

# Nghiên cứu chế tạo bê tông chịu lửa ít xi măng hệ cao alumin sử dụng silicon carbide và barium oxide từ nguồn nguyên liệu trong nước

Hoàng Lê Anh<sup>1\*</sup>, Trương Đức Tiệp<sup>1</sup>, Hoàng Vĩnh Long<sup>2</sup>, Lưu Thanh Nam<sup>2</sup>, Hoàng Đình Quân<sup>2</sup>, Ngô Hương Trà<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Trung tâm Vật liệu chịu lửa và chống cháy, Viện Vật liệu xây dựng

<sup>2</sup> Trường Đại học Xây dựng Hà Nội

## TỪ KHOÁ

Bê tông chịu lửa cao alumin ít xi măng  
Silicon carbide  
Barium oxide  
Độ bền sốc nhiệt  
Mật độ cao

## TÓM TẮT

Nghiên cứu này tập trung vào việc chế tạo bê tông chịu lửa cao alumin ít xi măng sử dụng silicon carbide (SiC) và barium oxide (BaO) từ nguồn nguyên liệu trong nước nhằm nâng cao các tính chất cơ lý - nhiệt và giảm sự phụ thuộc vào nguyên liệu nhập khẩu. Trong bối cảnh yêu cầu ngày càng cao đối với vật liệu chịu lửa làm việc trong điều kiện nhiệt độ cao và sốc nhiệt lớn, việc cải thiện độ bền cơ học, độ sít đặc và khả năng chịu sốc nhiệt của bê tông chịu lửa là cần thiết. Nghiên cứu được thực hiện thông qua việc thiết kế cấp phối hạt hợp lý, thay thế một phần cốt liệu bôxít thiêu kết bằng SiC với các hàm lượng khác nhau kết hợp bổ sung BaO, đồng thời đánh giá ảnh hưởng của các thành phần này đến khối lượng thể tích, độ xốp, độ hút nước, cường độ uốn, cường độ nén và độ bền sốc nhiệt của bê tông chịu lửa ở trạng thái sau sấy và sau nung. Kết quả cho thấy việc bổ sung SiC và BaO giúp cải thiện đáng kể mật độ cấu trúc, làm giảm độ xốp và độ hút nước, đồng thời nâng cao cường độ cơ học và khả năng chịu sốc nhiệt so với mẫu không bổ sung. Độ bền sốc nhiệt của bê tông tăng rõ rệt khi hàm lượng SiC và BaO tăng, tuy nhiên trong điều kiện thí nghiệm, hàm lượng tối ưu được xác định là SiC không vượt quá 10% và BaO không vượt quá 4% để đảm bảo yêu cầu kỹ thuật. Các kết quả thu được khẳng định tính khả thi của việc sử dụng SiC và BaO từ nguồn nguyên liệu trong nước trong chế tạo bê tông chịu lửa cao alumin ít xi măng.

## KEYWORDS

Low-cement high-alumina refractory castable  
Silicon carbide (SiC)  
Barium oxide (BaO)  
Thermal shock resistance  
High bulk density

## ABSTRACT

This study focuses on the development of low-cement high-alumina refractory castable using silicon carbide (SiC) and barium oxide (BaO) derived from domestic raw materials to improve thermo-mechanical properties and reduce dependence on imported materials. In the context of increasingly stringent requirements for refractory materials operating under high-temperature and severe thermal shock conditions, enhancing mechanical strength, structural densification, and thermal shock resistance of refractory castables is essential. The research was conducted by designing an appropriate particle size distribution, partially replacing sintered bauxite aggregates with various contents of SiC combined with BaO addition, and evaluating the effects of these components on bulk density, apparent porosity, water absorption, flexural strength, compressive strength, and thermal shock resistance of the refractory castables in both dried and fired states. The results show that the incorporation of SiC and BaO significantly improves structural compactness, reduces porosity and water absorption, and enhances mechanical strength and thermal shock resistance compared to the reference samples without additives. Thermal shock resistance increases markedly with increasing SiC and BaO contents; however, under the experimental conditions, the optimal contents were determined to be SiC not exceeding 10% and BaO not exceeding 4% to ensure the technical requirements of the material. The obtained results confirm the feasibility of using SiC and BaO from domestic raw materials in the production of low-cement high-alumina refractory castables.

## 1. Giới thiệu

Bê tông chịu lửa (BTCL) là hỗn hợp được trộn của các hạt cốt liệu vật liệu chịu lửa, chất liên kết và phụ gia. Tại nơi thi công, BTCL được trộn với chất lỏng (nước hoặc keo) và hỗn hợp này được đầm rung, ép, bơm phun hoặc tự chảy vào vị trí thi công để tạo thành vật

liệu chịu lửa có hình dạng và cấu trúc, sau đó hỗn hợp trở nên cứng do nhiệt, do đóng rắn thủy lực hoặc đóng rắn hóa học. Tất cả các loại BTCL đều sử dụng cốt liệu và chất nền có thể cho phép chịu được nhiệt độ sử dụng tối đa đến 1850 °C [1].

Trong bối cảnh công nghiệp hiện đại, các thiết bị nhiệt ngày càng yêu cầu vật liệu chịu lửa có khả năng làm việc ổn định ở nhiệt

\*Liên hệ tác giả: vatlieusilicat.pro@gmail.com

Nhận ngày 22/01/2026, sửa xong ngày 03/04/2026, chấp nhận đăng ngày 06/04/2026

Link DOI: <https://doi.org/10.54772/jomc.02.2026.1230>

độ cao, chịu sốc nhiệt tốt, tuổi thọ dài và chi phí vòng đời thấp. Do đó, xu hướng phát triển bê tông chịu lửa hiện nay tập trung vào các hệ vật liệu hiệu suất cao, trong đó bê tông chịu lửa cao alumina ít xi măng được xem là một trong những hướng đi chủ đạo. Việc giảm hàm lượng xi măng giúp hạn chế sự hình thành pha lỏng ở nhiệt độ cao, giảm co ngót và nứt vỡ, đồng thời nâng cao cường độ cơ học và độ ổn định thể tích của vật liệu.

Từ nhu cầu thực tế, để nâng cao hiệu quả sử dụng của bê tông chịu lửa (BTCL) theo từng vị trí, điều kiện làm việc khác nhau thì BTCL cũng cần được nghiên cứu, cải tiến các tính năng như độ bền sốc nhiệt, tăng khả năng chống ăn mòn, giảm độ co, bền đảo,... để phù hợp với thực tế sử dụng.

Tác giả Brian Cotterell và nhóm nghiên cứu [2] chỉ ra ảnh hưởng của quá trình gia nhiệt và làm nguội đột ngột đến tính chất của bê tông chịu lửa ít xi măng. Sự chênh lệch nhiệt độ làm suy giảm đáng kể đến cường độ uốn của mẫu, vật liệu trở lên giòn hơn, xuất hiện các vết nứt sâu.

Tác giả Wenjing Gu và nhóm nghiên cứu [3] đã nghiên cứu ảnh hưởng của chất kết dính xi măng canxi aluminat (CAC) với các kích thước cỡ hạt khác nhau đến đặc tính sốc nhiệt của bê tông chịu lửa. Kết quả cho thấy sử dụng xi măng CAC cỡ hạt nhỏ hơn giúp các hạt phân bố đồng đều hơn, cường độ sau sấy và sau nung tốt hơn. Ở nhiệt độ 1450 °C các vết nứt xuất hiện ít hơn do các hạt phân bố đồng đều tạo ra giãn nở thể tích ít hơn, độ bền sốc nhiệt được cải thiện đáng kể.

S. Martinovic và nhóm nghiên cứu [4] đã theo dõi những thay đổi trong quá trình thử nghiệm tính sốc nhiệt của bê tông chịu lửa ít xi măng, mẫu được nung ở 1600 °C trong 3h và thử làm nguội bằng nước. Trong quá trình thử nghiệm, vật liệu thể hiện tính ổn định tốt, mẫu không bị phá hủy sau 40 chu kỳ, tổn thất khối lượng và bề mặt mẫu bị xói mòn tăng dần đã được xác định trong quá trình thử nghiệm. Việc sử dụng vật liệu này trong tương lai có thể được mong đợi trong điều kiện yêu cầu khả năng chịu nhiệt và chống xâm thực.

Yunjian Luo và nhóm nghiên cứu [5] khảo sát ảnh hưởng của cấu trúc và sự phân bố các lỗ rỗng đến khả năng chịu sốc nhiệt của vật liệu chịu bằng cách so sánh số chu kỳ sốc nhiệt của các mẫu có độ xốp khác nhau và phân bố lỗ rỗng khác nhau. Kết quả chỉ ra rằng khả năng chống sốc nhiệt của vật liệu xốp tốt hơn khi tăng độ xốp đến 20 % và khi tăng độ xốp lên cao hơn, khả năng chịu sốc nhiệt bắt đầu giảm nhanh khi độ xốp > 40 % và khả năng chống sốc nhiệt rất kém khi độ xốp là 65 %. Sự phân bố lỗ rỗng không đồng đều cũng làm ảnh hưởng đến khả năng chống sốc nhiệt của vật liệu.

Mavahebi cùng các cộng sự [6] đã nghiên cứu ảnh hưởng của SiC mịn lên vi cấu trúc và tính chất của BTCL sử dụng cốt liệu chịu lửa bauxite ở các nhiệt độ nung khác nhau bằng các phương pháp phân tích hiện đại dùng XRD, SEM. Quá trình oxy hóa của SiC phụ thuộc áp suất riêng của ô xy và có ảnh hưởng tới vi cấu trúc của BTCL ở nhiệt độ cao, tuy nhiên dùng 6 % SiC mịn cải thiện đáng kể các tính chất cơ, nhiệt của BTCL.

TS. Nguyễn Đình Nghị và cộng sự [7] sử dụng các nguyên liệu trong nước đã nghiên cứu sản xuất được Xi măng cao alumina với hàm

lượng Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 75-76 % chứa các loại khoáng chủ yếu như CA<sub>2</sub>, CA và một phần A được chế tạo bằng phương pháp nung tạo khoáng ở nhiệt độ từ 1380- 1420 °C. Sản phẩm có tính năng cơ lý tốt, đạt các yêu cầu kỹ thuật và được sử dụng trong việc nghiên cứu chế tạo BTCL ít xi măng. BTCL ít xi măng được chế tạo không những khắc phục được nhược điểm của BTCL truyền thống (suy giảm cường độ ở 800- 1000 °C khi gia nhiệt lần đầu) mà còn phát triển cường độ ban đầu rất cao và tăng cường độ khi gia nhiệt. Nghiên cứu chế tạo được BTCL ít xi măng là tiền đề cho những nghiên cứu về sau.

TS. Vũ Văn Dũng và nhóm nghiên cứu [8] đi từ các loại nguyên liệu là bôxít thiêu kết, mulit thiêu kết, xi măng cao alumina và các phụ gia, chế tạo được bê tông chịu lửa mật độ cao chống bám dính có tính năng ưu việt hơn hẳn so với các loại bê tông khác. Bê tông chịu lửa mật độ cao chống bám dính khắc phục được nhược điểm của bê tông chịu lửa thông thường là mật độ cấu trúc sít đặc hơn, khả năng chống thấm ướt bởi kim loại lỏng tốt hơn.

Theo nghiên cứu của Trương Đức Tiếp và các cộng sự [9] việc bổ sung thêm SiC với các tính năng như hệ số giãn nở nhiệt thấp, độ dẫn nhiệt cao, chịu mài mòn cao, ... vào bê tông chịu lửa CR18LC giúp cải thiện đáng kể khả năng chịu sốc nhiệt của sản phẩm. Cụ thể, khi không sử dụng SiC, độ bền sốc nhiệt của BTCL CR18LC là 32 chu kỳ. Khi thay thế cốt liệu bôxít bằng cốt liệu SiC với hàm lượng 5 %, 10 %, 15 %, 20 %, 25 %, 30 % độ bền sốc nhiệt của mẫu được cải thiện đáng kể, tương ứng là 41, 58, 63, 87, 102, 127 chu kỳ. Tuy nhiên khi thay thế SiC với hàm lượng lớn sẽ ảnh hưởng đến mật độ khối và cường độ uốn, nén của BTCL CR18LC. Trong điều kiện thử nghiệm, chỉ nên sử dụng tối đa hàm lượng SiC 15 % để đảm bảo yêu cầu kỹ thuật của sản phẩm. Độ bền sốc nhiệt của bê tông chịu lửa sử dụng cốt liệu bô xít thiêu kết phụ thuộc vào nhiều yếu tố như cốt liệu, hệ kết dính, phụ gia, cỡ hạt...

Theo nghiên cứu của Nguyễn Thị Thu Hà [10] khi thêm Ba<sup>2+</sup> trong hỗn hợp bê tông thì Ba<sup>2+</sup> phản ứng với các ôxít Al<sup>3+</sup>, Si<sup>4+</sup> tạo thành khoáng Ba - Celsian. Khoáng Ba - Celsian có tác dụng làm giảm khả năng thấm ướt của kim loại nóng chảy, tăng khả năng chống ăn mòn của BTCL. Pha thủy tinh giàu khoáng Ba - Celsian được tạo thành điền đầy các lỗ xốp có trong bê tông chịu lửa làm tăng mật độ của bê tông chịu lửa. Nghiên cứu đã chỉ ra rằng, khi đưa thêm 4 % Ba<sup>2+</sup> vào BTCL thì độ xốp giảm đi khoảng 42 %, tăng lên 8 % Ba<sup>2+</sup> độ xốp giảm đi 55 %, và tăng đến 12 % thì độ xốp giảm đi 50 %.

Từ tổng quan về bê tông chịu lửa, nhất là hệ bê tông chịu lửa cao alumina ít xi măng, có thể thấy đây là một trong những vật liệu có vai trò quan trọng trong các ngành công nghiệp luyện kim, xi măng và các thiết bị làm việc ở nhiệt độ cao. Đồng thời, việc giảm hàm lượng xi măng, tối ưu hóa cốt liệu và sử dụng các phụ gia hoạt tính là xu hướng phát triển của BTCL nhằm nâng cao khả năng chịu nhiệt, độ bền sốc nhiệt và độ bền cơ học của vật liệu. Việc cải thiện cấu trúc vi mô, giảm độ xốp, hạn chế sự hình thành các pha có nhiệt độ nóng chảy thấp và tăng độ bền xi là được quan tâm nghiên cứu. Tuy nhiên, tại Việt Nam các nghiên cứu về bê tông chịu lửa cao alumina ít xi măng

liên quan đến ảnh hưởng của phụ gia Barium Oxide (BaO) và việc sử dụng SiC các cỡ hạt thay thế cho bo xít, vẫn còn hạn chế.

Mục tiêu của nghiên cứu là làm rõ vai trò của SiC, BaO trong việc cải thiện cấu trúc pha của bê tông chịu lửa cao alumin ít xi măng. Phân tích ảnh hưởng của SiC, BaO đến các tính chất cơ học – nhiệt kỹ thuật cốt lõi như độ bền uốn, nén, độ giãn nở nhiệt và độ bền sốc nhiệt. Xác định khả năng tương tác của SiC, BaO với hệ cốt liệu cao alumin và các chất liên kết trong điều kiện sử dụng thực tế.

## 2. Nguyên liệu và phương pháp nghiên cứu

### 2.1. Nguyên liệu

Bê tông chịu lửa bao gồm các thành phần chính: cốt liệu chịu lửa, chất kết dính, nguyên liệu hoạt tính siêu mịn, phụ gia phân tán, điều chỉnh. Mỗi loại nguyên liệu có vai trò riêng ảnh hưởng đến tính chất của bê tông chịu lửa.

#### 2.1.1. Cốt liệu chịu lửa

- Bô xít: Cốt liệu chịu lửa được lựa chọn sử dụng là bô xít chịu lửa nhập khẩu từ Trung Quốc, do có nguồn cung ổn định và dễ tiếp cận, đảm bảo khối lượng và chất lượng cho quá trình nghiên cứu. Bên cạnh đó, hàm lượng  $Al_2O_3$  cao, hàm lượng tạp chất thấp, đảm bảo nhiệt độ chịu lửa và khả năng kết khối khi thiêu kết. Ngoài ra với giá thành hợp lý giúp cân đối chi phí nghiên cứu và có khả năng ứng dụng thực tế trong sản xuất.

Nhóm nghiên cứu đã sử dụng dạng hạt đã gia công với các kích cỡ hạt thô (3–5 mm) đóng vai trò khung chịu lực, cốt liệu trung bình (1–3 mm) và cỡ hạt nhỏ (0–1 mm) và cỡ hạt mịn để phục vụ trong quá trình chế tạo.

**Bảng 1.** Thành phần hóa học và tính chất của bô xít sử dụng.

TT	Thành phần và tính chất	Bô xít
1	$Al_2O_3$ , %	84.37
2	CaO, %	0.12
3	$Na_2O$ , %	0.24
4	MgO, %	0.09
5	$Fe_2O_3$ , %	1.37
6	$SiO_2$ , %	13.15
7	KLTT ( $g/cm^3$ )	2.8-3.2

- SiC: là một khoáng nhân tạo. Trong bê tông chịu lửa, SiC làm tăng hệ số dẫn nhiệt và cải thiện độ bền oxy hóa và bền xi, khả năng chống nứt nở cao, cải thiện độ chịu mài mòn. Công ty Cổ phần Tân Hà Kiều có địa chỉ tại Kinh Môn-Hải Dương-Việt Nam cũng đã sản xuất được loại SiC điện chảy làm hạt mài và phụ gia sản xuất thép với công suất nhà máy đạt 30.000 tấn/năm, hàm lượng SiC cao, ít tạp chất. Do vậy, nhóm đề tài đề chủ động nguồn nguyên liệu SiC đề tài lựa chọn để nghiên cứu và đánh giá.

**Bảng 2.** Thành phần hóa của SiC của hãng Công ty Tân Hà Kiều.

Đặc tính kỹ thuật, SiC	Đơn vị	Chỉ tiêu
$\alpha$ -SiC	%	$\geq 98$
F.C		$\leq 0.25$
$Fe_2O_3$		$\leq 0.25$
Cỡ hạt	mm	0 – 1 mm 1 – 3 mm
Độ dẫn nhiệt	W/m.K	110-130

Về thành phần hóa học: SiC có độ tinh khiết cao, với hàm lượng SiC > 70 %, phù hợp với các yêu cầu kỹ thuật của vật liệu chịu lửa. SiC là hợp chất cộng hóa trị bền vững, khó bị phân hủy hoặc phản ứng ở nhiệt độ thường và chỉ bắt đầu tham gia các quá trình oxy hóa ở nhiệt độ cao trong môi trường có oxy.

Về tính chất vật lý: SiC có khối lượng riêng khoảng 3.1–3.2  $g/cm^3$ , độ cứng rất cao (chỉ sau kim cương), khả năng chịu mài mòn và chịu va đập tốt. Khi phân bố trong nền bê tông chịu lửa, các hạt SiC đóng vai trò như các pha gia cường vi mô, giúp tăng cường độ nén và độ bền uốn của vật liệu.

Về tính chất nhiệt: SiC có hệ số dẫn nhiệt cao hơn so với các vật liệu aluminosilicat truyền thống, giúp phân tán nhiệt đều hơn trong cấu trúc bê tông, từ đó làm giảm gradient nhiệt và hạn chế nứt do sốc nhiệt. Đồng thời, hệ số giãn nở nhiệt của SiC tương đối thấp, góp phần giảm ứng suất nhiệt khi bê tông chịu lửa trải qua các chu kỳ nung – làm nguội nhanh.

#### 2.1.2. Chất kết dính

Xi măng cao alumin (CAC) là loại chất liên kết được sử dụng chính để chế tạo BTCL. Sử dụng xi măng cao alumin có rất nhiều lợi thế như dễ thi công, dễ tháo khuôn, cường độ cơ học cao. Hiện nay trên thế giới có nhiều hãng sản xuất xi măng cao alumin. Dựa vào thực tế sản xuất các loại bê tông chịu lửa đã được nghiên cứu và sản xuất đề tài đã chọn ra nguồn cung cấp chính là Công ty Union cung cấp xi măng chịu nhiệt UAC. Xi măng chịu nhiệt UAC 70N được ứng dụng rộng rãi trong bê tông chịu lửa ít xi măng (LCC) nhờ tính lưu động tốt và hiệu suất cao trong LCC. Ngoài ra, UAC 70 không có chất phụ gia, cho phép tạo ra nhiều tính chất khác nhau theo nhu cầu của người dùng và có khả năng chịu nhiệt cao (1700 °C).

**Bảng 3.** Chỉ tiêu kỹ thuật của UAC.

TT	Tên chỉ tiêu	Đơn vị	Kết quả
1	$Al_2O_3$	%	71
2	CaO	%	28
3	Thời gian đóng rắn	Phút	300
4	Độ mịn	45 $\mu$ m	88
		D50	$\mu$ m

Về tính chất vật lý: xi măng UAC có khối lượng riêng khoảng 1.33–1.42 g/cm<sup>3</sup>, độ mịn cao, giúp tăng khả năng phân tán trong hỗn hợp và giảm lượng nước trộn cần thiết. Thời gian đông kết phù hợp cho thi công bê tông chịu lửa.

Về tính chất hóa học: các khoáng chính như CA, CA<sub>2</sub> khi thủy hóa tạo ra các hydroaluminat canxi, là nguồn gốc của cường độ ban đầu. Sau khi nung, các sản phẩm thủy hóa bị phân hủy, nhường chỗ cho pha liên kết gốm bền nhiệt, đảm bảo khả năng làm việc của bê tông ở nhiệt độ cao.

2.1.3. Nguyên liệu hoạt tính siêu mịn

Nguyên liệu hoạt tính siêu mịn (MAS) sử dụng trong thành phần bê tông chịu lửa thường có thành phần là các oxit Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (MAS I) và oxit SiO<sub>2</sub> (MAS II) hoạt tính siêu mịn. Hiện nay để chế tạo bê tông chịu lửa thường sử dụng các loại bột MAS với cỡ hạt siêu mịn, dải hạt thường ở mức từ : 0.2 – 0.7 μm; 1.0-1.5 μm; < 3 μm; < 5 μm;

Tác dụng chính của bột hoạt tính siêu mịn làm tăng độ chảy, cải thiện các tính chất cơ lý, hóa của bê tông chịu lửa. Các phản ứng giữa các phần tử siêu mịn silica (SiO<sub>2</sub>) với alumina (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) ở nhiệt độ cao tạo ra khoáng mullit trong pha liên kết làm cho cấu trúc đặc chắc và chặt chẽ hơn và tăng cường độ ở nhiệt độ cao (tăng độ bền rã nhiệt). Bột hoạt tính chứa SiO<sub>2</sub> có trong vật liệu chịu lửa làm giảm hệ số giãn nở nhiệt. Nhóm đề tài đã lựa chọn sử dụng phụ gia MAS I là oxit nhôm (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), MAS II silicafume (SiO<sub>2</sub>).

- Các hạt siêu mịn có tác dụng lấp đầy lỗ rỗng vi mô, làm tăng mật độ bê tông, giảm lượng nước trộn và cải thiện tính công tác của hỗn hợp bê tông chịu lửa.

- Về tính hóa – nhiệt, silicafume phản ứng với các hydroaluminat canxi tạo pha C<sub>2</sub>ASH<sub>6</sub> ổn định hơn ở nhiệt độ trung bình, trong khi ở nhiệt độ cao, SiO<sub>2</sub> và Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> phản ứng tạo mullite, giúp tăng cường độ và độ ổn định cấu trúc của bê tông chịu lửa.

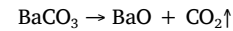
**Bảng 4.** Tính chất của bột chịu lửa hoạt tính siêu mịn.

TT	Tên chỉ tiêu	Mức chất lượng	
		MAS I	MAS II
1	Diện tích bề mặt BET, m <sup>2</sup> /g	3.248	-
2	Kích thước hạt trung bình, μm	2.975	-
3	Kích thước hạt > 45 μm, %	-	< 1.0
4	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	99.4	-
5	Na <sub>2</sub> O	0.02	0.4
6	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	<100 ppm	0.3
7	SiO <sub>2</sub>	-	95.5

2.1.4. Nguyên liệu BaO

BaO được đưa vào bê tông chịu lửa có vai trò làm tăng khối lượng thể tích, cải thiện khả năng chống thấm ướt và hạn chế sự xâm nhập vào trong vật liệu chịu lửa. Trong nghiên cứu, BaO không được

sử dụng trực tiếp mà được tạo ra thông qua quá trình phân hủy nhiệt của bari cacbonat theo phản ứng:



BaO thu được sau quá trình nung tồn tại ở trạng thái hoạt tính cao, dễ phân tán và dễ phản ứng với các oxit có trong bê tông chịu lửa. Khi được nghiền mịn và trộn đều trong phối liệu, BaO có khả năng tham gia trực tiếp vào các phản ứng tạo pha ở nhiệt độ cao, góp phần điều chỉnh cấu trúc và tính chất của vật liệu.

Về thành phần hóa học: BaO là oxit kim loại kiềm thổ có tính bazơ mạnh và khối lượng mol lớn. So với CaO hay MgO, BaO có bán kính ion lớn hơn, dễ tham gia các phản ứng pha rắn với SiO<sub>2</sub> và Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ở nhiệt độ cao, tạo thành các pha bari silicat và bari aluminosilicat ổn định.

Về tính chất vật lý: BaO có khối lượng riêng lớn ≈ 5.7g/cm<sup>3</sup>, khi được phân tán hợp lý trong bê tông sẽ góp phần làm tăng khối lượng thể tích của vật liệu. Các hạt BaO mịn có khả năng điền đầy lỗ rỗng vi mô, làm giảm độ xốp hở và tăng mật độ cấu trúc của bê tông chịu lửa.

Về tính chất nhiệt: ở dải nhiệt độ từ 900°C đến 1300 °C, BaO phản ứng với SiO<sub>2</sub> và Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> tạo thành các pha như BaSiO<sub>3</sub>, BaSi<sub>2</sub>O<sub>5</sub> và đặc biệt là BaAl<sub>2</sub>Si<sub>2</sub>O<sub>8</sub> (Ba-celsian). Các pha này có độ ổn định nhiệt cao, nhiệt độ nóng chảy lớn và góp phần làm giảm hàm lượng SiO<sub>2</sub> tự do, từ đó hạn chế sự hình thành pha lỏng thấp nhiệt gây suy giảm độ chịu lửa.

2.1.5. Phụ gia

Phụ gia phân tán: phụ gia tiên tiến nhất hiện nay làm giảm lượng nước trộn trên cơ sở gốc polyme là polycarboxylate, polyacrylate, polyethylenglycol, phụ gia gốc phot phát. Nghiên cứu này lựa chọn phụ gia phân tán gốc carboxylate có tên thương mại D3.

D3: Các phân tử có chứa nhóm – OH, - COOH, - P=O (axit PBTCA có chứa 3 nhóm COOH, 2 nhóm OH)

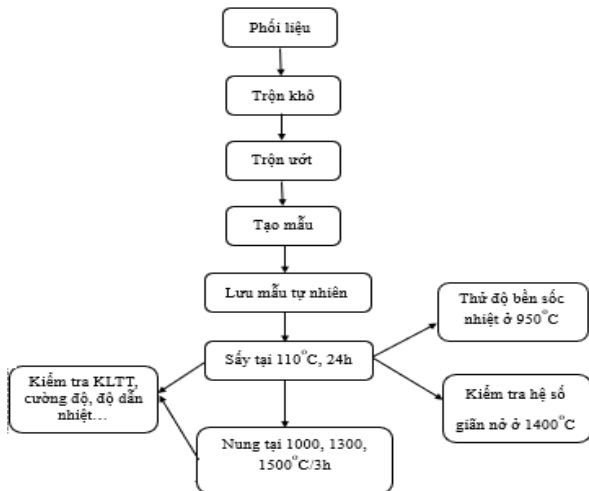
Ngoài ra còn sử dụng thêm phụ gia R209 có tác dụng phân tán các hạt xi măng cao alumin và bột mịn, giúp giảm lượng nước trộn cần thiết, từ đó làm giảm độ xốp và tăng mật độ cấu trúc của bê tông chịu lửa sau khi nung. Phụ gia R209 phân hủy hoàn toàn ở nhiệt độ thấp và không tham gia vào các phản ứng pha ở nhiệt độ cao.

2.2. Phương pháp nghiên cứu

Để đảm bảo cho kết quả không bị sai lệch do quá trình đúc mẫu nên quy trình tạo mẫu được đồng bộ theo TCVN 10685-5 gồm các bước: Đổ lượng vật liệu khô theo yêu cầu vào trong cối và trộn trong vòng 30s để đồng nhất. Sau khi tạo một hốc miệng phễu ở giữa đồng vật liệu khô, đổ từ từ lượng nước trộn vào hốc và bắt đầu trộn. Xác định lượng nước trộn bằng phương pháp xác định độ lưu động theo TCVN 10685-4. Trộn đều trong vòng 3 phút. Cho từ từ hỗn hợp đã trộn vào khuôn có kích thước 160x40x40mm có gắn với vành chặn, rung hỗn hợp trong thời gian 1 phút. Khi kết thúc quá trình rung, vật liệu

ngang bằng với vành chặn. Khi đúc mẫu xong, lưu giữ khuôn mẫu thử ở môi trường có độ ẩm ít nhất 90 %, nhiệt độ duy trì ở  $(27 \pm 2)$  °C. Sau khi lưu 24h, tháo mẫu ra khỏi khuôn. Sau khi bảo dưỡng mẫu thử xong, sấy mẫu thử trong tủ sấy ở nhiệt độ  $(110 \pm 5)$  °C trong 24h.

Các mẫu được tiến hành thử nghiệm theo quy trình được thể hiện ở Hình 1.



Hình 1. Quy trình thí nghiệm.

Các phương pháp thử nghiệm trong nghiên cứu được tổng hợp trong Bảng 5.

Bảng 5. Các phương pháp thử nghiệm.

TT	Chỉ tiêu cần xác định	Đơn vị	Tiêu chuẩn thí nghiệm
1	Khối lượng thể tích	g/cm <sup>3</sup>	JIS-R 2553-1992 TCVN 10685-6:2016
2	Cường độ uốn, nén	MPa	JIS-R 2553-1992 TCVN 10685-6:2016
3	Độ bền sức nhiệt	chu kỳ	YB/T 376.3 – 2004.
4	Độ giãn nở	%	ASTM E831
5	Độ xốp, độ hút nước	%	TCVN 6530-3:2018

### 2.3. Mô tả các thí nghiệm

#### 2.3.1. Thí nghiệm xác định độ bền sức nhiệt của bê tông chịu lửa

Mẫu thử khả năng chống sốc nhiệt làm nguội bằng nước lạnh theo tiêu chuẩn YB/T 376.3 – 2004. Quy trình thử nghiệm như sau:

Mẫu có hình lăng trụ, kích thước 75 mm × 50 mm × 50 mm với sai lệch ± 2 mm. Mẫu thử không được có vết rạn nứt và các khuyết tật trông thấy. trước khi thử, mẫu được sấy khô đến khối lượng không đổi ở nhiệt độ  $105 \pm 5$  °C. Đặt mẫu vào lò theo chiều thẳng đứng khi lò nguội. Nâng nhiệt độ lò tới nhiệt độ 950 °C và lưu ở nhiệt độ đó trong 30 phút. Lấy mẫu ra khỏi lò, nhanh chóng nhúng vào nước lạnh, độ sâu ngâm nhiều nhất là nửa viên mẫu. Lấy mẫu ra khỏi nước sau 10 phút, để trong không khí không ít hơn 5 phút. Quan

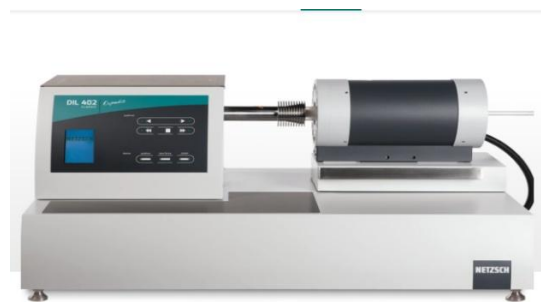
sát mẫu khi để nguội trong không khí. Lặp lại quá trình đến khi mẫu thử xuất hiện vết nứt thì dừng thí nghiệm. Mỗi lần làm lạnh đột ngột được tính là một chu kỳ. Chu kỳ gây ra vết nứt đầu tiên được coi là kết quả thử nghiệm.



Hình 2. Thiết bị thử độ bền sức nhiệt.

#### 2.3.2. Thí nghiệm xác định hệ số giãn nở nhiệt

Đo hệ số giãn nở của bê tông chịu lửa theo tiêu chuẩn ASTM E831. Mẫu được chuẩn bị và đưa vào giá đỡ mẫu và tiếp xúc với cần đẩy. Sau khi đóng cửa lò, thông số chiều dài mẫu được máy xác định với độ chính xác cao, thí nghiệm được tiến hành, Sự giãn nở của mẫu trong quá trình gia nhiệt được phát hiện bởi hệ thống dịch chuyển của cần đẩy. Các thông số được tính toán tự động ở tất cả các nhiệt độ và sẽ được thể hiện bằng đường cong giãn nở nhiệt.



Hình 3. Thiết bị đo hệ số giãn nở nhiệt.

#### 2.3.3. Thí nghiệm xác định cường độ uốn, nén



a) Thiết bị thử cường độ uốn



b) Thiết bị thử cường độ nén

Hình 4. Thiết bị thử xác định cường độ uốn, nén.

Cường độ uốn, nén của mẫu được thực hiện theo tiêu chuẩn TCVN 10685-6 :2018. Sử dụng hệ thống máy uốn, nén tự động với tốc độ tăng tải trọng (0,1 ± 0,01) MPa/s.

2.3.4. Thí nghiệm xác định khối lượng thể tích

Khối lượng thể tích của bê tông chịu lửa được xác định theo tiêu chuẩn TCVN 10685-6. Thể tích của mẫu được xác định bằng phương pháp đo kích thước trên ba cạnh khác nhau của viên mẫu. Khối lượng thể tích của mẫu được xác định bằng tỷ số giữa khối lượng và thể tích của viên mẫu. Mỗi loại bê tông tiến hành xác định với ba mẫu và lấy giá trị trung bình của ba mẫu làm giá trị khối lượng thể tích của bê tông.

2.4. Cấp phối thử nghiệm

Nhóm nghiên cứu lựa chọn cấp phối kế thừa từ các nghiên cứu trước đây và kinh nghiệm thực tế chế tạo bê tông chịu lửa ít xi măng CR18LC sản phẩm của Viện Vật liệu xây dựng với cỡ hạt boxit lớn 3-5 mm là 21 %, cỡ hạt boxit trung bình 1-3 mm là 22 %, cỡ hạt boxit nhỏ là 21 %, cỡ hạt boxit mịn là 21 %, trong đó MAS chiếm 10 % (bao gồm oxit nhôm và silicafume) và xi măng UAC 5 % để đảm bảo độ chảy và mật độ tối đa cho bê tông chịu lửa theo các nghiên cứu công bố và theo thực tế sản xuất bê tông chịu lửa.

Để cải thiện các tính chất của BTCL, nhóm nghiên cứu khảo sát hàm lượng SiC lần lượt là 5 %, 10 %, 15 %, 20 %; và hàm lượng BaO thêm vào với các hàm lượng lần lượt là 2, 4, 6, 8 % đồng thời so sánh cũng mẫu gốc ban đầu khi không sử dụng SiC và BaO (được kí hiệu là M0) ở trong Bảng 6 và Bảng 7 bên dưới.

**Bảng 6.** Cấp phối BTCL sử dụng SiC 1 – 3 mm.

STT	Nguyên liệu	Tỷ lệ	MS0	MS1	MS2	MS3	MS4
1	Bô xít 80 (3 - 5 mm)	%	21				
2	Bô xít 80 (1 - 3 mm)	%	22	17	12	7	2
3	SiC (1 - 3 mm)	%	0	5	10	15	20
4	Bô xít 80 (0 - 1 mm)	%	21				
5	Bô xít 80 (Mịn)	%	21				
6	Xi măng UAC	%	5				
7	Silicafume	%	5				
8	Oxit nhôm hoạt tính	%	5				
9	D3	%	0.5				

**Bảng 7.** Cấp phối bê tông sử dụng BaO tính theo tỷ lệ khối lượng.

TT	Nguyên liệu	Tỷ lệ	M0	M1	M2	M3	M4
1	Bô xít 80 (3-5 mm)	%	21				
2	Bô xít 80 (1-3 mm)	%	22				
3	Bô xít 80 (0-1 mm)	%	21				
4	Bô xít 80 (Mịn)	%	21	19	17	15	13
5	BaO (Mịn)	%	0	2	4	6	8
6	Xi măng UAC	%	5				
7	Silica fume	%	5				
8	Oxit nhôm hoạt tính	%	5				
9	D3	%	0.5				
10	R209	%	0.5				

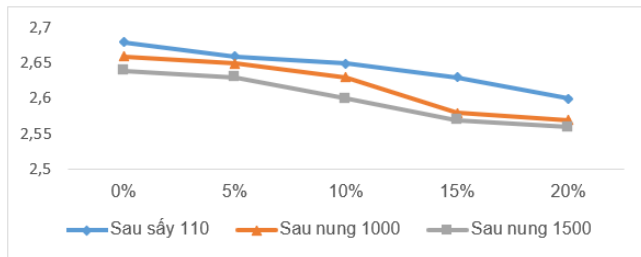
**3. Kết quả và thảo luận**

**3.1. Ảnh hưởng của hàm lượng SiC và BaO đến khối lượng thể tích của BTCL**

**a) Ảnh hưởng của hàm lượng SiC (1-3 mm) đến khối lượng thể tích của BTCL**

**Bảng 8.** Khối lượng thể tích mẫu BTCL sử dụng SiC (1 – 3mm).

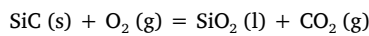
Khối lượng thể tích (g/cm <sup>3</sup> )	MS0	MS1	MS2	MS3	MS4
Sau sấy 110 °C, 24h	2.68	2.66	2.65	2.63	2.60
Sau nung 1000 °C, 3h	2.66	2.65	2.63	2.58	2.57
Sau nung 1500 °C, 3h	2.64	2.63	2.60	2.57	2.55



**Hình 5.** Đồ thị biểu diễn KLTT của BTCL với hàm lượng SiC (1-3 mm).

Khối lượng thể tích của các mẫu giảm khi ở nhiệt độ cao hơn, nguyên nhân chủ yếu do quá trình thủy hóa của xi măng nên độ xốp tăng dần dẫn đến trọng lượng của các mẫu giảm dần.

Sau khi bổ sung hàm lượng SiC có thể thấy ở khoảng nhiệt độ từ 1000 - 1500 °C khối lượng thể tích của mẫu suy giảm không đáng kể bởi vì ở khoảng nhiệt độ đó, xảy ra phản ứng oxy hóa:



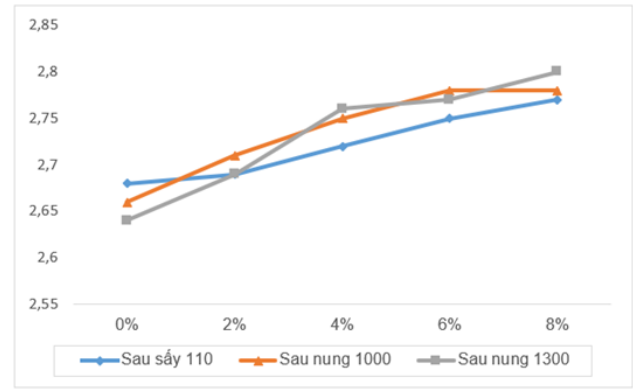
Ở khoảng nhiệt độ trên thúc đẩy quá trình thiêu kết, lỗ rỗng trong vật liệu có thể giảm dần.

**b) Ảnh hưởng của hàm lượng BaO đến khối lượng thể tích của BTCL**

Khối lượng thể tích của mẫu tại các nhiệt độ được thể hiện trong Bảng 9.

**Bảng 9.** Khối lượng thể tích mẫu BTCL sử dụng BaO.

Khối lượng thể tích (g/cm <sup>3</sup> )	M0	M1	M2	M3	M4
Sau sấy 110 °C, 24h	2.68	2.69	2.72	2.75	2.77
Sau nung 1000 °C, 3h	2.66	2.71	2.75	2.78	2.78
Sau nung 1300 °C, 3h	2.64	2.69	2.76	2.77	2.80



**Hình 6.** Khối lượng thể tích BTCL với hàm lượng BaO khác nhau.

Kết quả cho thấy, việc bổ sung BaO có ảnh hưởng rõ rệt đến khối lượng thể tích của bê tông chịu lửa cao alumin ít xi măng. Ở trạng thái sau sấy tại 110 °C trong 24h, khối lượng thể tích của các mẫu dao động trong khoảng 2.68–2.77 g/cm<sup>3</sup>.

+ Mẫu sử dụng hàm lượng BaO 2–4 % có xu hướng tăng nhẹ khối lượng thể tích so với mẫu đối chứng M0, cho thấy BaO góp phần cải thiện khả năng liên kết và làm tăng độ đặc sít trong mẫu ban đầu của vật liệu.

+ Sau nung ở 1000 °C và 1300 °C trong 3h các mẫu có hàm lượng BaO (6-8 %) cao hơn (mẫu 2-4 %) đồng thời duy trì khối lượng thể tích cao và ổn định hơn so với mẫu đối chứng. Điều này có thể nói sử dụng hàm lượng BaO càng cao thì khối lượng thể tích BTCL càng cao.

**c) Đánh giá ảnh hưởng của hàm lượng SiC và BaO tối ưu đến khối lượng thể tích của BTCL**

Từ những kết quả trên, nhóm đã lựa chọn được hàm lượng BaO tối ưu là (2-4 %) để tiếp tục kết hợp trộn với hàm lượng SiC (cỡ hạt 1-3 mm) với tỷ lệ sử dụng là 5, 10, 15 % để tiếp tục khảo sát.

Khối lượng thể tích của mẫu tại các nhiệt độ được thể hiện trong Bảng 10.

Từ đồ thị và số liệu cho thấy:

Khối lượng thể tích tăng rõ rệt khi nhiệt độ nung tăng từ 110 °C → 1000 °C → 1300 °C cho tất cả các mẫu. Việc kết hợp sử dụng hàm lượng SiC và BaO phối trộn với nhau cũng cho thấy khối lượng thể tích của BTCL có xu hướng tăng mạnh cụ thể như ở nhiệt độ 1300 °C khối lượng thể tích tăng dần: 2 % BaO tăng từ 2.58 → 2.64 g/cm<sup>3</sup> và 4 % BaO tăng từ 2.66 → 2.69 g/cm<sup>3</sup>. Điều này cho thấy nếu chỉ sử dụng SiC thông thường thì khối lượng của mẫu sẽ giảm, nhưng khi kết hợp với BaO thì KLTT mẫu tăng rõ rệt góp phần nâng cao cấu trúc của bê tông.

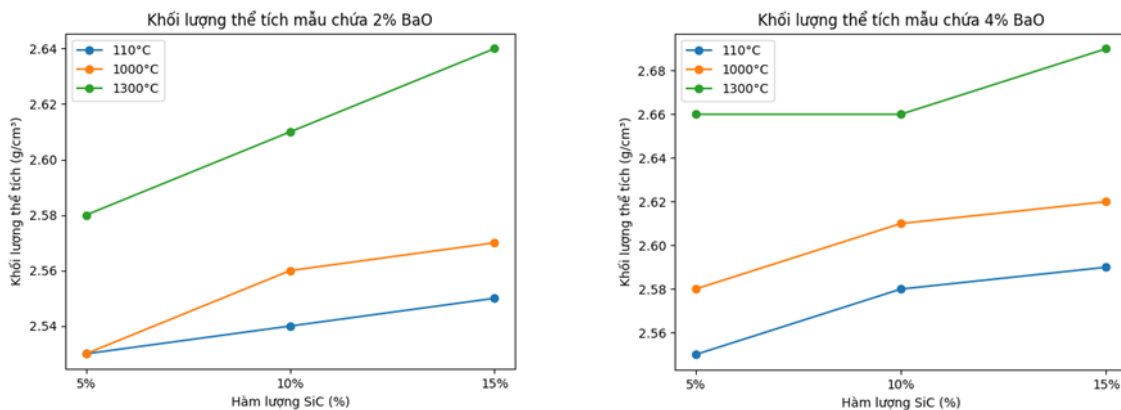
3.2. Đánh giá ảnh hưởng của hàm lượng SiC và BaO đến độ xốp và độ hút nước của BTCL

Độ xốp và độ hút nước của mẫu tại các nhiệt độ được thể hiện trong Hình 8 và Hình 9.

Đối với các mẫu chứa cả 2 % và 4 % BaO, khi tăng hàm lượng SiC từ 5 % lên 15 % thì độ hút nước và độ xốp có xu hướng giảm rõ rệt, đặc biệt tại mức 15 % SiC. Điều này cho thấy SiC ở hàm lượng phù hợp có vai trò như pha điền đầy, giúp cải thiện sự phân bố kích thước hạt và hạn chế sự hình thành lỗ rỗng lớn sau nung.

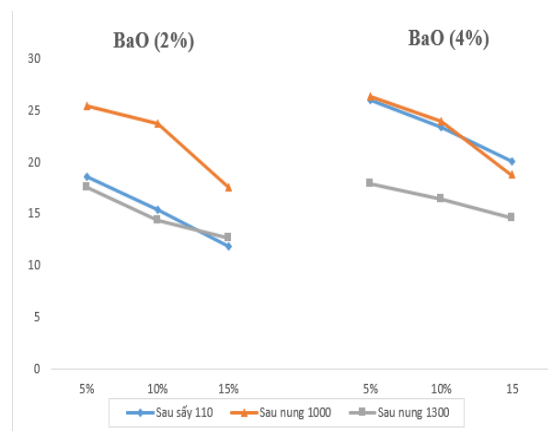
**Bảng 10.** Khối lượng thể tích mẫu BTCL sử dụng kết hợp SiC và BaO.

Khối lượng thể tích (g/cm <sup>3</sup> )	Hàm lượng BaO + SiC		
	2 % + 5 %	2 % + 10 %	2 % + 15 %
Sau sấy 110 °C, 24h	2.53	2.54	2.55
Sau nung 1000 °C, 3h	2.53	2.56	2.57
Sau nung 1300 °C, 3h	2.58	2.61	2.64
Khối lượng thể tích (g/cm <sup>3</sup> )	Hàm lượng BaO + SiC		
	4 % + 5 %	4 % + 10 %	4 % + 15 %
Sau sấy 110 °C, 24h	2.55	2.58	2.59
Sau nung 1000 °C, 3h	2.58	2.61	2.62
Sau nung 1300 °C, 3h	2.66	2.66	2.69



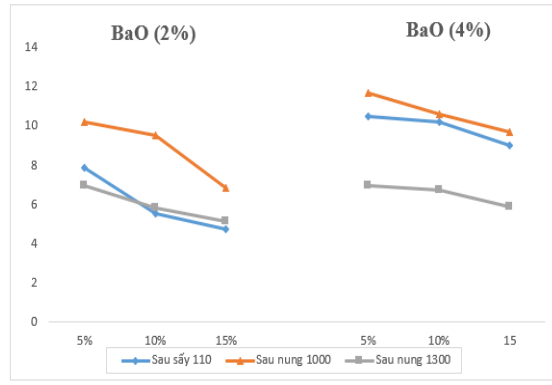
**Hình 7.** Khối lượng thể tích BTCL với hàm lượng SiC kết hợp với BaO (2 %).

Độ xốp (%)	Hàm lượng BaO + SiC		
	2% + 5%	2% + 10%	2% + 15%
Sau sấy 110 °C, 24h	18.58	15.38	11.87
Sau nung 1000 °C, 3h	25.46	23.79	17.56
Sau nung 1300 °C, 3h	17.56	14.33	12.67
Độ xốp (%)	Hàm lượng BaO + SiC		
	4% + 5%	4% + 10%	4% + 15%
Sau sấy 110 °C, 24h	25.98	23.44	20.08
Sau nung 1000 °C, 3h	26.34	23.98	18.77
Sau nung 1300 °C, 3h	17.91	16.43	14.57



**Hình 8.** Ảnh hưởng của hàm lượng SiC và BaO đến độ xốp BTCL.

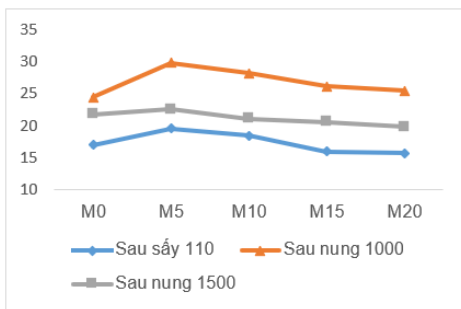
Độ hút nước (%)	Hàm lượng BaO + SiC		
	2% + 5%	2% + 10%	2% + 15%
Sau sấy 110 °C, 24h	7.88	5.54	4.76
Sau nung 1000 °C, 3h	10.23	9.52	6.86
Sau nung 1300 °C, 3h	6.98	5.83	5.11
Độ hút nước (%)	Hàm lượng BaO + SiC		
	4% + 5%	4% + 10%	4% + 15%
Sau sấy 110 °C, 24h	10.50	10.23	9.03
Sau nung 1000 °C, 3h	11.7	10.6	9.72
Sau nung 1300 °C, 3h	6.94	6.72	5.87



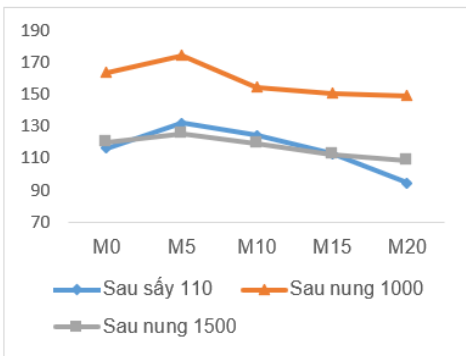
Hình 9. Ảnh hưởng của hàm lượng SiC và BaO đến độ hút nước BTCL.

3.3. Ảnh hưởng của hàm lượng SiC và BaO đến độ bền uốn, nén của BTCL

a) Ảnh hưởng của hàm lượng SiC (1 – 3 mm) đến cường độ uốn, nén của BTCL



a) Cường độ uốn mẫu BTCL sử dụng SiC (1 – 3 mm)



b) Cường độ nén mẫu BTCL sử dụng SiC (1 – 3 mm)

Hình 10. Ảnh hưởng của hàm lượng SiC (1 – 3 mm) đến cường độ uốn, nén của BTCL.

Bảng 11. Cường độ uốn mẫu BTCL sử dụng SiC (1 – 3 mm).

Cường độ uốn (MPa)	MS0	MS1	MS2	MS3	MS4
Sau sấy 110 °C, 24h	17.0	19.6	18.5	16.0	15.7
Sau nung 1000 °C, 3h	24.5	29.9	28.2	26.2	25.5
Sau nung 1500 °C, 3h	21.8	22.6	21.1	20.6	19.8

Bảng 12. Cường độ nén mẫu BTCL sử dụng SiC (1 – 3 mm).

Cường độ nén (Mpa)	MS0	MS1	MS2	MS3	MS4
Sau sấy 110 °C, 24h	116.5	132.2	124.5	113.0	94.6
Sau nung 1000 °C, 3h	164.0	174.7	154.8	151.0	149.4
Sau nung 1500 °C, 3h	120.3	125.7	119.5	112.6	108.8

Cường độ uốn và nén của các mẫu không chứa SiC (1 – 3 mm) có hiện tượng tăng lên đáng kể từ nhiệt độ thường đến 1500 °C. Đối với các mẫu chứa SiC (1 – 3 mm), cường độ từ 1300-1500 °C có hiện tượng giảm dần khi tăng hàm lượng SiC ở cả hai nhiệt độ nung. Có thể lý giải là khi các mẫu vật liệu chịu lửa được nung ở nhiệt độ cao, do thiếu sự hình thành pha nóng chảy thấp và hạt SiC ảnh hưởng tiêu cực đến quá trình thiêu kết, cấu trúc vi mô có độ toàn vẹn kém hơn so với vùng bên ngoài và sự hình thành liên kết gốm vẫn chưa hoàn thiện. Do đó, với việc tăng hàm lượng SiC tính toàn vẹn tổng thể của mẫu giảm và có tác động tiêu cực đến tính chất cơ học của chúng. Hơn nữa, sự hiện diện của các hạt SiC không bị oxy hóa ở các vùng bên trong có thể dẫn đến sự hình thành các vết nứt vi mô cũng như tạo ra ứng suất dư bên trong vật liệu chịu lửa do hệ số giãn nở nhiệt không khớp giữa SiC và các thành phần khác trong nền.

b) Ảnh hưởng của hàm lượng BaO đến độ bền uốn, nén của BTCL

Cường độ uốn, nén mẫu BTCL với các hàm lượng BaO khác nhau được thể hiện trong Bảng 13.

Các mẫu ban đầu khi chưa cho BaO vào thì cường độ uốn của mẫu ở chế độ sấy và nung đều cao nhất dao động 17,02-24,54 MPa. Điều này chứng tỏ cấu trúc trong bê tông vẫn tương đối ổn định.

Khi bổ sung BaO từ 2-8 % thì cường độ có xu hướng giảm dần, chứng tỏ BaO làm suy giảm khả năng chịu uốn của vật liệu trong điều kiện chưa hình thành đầy đủ pha liên kết bền.

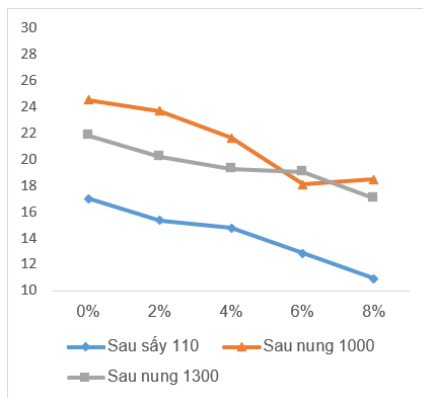
Ở nhiệt độ nung 1000 °C, cường độ uốn giảm mạnh khi hàm lượng BaO tăng đến 6 %, sau đó có xu hướng ổn định nhẹ ở 8 %, cho thấy BaO bắt đầu tham gia phản ứng tạo pha lỏng hoặc khoáng trung gian nhưng chưa đủ để cải thiện cơ tính.

Từ các kết quả thu được có thể sử dụng hàm lượng BaO khoảng 4 % là tối ưu để nâng cao cường độ uốn của bê tông chịu lửa cao alumin ít xi măng sau nung.

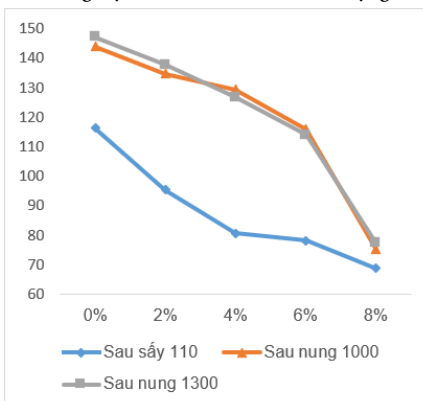
Thông qua bảng số liệu cho thấy cường độ nén của mẫu BTCL giảm dần khi tăng hàm lượng BaO từ 0 % đến 4 % ở tất cả các chế độ nhiệt.

+ Sau sấy 110 °C, cường độ nén giảm từ 116.46 MPa (mẫu 0 %) xuống còn 95.48; 80.85; 78.33 và thấp nhất 68.93 MPa (mẫu 4 %), cho thấy BaO làm suy giảm đáng kể liên kết ban đầu của vật liệu.

+ Sau nung 1000 °C, cường độ nén tăng rõ rệt đối với tất cả các mẫu, còn khi nung ở 1300 °C, cường độ nén đạt giá trị cao nhất, đặc biệt mẫu ban đầu đạt 147.28 N/mm<sup>2</sup>, trong khi các mẫu có hàm lượng BaO cao như 6 % và 8 % chỉ đạt 114.16 và 77.38 MPa. Điều này chứng tỏ hàm lượng BaO sử dụng ở (2 %-4 %) vẫn đảm bảo cường độ tương đối cao sau nung, còn hàm lượng lớn (6 %-8 %) gây bất lợi cho sự phát triển cường độ nén của BTCL.



a) Cường độ uốn của mẫu BTCL sử dụng BaO



b) Cường độ nén của mẫu BTCL sử dụng BaO

**Hình 11.** Ảnh hưởng của hàm lượng BaO đến cường độ uốn, nén của BTCL.

**Bảng 13.** Cường độ uốn mẫu tại các nhiệt độ.

Cường độ uốn (Mpa)	M0	M1	M2	M3	M4
Sau sấy 110 °C, 24h	17.02	15.34	14.77	12.86	10.94
Sau nung 1000 °C, 3h	24.54	23.67	21.65	18.1	18.46
Sau nung 1300 °C, 3h	21.83	20.22	19.3	19.07	17.07

**Bảng 14.** Cường độ nén mẫu tại các nhiệt độ.

Cường độ nén (MPa)	M0	M1	M2	M3	M4
Sau sấy 110 °C, 24h	116.46	95.48	80.85	78.33	68.93
Sau nung 1000 °C, 3h	143.96	134.78	129.55	116	75.23
Sau nung 1300 °C, 3h	147.28	137.87	126.91	114.16	77.38

c) Ảnh hưởng của hàm lượng SiC và BaO tối ưu đến độ bền uốn của BTCL

Cường độ uốn mẫu BTCL với các hàm lượng SiC và BaO phối trộn với nhau được thể hiện trong Hình 12.

Khi sử dụng kết hợp BaO và SiC, cường độ uốn của các mẫu BTCL đều tăng rõ rệt sau nung ở 1000° C và 1300 °C so với trạng thái sau sấy, chứng tỏ quá trình thiêu kết và hình thành pha liên kết ở nhiệt độ cao đóng vai trò quyết định đến cơ tính.

Với cùng hàm lượng BaO (2 % hoặc 4 %), khi tăng hàm lượng SiC từ 5 % lên 15 %, cường độ uốn có xu hướng giảm dần, đặc biệt rõ ở trạng thái sau sấy và sau nung 1300 °C. Các mẫu chứa SiC 5 % cho giá trị cường độ uốn cao nhất, trong đó mẫu 4 % BaO + 5 % SiC đạt cường độ uốn lớn nhất sau nung 1000–1300 °C, cho thấy đây là tổ hợp phụ gia tương đối tối ưu.

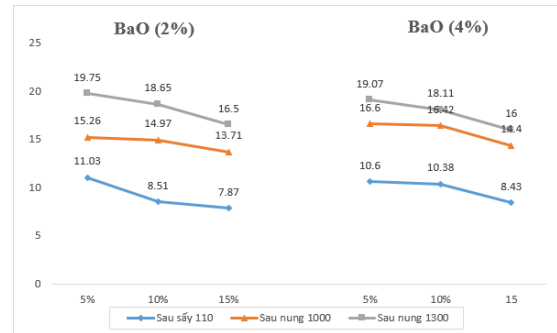
d) Đánh giá ảnh hưởng của hàm lượng SiC và BaO tối ưu đến độ bền nén của BTCL

Cường độ nén mẫu BTCL với các hàm lượng SiC và BaO phối trộn với nhau được thể hiện trong Hình 13.

Cường độ nén của BTCL tăng rõ rệt theo nhiệt độ nung đối với tất cả các cấp phối BaO + SiC. Sau sấy 110 °C, mẫu chứa 2 % BaO + 5 % SiC đạt cường độ cao nhất (81.21 MPa) trong khi khi tăng hàm lượng SiC lên 15 % cường độ giảm còn 67.95–69.04 MPa cho thấy SiC cao làm giảm liên kết ban đầu.

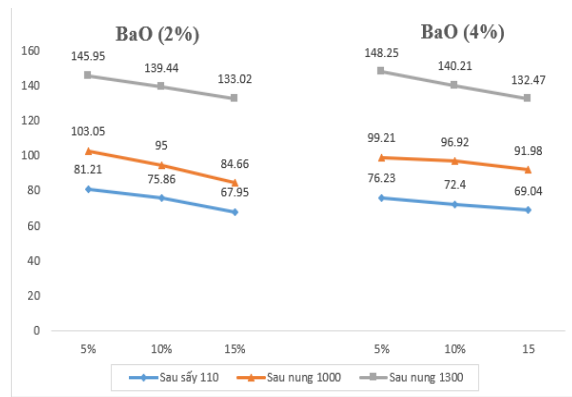
Sau nung 1000 °C, cường độ tăng mạnh, đạt 103.05 MPa (2 % BaO + 5 % SiC) và 99.21 MPa (4 % BaO + 5 % SiC), chứng tỏ vai trò của BaO trong thúc đẩy tạo pha liên kết ở nhiệt độ trung bình. Ở 1300 °C, cường độ nén đạt giá trị lớn nhất, đặc biệt mẫu 4 % BaO + 5 % SiC đạt 148.25 MPa cao hơn các cấp phối còn lại, trong khi tăng SiC lên 10–15 % làm cường độ giảm dần. Như vậy, hàm lượng SiC khoảng 5 % kết hợp với BaO (đặc biệt 4 %) là tối ưu cho phát triển cường độ nén ở nhiệt độ cao.

Cường độ uốn (MPa)	Hàm lượng BaO + SiC		
	2% + 5%	2% + 10%	2% + 15%
Sau sấy 110 °C, 24h	11.03	8.51	7.87
Sau nung 1000 °C, 3h	15.26	14.97	13.71
Sau nung 1300 °C, 3h	19.75	18.65	16.5
Cường độ uốn (MPa)	Hàm lượng BaO + SiC		
	4% + 5%	4% + 10%	4% + 15%
Sau sấy 110 °C, 24h	10.6	10.38	8.43
Sau nung 1000 °C, 3h	16.6	16.42	16.4
Sau nung 1300 °C, 3h	19.07	18.11	16



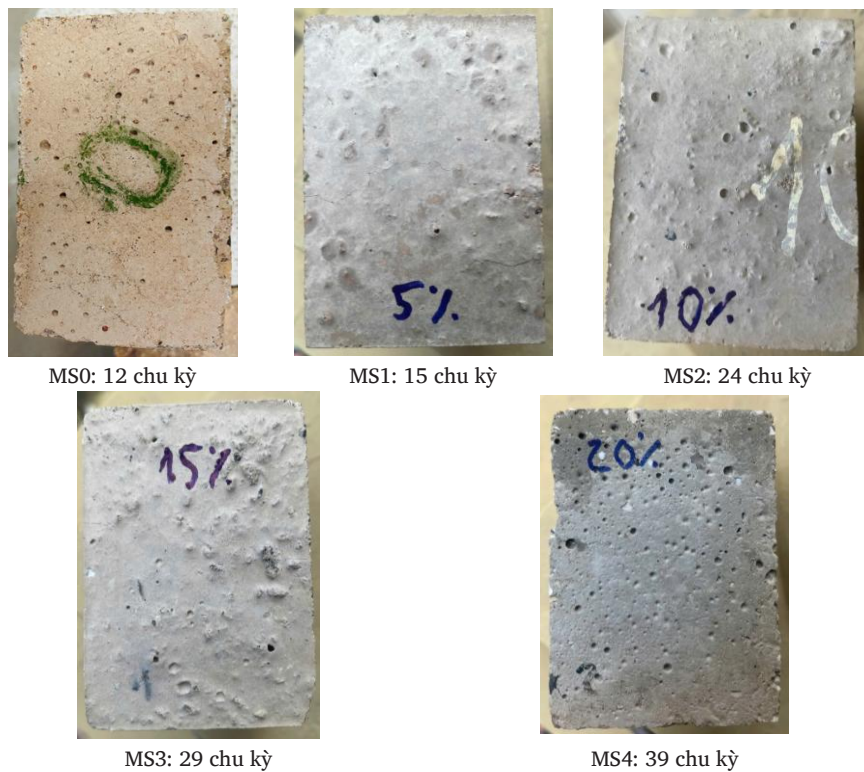
Hình 12. Số liệu và đồ thị biểu diễn cường độ uốn BTCL khi có SiC và BaO.

Cường độ nén (N/mm <sup>2</sup> )	Hàm lượng BaO + SiC		
	2% + 5%	2% + 10%	2% + 15%
Sau sấy 110 °C, 24h	81.21	75.86	67.95
Sau nung 1000 °C, 3h	103.05	95	84.66
Sau nung 1300 °C, 3h	145.95	139.44	133.02
Cường độ nén (N/mm <sup>2</sup> )	Hàm lượng BaO + SiC		
	4% + 5%	4% + 10%	4% + 15%
Sau sấy 110 °C, 24h	76.23	72.4	69.04
Sau nung 1000 °C, 3h	99.21	96.92	91.98
Sau nung 1300 °C, 3h	148.25	140.21	132.47

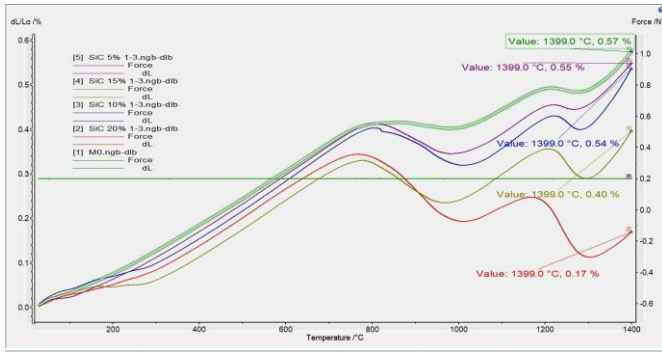


Hình 13. Số liệu và đồ thị biểu diễn cường độ nén BTCL khi có SiC và BaO.

### 3.4. Ảnh hưởng của hàm lượng SiC đến độ bền sức nhiệt của BTCL



Hình 14. Tình trạng vết nứt trên bề mặt mẫu sử dụng SiC (1 – 3 mm) sau khi thử độ bền sức nhiệt.



Hình 15. Đồ thị biểu diễn hệ số giãn nở nhiệt BTCL với hàm lượng SiC cỡ 1-3 mm.

#### 4. Kết luận

- Đề tài đã lựa chọn được nguyên liệu phù hợp là SiC và BaO để thay thế cốt liệu bô xít thiếu kết giúp nâng cao độ bền sốc nhiệt, khối lượng thể tích, cường độ cơ học cho bê tông chịu lửa.

- Cấp phối tối ưu đảm bảo tạo độ chảy cho phối liệu và tạo mật độ cấu trúc tối đa cho bê tông chịu lửa: cốt liệu chịu lửa cỡ hạt 3-5 mm: 21 %; cốt liệu chịu lửa 1-3 mm: 22 %; cốt liệu chịu lửa 0-1 mm: 21 %; cốt liệu chịu lửa mịn: 21 %; xi măng, bột chịu lửa hoạt tính: 15 %.

Theo các kết quả thu được, có thể kết luận rằng khi không sử dụng SiC và BaO, cấu trúc bê tông chủ yếu phụ thuộc vào hệ cốt liệu cao alumin và chất kết dính xi măng alumin. Các thông số khối lượng thể tích thấp hơn, độ xốp và độ hút nước cao hơn, cường độ uốn và cường độ nén ở cả trạng thái sau sấy và sau nung đều thấp hơn, đồng thời khả năng chịu sốc nhiệt kém hơn so với các mẫu khi bổ sung SiC và BaO.

Khi thay thế cốt liệu bô xít bằng cốt liệu SiC với hàm lượng 5 %, 10 %, 15 %, 20 % và cốt liệu BaO với hàm lượng 2 %, 4 %, 6 %, 8 % thì khối lượng thể tích bê tông cao hơn, cường độ cũng tốt hơn, độ xốp giảm, độ bền sốc nhiệt của mẫu được cải thiện đáng kể. Trong điều kiện thử nghiệm, chỉ nên sử dụng tối đa hàm lượng SiC 10 % và BaO 4 % để đảm bảo yêu cầu kỹ thuật của sản phẩm.

Từ việc xác định rõ đối tượng và mục tiêu nghiên cứu, đề tài đã tập trung làm rõ sự ảnh hưởng trong việc chế tạo bê tông chịu lửa ít xi măng hệ cao alumin có bổ sung SiC và BaO nhằm cải thiện đồng thời các tính chất cơ lý - nhiệt của BTCL. Việc lựa chọn nghiên cứu này là cơ sở khoa học để tối ưu thành phần cấp phối, hướng tới nâng cao độ sít đặc, độ bền cơ học và khả năng làm việc ổn định của bê tông trong điều kiện nhiệt độ cao, qua đó đáp ứng đúng mục tiêu nghiên cứu đã đề ra.

Việc chế tạo và thử nghiệm một số tính chất của bê tông chịu lửa sử dụng cốt liệu SiC và BaO để thay thế một phần cốt liệu bô xít thiếu kết phụ thuộc vào nhiều yếu tố như cốt liệu, hệ kết dính, phụ gia, cỡ hạt... Trong phạm vi của nghiên cứu cũng đã khảo sát một phần ảnh hưởng của cốt liệu đến các tính chất của vật liệu, cần phải tiếp tục nghiên cứu về các dải hạt trong cốt liệu, điều chỉnh các chất

kết dính để hoàn thiện, nâng cao chất lượng sản phẩm để có thể ứng dụng thực tế.

#### Tài liệu tham khảo

- [1]. Schacht Charles.A.(2004), *Refractories Handbook*, Marcel Dekker.Inc, New York.
- [2]. Brian Cotterell,"Sze Woo Ong, and Caidong Qin Thermal Shock and Size Effects in Castable Refractories. *J.am Ceram .Soc*, 78[8]2056-64 (1995).
- [3]. Wenjing Gu, Lingling Zhu, Xuejun Shang, Dafei Ding, Luoqiang Liu, Liugang Chen, Guotian Ye Effect of particle size of calcium aluminate cement on volumetric stability and thermal shock resistance of CAC-bonded castables.
- [4]. Martinovic S, Dojcinovic M, Dimitrijevic M, Devecerski A, Matovic B, Volkov Husovic T. Implementation of image analysis on thermal shock and cavitation resistance testing of refractory concrete. *J Eur Ceram Soc* 2010;30:3303–9.
- [5]. Yunjian Luo, Huazhi Gu, Meijie Zhang, Ao Huang, Haifeng Li, Chang Yu, Tingshou Li, Peizhong Yan Research on thermal shock resistance of porous refractory material by strain-life fatigue approach.
- [6]. S. Mavahebia, M. Bavand-vandchalia,\*, A. Nematib (2019), "SiC fines effects on the microstructure and properties of bauxite-based lowcement refractory castables", *Ceramics International* 45, pp 16338-6346.
- [7]. Nguyễn Đình Nghị "Phát triển công nghệ sản xuất và ứng dụng bê tông chịu lửa ít xi măng cho công nghiệp xi măng và luyện kim ở Việt Nam", Viện Vật liệu xây dựng.
- [8]. Vũ Văn Dũng, Trần Thị Minh Hải, Nguyễn Thị Kim (2019), Báo cáo tổng kết đề tài cấp Bộ Xây dựng: "Nghiên cứu chế tạo bê tông chịu lửa sử dụng nano silica làm chất kết dính", số đăng ký KQ 2022-26-0971/NS-KQNC.
- [9]. Trương Đức Tiếp, Nguyễn Thị Kim, Phạm Hoàng Anh "Nghiên cứu nâng cao độ bền sốc nhiệt của bê tông chịu lửa sử dụng cốt liệu bô xít thiếu kết", Viện Vật liệu xây dựng, 2024.
- [10]. Nguyễn Thị Thu Hà, Vũ Văn Dũng (2014), Báo cáo tổng kết đề tài cấp Bộ Xây dựng: "Nghiên cứu chế tạo bê tông chịu lửa mật độ cao chống bám dính cho công nghiệp luyện kim màu" mã số V02-13.