fume addition and content on the early hydration of calcium aluminate cement - The role of soluble silicon](#). *Cement and Concrete Research*, 184:107618.
- [9] Castro, J. R., Santini, C., Zsembinski, G., Mani Kala, S., Martinez, F. R., Risco, S., Fabiani, C., Pisello, A. L., Cabeza, L. F., (2025). [Innovative refractory concrete for high temperature thermal energy storage](#). *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 285:113506.
- [10] Hải, N. Đ., (2006). *Công nghệ sản xuất vật liệu chịu lửa*. Nhà xuất bản Bách Khoa, Hà Nội.
- [11] Jovanovic, M., Mujkanović, A., Bušatlić, N., Čabreja, I., Omerović, A., (2017). Castables based on chamotte waste with addition of fly ash and clay. *Proceedings of the 10th Research/Expert Conference with International Participations “QUALITY 2017”*, Neum, B&H, 153–160.
- [12] Phương, Đ. T., (2022). *Nghiên cứu bê tông chịu nhiệt sử dụng xỉ măng poóc lăng và tro xỉ nhiệt điện*. Luận án tiến sĩ, Trường Đại học Xây dựng Hà Nội, Hà Nội.
- [13] TCVN 7569:2022. *Xi măng Alumin*. Bộ Khoa học và Công nghệ, Hà Nội.
- [14] TCVN 13605:2023. *Xi măng - Phương pháp xác định độ mịn*. Bộ Khoa học và Công nghệ, Hà Nội.
- [15] TCVN 6017:2015. *Xi măng - Phương pháp xác định thời gian đông kết và độ ổn định thể tích*. Bộ Khoa học và Công nghệ, Hà Nội.
- [16] TCVN 6016:2011. *Xi măng - Phương pháp thử - Xác định cường độ*. Bộ Khoa học và Công nghệ, Hà Nội.
- [17] TCVN 7572-6:2006. *Cốt liệu cho bê tông và vữa - Phương pháp thử - Phần 6: Xác định khối lượng thể tích xốp và độ hở*. Bộ Khoa học và Công nghệ, Hà Nội.

- [18] 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, Hà Nội.
- [19] TCVN 7572-7:2006. *Cốt liệu cho bê tông và vữa - Phương pháp thử - Phần 7: Xác định độ ẩm*. Bộ Khoa học và Công nghệ, Hà Nội.
- [20] TCVN 4506:2012. *Nước cho bê tông và vữa - Yêu cầu kỹ thuật*. Bộ Khoa học và Công nghệ, Hà Nội.
- [21] Refractory, R. H. A., (2026). [Formula ratio of high alumina refractory castable](#). Truy cập ngày 18/05/2026.
- [22] Neville, A. M., (2011). *Properties of concrete*. 5th edition, Prentice Hall, London.
- [23] Díaz-Tato, L., López-Perales, J. F., González-Carranza, Y., Contreras de León, J. E., Rodríguez-Castellanos, E. A., (2025). [Physico-mechanical properties of an aluminosilicate refractory castable obtained after chamotte waste recycling by firing method](#). *Waste*, 3(4):35.
- [24] Lee, W. E., Vieira, W., Zhang, S., Ahari, K., Sarpooolaky, H., Parr, C., (2001). [Castable refractory concretes](#). *International Materials Reviews*, 46(3):145–167.
- [25] López-Perales, J. F., Díaz-Tato, L., Costilla-Aguilar, S. U., González-Carranza, Y., Contreras de León, J. E., Rodríguez-Castellanos, E. A., (2025). [Fly ash as a secondary raw material improving the sustainable characteristics of a conventional silicoaluminate refractory castable](#). *Inorganics*, 13(11):367.
- [26] Kazemi, N., (2019). [Reasons for crack propagation and strength loss in refractory castables based on changes in their chemical compositions and micromorphologies with heating: special focus on the large blocks](#). *Journal of Asian Ceramic Societies*, 7(2):109–126.