VẬT LIỆU & XÂY DỰNG
Tạp chí Vật liệu và Xây dựng
ISSN 1859 - 381X
Website: www. jomc.vn

Nghiên cứu chế tạo bê tông chịu nhiệt cản xạ sử dụng cốt liệu nặng và hệ kết dính PC40–CA50

Vũ Văn Dũng[1*], Trần Thị Minh Hải[1], Hoàng Lê Anh[1], Lê Xuân Hoàng[1], Nguyễn Đức Thành[1], Nguyễn Thị Kim[1], Nguyễn Thị Thu Hà[1]

[1] Viện Vật liệu xây dựng, Bộ Xây dựng

TỪ KHOÁ

Bê tông cản xạ
Bê tông chịu nhiệt
Cốt liệu nặng
PC40
CA50
Bức xạ gamma
HVL

TÓM TẮT

Nghiên cứu nhằm chế tạo bê tông chịu nhiệt cản xạ gamma sử dụng cốt liệu nặng và hệ chất kết dính hỗn hợp PC40–CA50, đáp ứng đồng thời yêu cầu về tính công tác, khối lượng thể tích, cường độ nén ở điều kiện thường, cường độ nén sau tác động nhiệt và khả năng cản bức xạ gamma. Cấp phối được tính theo phương pháp thể tích tuyệt đối; cốt liệu quặng magnetit–hematit được gia công thành hai cấp hạt 0–5 mm và 5–20 mm. Ảnh hưởng của tỷ lệ cốt liệu lớn/cốt liệu nhỏ, hàm lượng chất kết dính, loại cốt liệu, tỷ lệ PC40/CA50, cốt liệu chịu lửa, tro bay và meta cao lanh được khảo sát. Mẫu được xác định độ sụt, khối lượng thể tích, cường độ nén ở trạng thái tự nhiên, sau sấy, sau nung 600 °C. Khả năng cản bức xạ gamma được đo bằng nguồn Co-60 ở mức năng lượng 1,17 MeV và 1,33 MeV; chiều dày lớp giảm một nửa (half-value layer, HVL) tại mức năng lượng 1,25 MeV được nội suy từ hệ số suy giảm tuyến tính. Thành phần pha và vi cấu trúc được khảo sát bằng nhiễu xạ tia X (XRD) và kính hiển vi điện tử quét (SEM). Kết quả xác định tỷ lệ thể tích cốt liệu lớn/cốt liệu nhỏ 55/45 và tổng chất kết dính 385 kg/m^3 là phù hợp. Cấp phối CP12 chứa 308 kg/m^3 PC40 và 77 kg/m^3 CA50 đạt độ sụt 60 mm, khối lượng thể tích 28 ngày 3.615 kg/m^3, cường độ nén 28 ngày 38,8 MPa, cường độ sau nung 600 °C 33,8 MPa, tỷ lệ cường độ nén dư 79,1% và bê tông không rạn nứt sau nung. HVL tại 1,25 MeV tăng từ (3,29 ± 0,18) cm ở trạng thái tự nhiên lên (3,54 ± 0,21) cm sau nung. Ảnh chụp SEM cho thấy mẫu chỉ dùng PC40 xuất hiện vết nứt nhỏ bên trong sau nung, trong khi trường ảnh của hệ PC40–CA50 không ghi nhận vết nứt. Trong phạm vi khảo sát, CP12 được lựa chọn làm cấp phối nền; mức thay thế 10% tro bay hoặc 10% meta cao lanh cho hiệu quả tổng hợp khả quan nhất về cường độ và khả năng duy trì cường độ sau khi chịu tác động nhiệt trong các cấp phối được lựa chọn.

KEYWORDS

Radiation-shielding concrete
Heat-resistant concrete
Heavy aggregate
PC40
CA50
Gamma radiation
HVL

ABSTRACT

This study develops heat-resistant gamma-ray shielding concrete using heavy aggregate and a blended PC40–CA50 binder system, with simultaneous requirements for workability, density, compressive strength before and after thermal exposure, and gamma-ray shielding. Mixtures were proportioned by the absolute-volume method using processed magnetite–hematite aggregate in the 0–5 mm and 5–20 mm fractions. The investigated variables included the coarse-to-fine aggregate ratio, binder content, aggregate type, PC40/CA50 ratio, refractory aggregate, fly ash, and metakaolin. Slump, density, compressive strength under natural conditions, after drying and heating to 600 °C were determined. Gamma attenuation was measured using a Co-60 source at 1.17 and 1.33 MeV; the half-value layer at 1.25 MeV was obtained by interpolation of the linear attenuation coefficient. Phase composition and microstructure were examined by X-ray diffraction (XRD) and scanning electron microscopy (SEM). A coarse-to-fine aggregate volume ratio of 55/45 and a total binder content of 385 kg/m^3 were selected. Mixture CP12, containing 308 kg/m^3 PC40 and 77 kg/m^3 CA50, achieved a slump of 60 mm, a 28-day density of 3,615 kg/m^3, a 28-day compressive strength of 38.8 MPa, a compressive strength after heating to 600 °C of 33.8 MPa, and a residual strength ratio of 79.1%, with no visible cracking after heating. The HVL at 1.25 MeV increased from (3.29 ± 0.18) cm to (3.54 ± 0.21) cm after heating. SEM observation showed internal microcracks in the PC40-only specimen after heating, whereas no crack was observed in the selected field of the PC40–CA50 specimen. CP12 was selected as the reference mixture, while the mixtures with 10% fly ash or metakaolin replacement exhibited a favorable balance between compressive strength and residual strength ratio among the selected mixtures.

*Liên hệ tác giả: dungsilicat@gmail.com
Nhận ngày 21/09/2026, sửa xong ngày 08/10/2026, chấp nhận đăng ngày 09/10/2026
Link DOI: https://doi.org/10.54772/jomc.05.2026.1504

1. Giới thiệu

Bê tông cản xạ là loại bê tông được thiết kế nhằm làm suy giảm cường độ bức xạ ion hóa thông qua các cơ chế hấp thụ và tán xạ năng lượng trong vật liệu. Trong công trình năng lượng hạt nhân, vật liệu này được sử dụng trong các kết cấu bảo vệ sinh học để hạn chế bức xạ phát tán ra môi trường, bảo đảm an toàn cho con người và thiết bị [1]. Ngoài khả năng chắn xạ, bê tông còn phải đảm nhận chức năng chịu lực, duy trì độ đặc chắc và ổn định trong suốt thời gian làm việc.

Đối với bức xạ gamma, hiệu quả che chắn phụ thuộc đáng kể vào khối lượng thể tích và thành phần nguyên tố của bê tông. Việc sử dụng cốt liệu nặng như barit, magnetit và hematit làm tăng khối lượng thể tích, qua đó cải thiện khả năng suy giảm tia gamma [2, 3]. Các thông số thường dùng để biểu thị khả năng cản xạ gồm hệ số suy giảm tuyến tính, chiều dày lớp giảm một nửa (HVL) và chiều dày lớp giảm một phần mười (TVL).

Bê tông cản xạ sử dụng trong một số khu vực của công trình hạt nhân có thể đồng thời chịu tác động nhiệt. Nhiệt độ cao gây biến đổi sản phẩm thủy hóa, tăng độ rỗng và phát sinh vi nứt, từ đó ảnh hưởng đến cường độ cơ học và khả năng cản xạ. Các nghiên cứu về bê tông nặng dùng cốt liệu magnetit, barit và các loại cốt liệu khác đã ghi nhận sự thay đổi tính chất cơ học và hiệu quả chắn gamma sau gia nhiệt [4-9]. Vì vậy, việc lựa chọn đồng thời hệ cốt liệu và chất kết dính là yêu cầu quan trọng đối với bê tông chịu nhiệt cản xạ.

Các giải pháp bê tông cản xạ thường tập trung vào cốt liệu nặng, trong khi bê tông chịu nhiệt thường sử dụng chất kết dính có khả năng ổn định ở nhiệt độ cao. Xi măng poóc lăng PC40 có khả năng phát triển cường độ ở điều kiện thường; xi măng canxi alumin CA50 phát triển cường độ sớm và duy trì tính ổn định tốt hơn khi chịu nhiệt. Nghiên cứu này khảo sát hệ chất kết dính phối hợp PC40–CA50 trong bê tông sử dụng cốt liệu quặng magnetit–hematit (quặng MH), đồng thời đánh giá một số phương án sử dụng cốt liệu chịu lửa, tro bay và meta cao lanh.

Mục tiêu nghiên cứu là xác định thành phần vật liệu và cấp phối có khả năng đáp ứng các yêu cầu đã đặt ra trong nghiên cứu: khối lượng thể tích 3,0–4,5 g/cm^3; cường độ nén nguội và sau sấy không nhỏ hơn 30 MPa; cường độ nén sau nung 600 °C không nhỏ hơn 25 MPa; nhiệt độ sử dụng tối đa 600 °C; HVL tại mức năng lượng 1,25 MeV trong khoảng 3,6–4,4 cm. Nghiên cứu được thực hiện chủ yếu ở quy mô phòng thí nghiệm; đánh giá cản xạ giới hạn ở bức xạ gamma và mang tính định hướng, so sánh giữa các cấp phối.

2. Tổng quan nghiên cứu

2.1. Yêu cầu đối với bê tông chịu nhiệt cản xạ

Bê tông cản xạ phải đáp ứng đồng thời yêu cầu về khả năng làm suy giảm bức xạ, cường độ cơ học, độ đặc chắc, tính công tác và khả năng duy trì tính năng khi chịu nhiệt. Đối với bức xạ tia gamma, các cốt liệu có khối lượng riêng lớn và chứa nguyên tố có số nguyên tử cao được sử dụng để nâng cao hiệu quả chắn xạ. Tiêu chuẩn ASTM C637 quy định các yêu cầu đối với cốt liệu dùng cho bê tông cản xạ [10], trong khi tiêu chuẩn GOST R 70222-2022 đề cập đến bê tông siêu nặng [11].

Khả năng làm việc sau gia nhiệt được đánh giá qua cường độ nén tuyệt đối và nhiệt độ sử dụng tối đa. Theo yêu cầu của tiêu chuẩn GOST 20910-2019, bê tông được coi là đáp ứng nhiệt độ sử dụng tối đa 600 °C khi tỷ lệ cường độ nén dư sau nung ở 600 °C không nhỏ hơn 50 % và mẫu không xuất hiện vết rạn nứt. Tỷ lệ cường độ nén dư được xác định như sau:

$$Tỷ\ lệ\ cường\ độ\ nén\ dư\ (\%) = \frac{R_{7d,600}}{R_{x,s}} \times 100$$

Trong đó:

$R_{7d,600}$: cường độ nén của mẫu sau nung ở 600 °C và lưu giữ 7 ngày theo điều kiện quy định, MPa.

$R_{x,s}$: cường độ nén của mẫu đối chứng ở tuổi x ngày, sau chế độ bảo dưỡng và sấy quy định, MPa. Cụ thể, x = 3 ngày đối với mẫu sử dụng 100 % chất kết dính CA50; x = 7 ngày đối với mẫu sử dụng 100 % chất kết dính PC40 và hỗn hợp chất kết dính PC40/CA50.

Đối với quá trình định lượng, trộn, vận chuyển và đổ bê tông nặng, nhóm nghiên cứu tham khảo tiêu chuẩn ACI 304.3R-20 [13]; nguyên tắc lựa chọn tỷ lệ thành phần theo thể tích tuyệt đối được đối chiếu với tiêu chuẩn ACI PRC-211.1-22 [14].

2.2. Vai trò của vật liệu thành phần

Cốt liệu quặng MH, barit và limonit được khảo sát nhằm đánh giá ảnh hưởng của khối lượng riêng đến khối lượng thể tích và HVL của bê tông. Cốt liệu chịu lửa cao nhôm được sử dụng thay thế một phần cốt liệu nhỏ theo thể tích để xem xét sự cân bằng giữa ổn định nhiệt, khối lượng thể tích và khả năng cản xạ. Chất kết dính gồm xi măng PC40 và CA50; phụ gia khoáng gồm tro bay và meta cao lanh; phụ gia hóa học là loại giảm nước gốc polycarboxylate.

Việc sử dụng tro bay và meta cao lanh trong nghiên cứu này được khảo sát theo các mức thay thế xác định. Kết quả được đánh giá trên cơ sở độ sụt, khối lượng thể tích, cường độ nén trước và sau gia nhiệt, tỷ lệ cường độ nén dư và HVL.

3. Vật liệu và phương pháp

3.1. Vật liệu và yêu cầu kỹ thuật

Cốt liệu nặng được khảo sát gồm quặng MH Cao Bằng, quặng sắt Trại Cau, quặng sắt Tuyên Quang, barit Bắc Giang và limonit Tuyên Quang. Trong đó, quặng MH Cao Bằng được sử dụng làm cốt liệu chính, gia công thành hai cỡ hạt 0–5 mm và 5–20 mm, có khối lượng riêng lần lượt là 4.550 và 4.600 kg/m^3; khối lượng thể tích xốp tương ứng là 2.810 và 2.740 kg/m^3.

Chất kết dính gồm xi măng poóc lăng PC40 Nghi Sơn và xi măng canxi alumin CA50-II A600. Xi măng PC40 đáp ứng TCVN 2682:2020, có khối lượng riêng 3.100 kg/m^3 và cường độ nén ở tuổi 28 ngày đạt 45,8 MPa. Xi măng CA50-II A600 do Zhengzhou United Fortune New Materials Co., Ltd. (Trung Quốc) sản xuất theo GB/T 201-2015, có khối

lượng riêng 3.050 kg/m³ và diện tích bề mặt riêng 3.355 cm²/g. Thời gian bắt đầu và kết thúc đông kết lần lượt là 155 và 175 phút; cường độ nén sau 24 và 72 giờ tương ứng đạt 30,3 và 40,5 MPa.

Cốt liệu chịu lửa cao nhôm do Huang He Minerals Co., Ltd. (Trung Quốc) sản xuất, có cỡ hạt 0–5 mm, khối lượng riêng 3.350 kg/m³ và khối lượng thể tích xốp 1.740 kg/m³. Hàm lượng Al_2O_3 và SiO_2 lần lượt là 85 % và 6,5 %.

Phụ gia khoáng gồm tro bay Sông Đà Cao Cường và meta cao lanh có xuất xứ Trung Quốc. Tro bay có khối lượng riêng 2,24 g/cm³, lượng sót trên sàng 45 µm là 14,8 %, mất khi nung 3,45 % và độ ẩm 0,07 %; hàm lượng SiO_2 và Al_2O_3 lần lượt là 58,74 % và 22,94 %. Meta cao lanh có khối lượng riêng 2,5 g/cm³, kích thước hạt D_{50} bằng (0,8 ± 0,1) µm, tỷ lệ hạt nhỏ hơn 2 µm đạt 86–90 % và hàm lượng Al_2O_3 bằng (45 ± 2) %.

Phụ gia siêu dẻo gốc polycarboxylate có pH 9–11, độ ẩm không lớn hơn 5,0 %, hiệu quả giảm nước không nhỏ hơn 15 %, khối lượng thể tích không nhỏ hơn 450 kg/m³ và độ chảy của hồ xi măng không nhỏ hơn 240 mm.

Các yêu cầu kỹ thuật đối với bê tông chịu nhiệt cản xạ được tổng hợp trong Bảng 1.

Bảng 1. Yêu cầu kỹ thuật của bê tông chịu nhiệt cản xạ.

Chỉ tiêu	Đơn vị	Mức chất lượng
Khối lượng thể tích	g/cm³	3–4,5
Cường độ nén nguội	MPa	≥ 30
Cường độ nén sau sấy	MPa	≥ 30
Cường độ nén sau nung 600 °C	MPa	≥ 25
Nhiệt độ sử dụng	°C	600
HVL tại 1,25 MeV	cm	≤ 4,4

3.2. Thiết kế cấp phối và chế tạo mẫu

Cấp phối được tính theo phương pháp thể tích tuyệt đối, trong đó tổng thể tích của xi măng, nước, cốt liệu và không khí bằng 1 m³ bê tông. Trong giai đoạn thiết kế cấp phối ban đầu, độ sụt mục tiêu được lựa chọn trong khoảng 70–80 mm, với kích thước cốt liệu lớn nhất (Dmax) là 20 mm. Ở các bước khảo sát tiếp theo, độ sụt thay đổi tùy theo thành phần và tỷ lệ phối hợp các vật liệu.

Cường độ nén quy định ở tuổi 28 ngày là 35 MPa; cường độ mục tiêu trong phòng thí nghiệm có xét hệ số dự phòng 1,15 là 40,3 MPa. Lượng nước ban đầu 200 lít/m³ được giảm 15 % nhờ phụ gia siêu dẻo, còn 170 lít/m³. Tổng lượng chất kết dính tính toán và lựa chọn là 385 kg/m³.

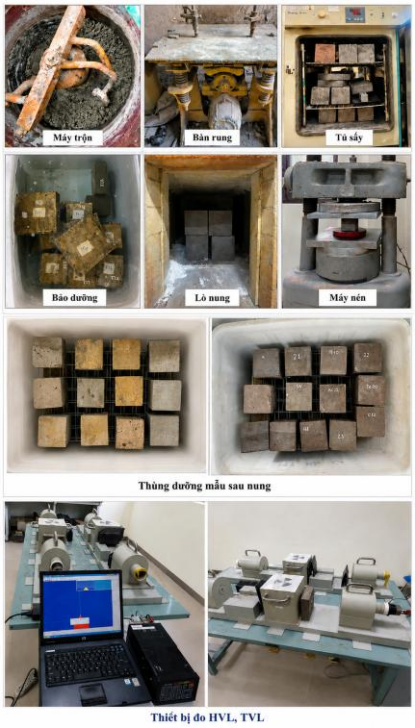
Tỷ lệ thể tích cốt liệu lớn/cốt liệu nhỏ được khảo sát ở bốn mức 65/35, 60/40, 55/45 và 50/50. Sau khi lựa chọn tỷ lệ cốt liệu, hàm lượng chất kết dính được khảo sát tại 347, 385 và 424 kg/m³. Ảnh hưởng của loại cốt liệu được đánh giá với quặng MH Cao Bằng, quặng sắt Trại Cau, quặng sắt Tuyên Quang, barit Bắc Giang và limonit Tuyên Quang.

Đối với hệ PC40/CA50, CA50 được sử dụng thay thế PC40 theo khối lượng từ 0 % đến 100 %, trong khi tổng lượng chất kết dính, lượng nước và thành phần cốt liệu được giữ không đổi. Tro bay và meta cao lanh cũng được thay thế theo phần trăm khối lượng của tổng chất kết dính, với tổng lượng chất kết dính duy trì 385 kg/m³. Riêng cốt liệu chịu lửa cao nhôm được thay thế theo thể tích phần cốt liệu nhỏ; thể tích cát quặng MH bị thay thế được quy đổi sang khối lượng cốt liệu cao nhôm theo khối lượng riêng tương ứng. Trong tính toán thể tích tuyệt đối, thể tích không khí được giả thiết bằng 2,0 % thể tích bê tông; hỗn hợp không sử dụng phụ gia cuốn khí. Các tỷ lệ khảo sát hệ PC40/CA50 được trình bày tại Bảng 2.

Bảng 2. Tỷ lệ khảo sát hệ chất kết dính PC40/CA50.

Thành phần	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8
PC40 (%)	100	90	80	70	60	40	20	0
CA50 (%)	0	10	20	30	40	60	80	100

Các vật liệu được cân theo cấp phối, cốt liệu lớn và cốt liệu nhỏ được trộn sơ bộ, sau đó bổ sung chất kết dính và phụ gia khoáng để trộn khô. Nước trộn và phụ gia siêu dẻo được phối hợp và đưa từ từ vào hỗn hợp; tiếp tục trộn đến khi đồng nhất. Hỗn hợp được kiểm tra độ sụt và khối lượng thể tích, đổ khuôn và đầm rung. Mẫu lập phương 100 × 100 × 100 mm được sử dụng để xác định khối lượng thể tích và cường độ nén; mẫu 150 × 150 × 50 mm được sử dụng để xác định HVL.

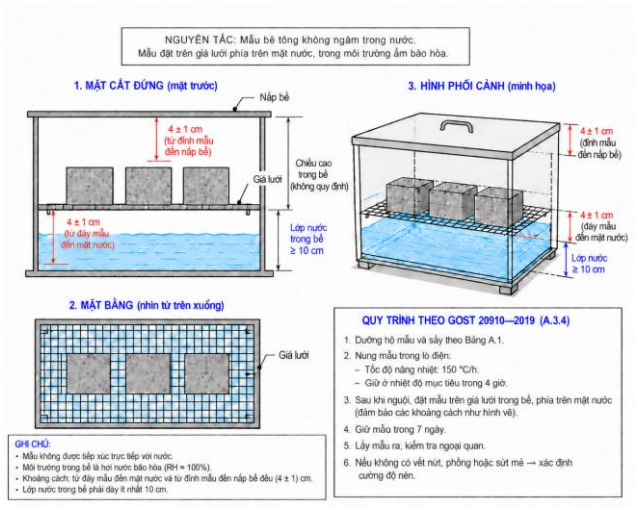


Hình 1. Thiết bị chế tạo, bảo dưỡng và thử nghiệm mẫu bê tông.

3.3. Chế độ nhiệt và phương pháp thử

Mẫu được chế tạo và bảo dưỡng theo tiêu chuẩn TCVN 3105:2022; xác định độ sụt theo TCVN 3106:2022; khối lượng thể tích xác định theo TCVN 3115:2022; cường độ nén xác định theo TCVN 3118:2022.

Nhiệt độ sử dụng tối đa được đánh giá theo GOST 20910-2019. Xác định tỷ lệ cường độ nén dư theo GOST 20910-2019. Mẫu dùng để đánh giá khả năng chịu nhiệt được sấy ở (105 ± 5) ^{0}C, tốc độ tăng nhiệt độ 50 ^{0}C/h, lưu trong 48 giờ. Mẫu sau sấy được nung đến 600 ^{0}C với tốc độ tăng nhiệt 150 ^{0}C/h, lưu nhiệt tại nhiệt độ mục tiêu trong 4h và xác định cường độ nén, tỷ lệ cường độ nén dư cùng ngoại quan.



Hình 2. Mô hình quy trình bảo dưỡng mẫu bê tông sau nung để xác định tỷ lệ cường độ nén dư theo tiêu chuẩn GOST 20910-2019.

3.4. Thiết bị nghiên cứu

Các thiết bị chính được lựa chọn tương ứng với từng công đoạn chế tạo, xử lý nhiệt và đánh giá tính chất của bê tông. Máy trộn bê tông cưỡng bức dung tích 60–100 L, tốc độ trộn 40–60 vòng/phút được dùng để trộn hỗn hợp có cốt liệu nặng. Độ sụt được xác định bằng côn tiêu chuẩn kích thước Ø200/Ø100 × 300 mm. Mẫu được tạo hình bằng bàn rung hoặc đầm dùi có tần số rung khoảng 2.800–3.000 vòng/phút. Tủ sấy có nhiệt độ làm việc đến 250 °C, sai số ±2 °C được dùng để sấy mẫu trước nung; lò nung điện trở có nhiệt độ tối đa 1.200–1.600 °C, sai số ±5 °C được dùng để gia nhiệt mẫu đến 600 °C theo chế độ thử đã xác lập. Cường độ nén được xác định bằng máy nén có tải trọng lớn nhất 2.000–3.000 kN cấp chính xác Class 1.

Hệ đo cản xạ gamma gồm nguồn Co-60 phát hai mức năng lượng 1,17 và 1,33 MeV, đầu dò nhấp nháy NaI (Tl) và bộ phân tích xung đơn kênh SCA. Máy quang phổ nhiễu xạ tia X (D8 Advance-Bruker AXS) được sử dụng để nhận diện biến đổi thành phần pha khoáng; kính hiển vi điện tử quét (Axia ChemiSEM-Thermo Fisher Scientific) được sử dụng để quan sát vi cấu trúc, lỗ rỗng và vết nứt bên trong mẫu.

3.5. Xác định khả năng cản xạ gamma

Khả năng cản gamma được xác định theo phương pháp chùm tia hẹp, sử dụng nguồn Co-60 và đầu dò nhấp nháy NaI (Tl). Nguồn phát hai mức năng lượng gamma 1,173 MeV và 1,333 MeV. Chùm tia được chuẩn trực bằng collimator chì và truyền vuông góc qua mẫu trước khi đến đầu dò. Trình tự đo gồm xác định cửa sổ năng lượng, đo phông, đo cường độ không có mẫu I_0 và đo cường độ truyền qua I với các chiều dày mẫu khác nhau.

Hệ số suy giảm tuyến tính μ và HVL liên hệ theo HVL = ln(2)/μ [15]. Giá trị tại 1,25 MeV được xác định bằng nội suy hệ số suy giảm tuyến tính theo năng lượng để xác định HVL tại năng lượng hiệu dụng trung bình của nguồn Co-60 (1,25 MeV) [16-17].

Theo đó, với $H_1 = HVL_{1,173}$ và $H_2 = HVL_{1,333}$

$$HVL_{1,25} = \frac{1}{\frac{0,51875}{H_1} + \frac{0,48125}{H_2}}$$

Độ không đảm bảo chuẩn được truyền từ hai kết quả đo độc lập $H_1 \pm u_1$ và $H_2 \pm u_2$ theo công thức [17]:

$$u(HVL_{1,25}) = HVL_{1,25}^2 \sqrt{\left(\frac{0,51875\,u_1}{H_1^2}\right)^2 + \left(\frac{0,48125\,u_2}{H_2^2}\right)^2}$$

Kết quả được biểu diễn dưới dạng $HVL_{1,25} \pm u(HVL_{1,25})$, đơn vị cm. Thiết bị đo sử dụng nguồn Co-60, đầu dò NaI (Tl) và hệ phân tích xung.

Bộ tiêu chuẩn ISO 4037 quy định đặc trưng và phương pháp tạo trường bức xạ chuẩn X và gamma, đo liều và hiệu chuẩn thiết bị đo bảo vệ bức xạ [21]. Trong nghiên cứu này, ISO 4037 được sử dụng làm tài liệu đối chiếu về trường bức xạ và hình học đo; tiêu chuẩn này không được viện dẫn như một phương pháp thử trực tiếp HVL của bê tông. Giá trị HVL được xác định từ phép truyền qua chùm tia hẹp với nguồn Co-60, đầu dò NaI (Tl) và hệ phân tích xung theo bố trí thí nghiệm nêu trên. Thí nghiệm tập trung xác định hệ số suy giảm tuyến tính và HVL trong điều kiện hình học chùm tia hẹp. Việc đánh giá hệ số tích tụ thông qua chuỗi phép đo phổ hoặc mô hình vận chuyển photon trong điều kiện hình học chùm tia rộng không thuộc phạm vi nghiên cứu này.

3.6. Phân tích XRD và quan sát SEM

Thành phần pha được khảo sát định tính bằng nhiễu xạ tia X trong khoảng quét 2θ trên hai mẫu có cùng một cấp phối, gồm mẫu tự nhiên ở trạng thái trước nung và mẫu sau nung 600 °C. Việc so sánh được tập trung vào giản đồ nhiễu xạ tia X, sự xuất hiện hoặc không xuất hiện của pha và sự thay đổi vị trí, cường độ tương đối của các đỉnh đặc trưng.

Vi cấu trúc được quan sát bằng kính hiển vi điện tử quét (SEM) ở điện áp gia tốc 10,00 kV. Bốn trường ảnh được lựa chọn theo mức độ thể hiện rõ đặc điểm vi cấu trúc; độ phóng đại và thước tỷ lệ được thể hiện trực tiếp trên từng ảnh. Các trường hợp gồm: mẫu P2 chỉ sử dụng PC40 trước nung; mẫu CP12 dùng hệ chất kết dính PC40–CA50

trước nung; mẫu CP12 dùng hệ PC40–CA50 sau nung 600 °C; và mẫu P2 chỉ sử dụng PC40 sau nung 600 °C. Các ảnh được lựa chọn nhằm so sánh định tính mức độ liên tục của nền chất kết dính, lỗ rỗng và sự hiện diện của vết nứt bên trong mẫu.

4. Kết quả và thảo luận

4.1. Lựa chọn tỷ lệ cốt liệu và hàm lượng chất kết dính

Khi tỷ lệ cốt liệu lớn/cốt liệu nhỏ thay đổi từ 65/35 đến 50/50, độ sụt tăng từ 30 mm lên 75 mm. Khối lượng thể tích và cường độ nén không tăng liên tục mà đạt giá trị cao nhất tại tỷ lệ 55/45. Cấp phối P2 ở tỷ lệ 55/45 đạt độ sụt 72 mm, khối lượng thể tích 28 ngày 3.638 kg/m^3 và cường độ nén 28 ngày 45,0 MPa. Vì vậy, tỷ lệ 55/45 được lựa chọn cho các khảo sát tiếp theo.

Khi tăng chất kết dính từ 347 lên 424 kg/m^3, cường độ nén 28 ngày tăng ở cả hệ PC40 và CA50, trong khi khối lượng thể tích thay đổi không lớn. Mức 385 kg/m^3 bảo đảm cường độ cao hơn mác thiết kế 35 MPa và cân bằng giữa tính công tác, cường độ và lượng vật liệu sử dụng; do đó được lựa chọn làm cấp phối nền.

4.2. Ảnh hưởng của loại cốt liệu nặng

Với cùng tỷ lệ thể tích cốt liệu 55/45 và 385 kg/m^3 PC40, các cấp phối sử dụng các loại cốt liệu nặng có độ sụt 70–85 mm, khối lượng thể tích 28 ngày 3.040–3.638 kg/m^3 và cường độ nén 41,5–46,5 MPa. Bê tông quặng MH Cao Bằng đạt khối lượng thể tích lớn nhất 3.638 kg/m^3; bê tông barit đạt 3.245 kg/m^3 và bê tông limonit đạt 3.040 kg/m^3.

Bảng 3. Kết quả khảo sát cốt liệu nặng.

Mẫu	Cốt liệu	Độ sụt (mm)	KLTT 28 ngày (kg/m^3)	R28 (MPa)	HVL 1,25 MeV (cm)
Ba	Barit Bắc Giang	85	3.245	41,5	4,17 ± 0,30
P2	Quặng MH Cao Bằng	72	3.638	45,0	3,48 ± 0,19
P2TC	Quặng MH Trại Cau	70	3.488	46,2	3,72 ± 0,29
P2TQ	Quặng MH Tuyên Quang	75	3.465	46,5	3,23 ± 0,27
Li	Limonit Tuyên Quang	70	3.040	44,8	4,87 ±0,36
BTT	Bê tông thường	100	2.400	39,0	5,68 ± 0,37

Giá trị HVL tại 1,25 MeV của bê tông quặng MH Cao Bằng là (3,48 ± 0,19) cm, thấp hơn bê tông barit (4,17 ± 0,30) cm và bê tông thường (5,68 ± 0,37) cm. Trên cơ sở khối lượng thể tích, cường độ và HVL, quặng MH Cao Bằng được lựa chọn làm cốt liệu chính cho bước tiếp theo trong phạm vi nguồn vật liệu của đề tài.

4.3. Ảnh hưởng của tỷ lệ PC40/CA50

Thời gian đông kết của hệ kết dính được thử nghiệm theo TCVN 6017:2015. Kết quả nghiên cứu cho thấy, thời gian đông kết của hệ chất kết dính thay đổi phi tuyến theo tỷ lệ phối hợp. Khi CA50 tăng từ 0 % đến 40 %, thời gian bắt đầu đông kết giảm từ 180 phút xuống 12 phút và thời gian kết thúc đông kết giảm từ 210 phút xuống 22 phút. Ở 60 % CA50, thời gian bắt đầu/kết thúc đông kết là 15/25 phút. Khi CA50 tăng lên 80 % và 100 %, các giá trị này tăng trở lại lần lượt là 80/105 phút và 155/175 phút. Thời gian đông kết bị rút ngắn có thể liên quan đến tương tác giữa các thành phần aluminat của CA50 với các thành phần chứa canxi và sunfat trong PC40, thúc đẩy sự hình thành các sản phẩm thủy hóa ở giai đoạn đầu, đặc biệt là ettringite. Khi hàm lượng CA50 tiếp tục tăng, quá trình thủy hóa chuyển dần sang đặc trưng của xi măng canxi alumin, làm thay đổi tốc độ hình thành các sản phẩm thủy hóa và thời gian đông kết của hệ chất kết dính.

Cường độ hệ chất kết dính cũng biến đổi phi tuyến theo tỷ lệ. Ở 10 % CA50, cường độ sớm tăng nhẹ so với PC40, trong khi cường độ 28 ngày giảm từ 45,8 MPa xuống 43,6 MPa. Vùng 40–60 % CA50 cho cường độ thấp nhất; tại 60 % CA50, R28 là 21,4 MPa. Khi CA50 đạt 80–100 %, cường độ tăng trở lại; mẫu 100 % CA50 đạt R28 bằng 44,8 MPa.

Kết quả trên mẫu bê tông được tổng hợp tại Bảng 4. Khi hàm lượng CA50 tăng, tỷ lệ cường độ nén dư tăng từ 63,4 % của P2 lên 91,1 % của C2. Tuy nhiên, cường độ ở điều kiện thường giảm mạnh trong vùng 40–60 % CA50. Các cấp phối sử dụng 20–30 % CA50 đạt sự cân bằng giữa cường độ ở điều kiện thường, cường độ sau nung, tỷ lệ cường độ dư và ngoại quan.

Trong phạm vi các cấp phối khảo sát, CP12 đạt cường độ nén trước và sau nung cao hơn CP13. CP16 có tỷ lệ cường độ nén dư cao hơn CP12 nhưng sử dụng hàm lượng CA50 lớn hơn đáng kể. Xét đồng thời cường độ nén, khả năng chịu nhiệt, ngoại quan sau nung và hàm lượng CA50, CP12 được lựa chọn là cấp phối có sự cân bằng phù hợp giữa các yếu tố này trong phạm vi nghiên cứu.

4.4. Khả năng cản gamma trước và sau nung

Các mẫu CP12, CP13 và CP14 được đo ở trạng thái tự nhiên và sau nung 600 °C. Kết quả tại 1,25 MeV được trình bày ở Bảng 5. Sau nung, HVL của cả ba cấp phối tăng nhẹ, phản ánh xu hướng giảm khả năng cản gamma sau tác động nhiệt trong phạm vi thử nghiệm. CP13 có mức tăng nhỏ nhất; HVL sau nung của CP12 và CP13 gần tương đương.

Bảng 4. Cấp phối và kết quả bê tông theo tỷ lệ PC40/CA50.

Mẫu	PC40/CA50 (kg/m^3)	Độ sụt (mm)	KLTT 28 ngày (kg/m^3)	R28 (MPa)	R28,600 (MPa)	Tỉ lệ cường độ nén dư (%)	Ngoại quan
P2	385/0	72	3.638	45,0	32,5	63,4	Rạn nhỏ
CP11	349/36	72	3.630	42,5	34,5	72,6	Rạn nhỏ
CP12	308/77	60	3.615	38,8	33,8	79,1	Không rạn nứt
CP13	270/116	55	3.605	35,5	32,1	81,0	Không rạn nứt
CP14	231/154	30	3.597	28,7	26,5	81,7	Không rạn nứt
CP15	154/231	30	3.595	28,2	24,9	84,9	Không rạn nứt
CP16	77/308	65	3.645	37,5	36,0	86,1	Không rạn nứt
C2	0/385	70	3.652	40,8	46,5	91,1	Không rạn nứt

Bảng 5. HVL của bê tông sử dụng hệ PC40/CA50.

Mẫu	Trạng thái	HVL 1,17 MeV (cm)	HVL 1,33 MeV (cm)	HVL 1,25 MeV (cm)
CP12TN	Tự nhiên	3,23 ± 0,26	3,36 ± 0,26	3,29 ± 0,18
CP13TN	Tự nhiên	3,20 ± 0,31	3,46 ± 0,30	3,32 ± 0,22
CP14TN	Tự nhiên	3,10 ± 0,31	3,21 ± 0,32	3,15 ± 0,22
CP12N	Sau nung 600 °C	3,49 ± 0,30	3,60 ± 0,30	3,54 ± 0,21
CP13N	Sau nung 600 °C	3,41 ± 0,30	3,64 ± 0,30	3,52 ± 0,21
CP14N	Sau nung 600 °C	3,59 ± 0,33	3,78 ± 0,33	3,68 ± 0,23

Đối với CP12, HVL tại 1,25 MeV tăng từ (3,29 ± 0,18) cm lên (3,54 ± 0,21) cm sau nung. Giá trị HVL trung tâm tăng khoảng 7,6 % sau nung, tương ứng 0,25 cm so với trước khi nung. Nghiên cứu ghi nhận đồng thời sự mất nước, giảm khối lượng thể tích, biến đổi tập hợp pha nhận diện bằng XRD và thay đổi hình thái vi cấu trúc trên ảnh SEM. Sự gia tăng HVL được nhận định là kết quả của tác động tổng hợp từ các biến đổi do nhiệt. Trên cơ sở đánh giá đồng thời các tính chất cơ lý, trạng thái ngoại quan và khả năng che chắn bức xạ gamma, cấp phối CP12 được lựa chọn làm cấp phối nền.

Giá trị HVL xác định trên mẫu thí nghiệm được sử dụng để so sánh khả năng che chắn bức xạ gamma giữa các cấp phối và cung cấp dữ liệu đầu vào cho tính toán thiết kế kết cấu che chắn. Khi áp dụng cho kết cấu thực tế, chiều dày che chắn cần được xác định thông qua tính toán thiết kế, có xét đến phổ năng lượng và cường độ nguồn bức xạ, hình học và hướng chiếu, kích thước cấu kiện, đặc điểm mối nối, biến động về khối lượng thể tích và độ ẩm của bê tông, bức xạ tán xạ, hệ số tích tụ và hệ số an toàn thiết kế.

4.5. Ảnh hưởng của cốt liệu chịu lửa và phụ gia khoáng

Bảng 6 trình bày kết quả so sánh cấp phối nền CP12 với các cấp phối CL4, TB10 và MK10. Trong đó, CL4 sử dụng cốt liệu chịu lửa thay thế 40 % cốt liệu MH 0-5mm; TB10, MK10 thay 10 % tổng chất kết dính.

So với CP12, việc sử dụng cốt liệu chịu lửa trong CL4 làm khối lượng thể tích 28 ngày giảm từ 3.615 xuống 3.254 kg/m^3 và cường độ nén giảm từ 38,8 xuống 33,5 MPa. Tuy nhiên, tỷ lệ cường độ nén dư của CL4 đạt 88,1 %, cao hơn CP12 là 79,1 %. Ở trạng thái trước nung, HVL của CL4 là (3,78 ± 0,26) cm, cao hơn CP12 là (3,29 ± 0,18) cm; sau nung ở 600 °C, các giá trị tương ứng là (3,99 ± 0,32) cm và (3,54 ± 0,21) cm. Như vậy, CL4 có khả năng duy trì cường độ sau tác động nhiệt tương đối tốt nhưng hiệu quả chắn xạ thấp hơn CP12, phù hợp với sự suy giảm khối lượng thể tích khi một phần cốt liệu manhetit được thay bằng cốt liệu chịu lửa.

Việc sử dụng 10 % tro bay trong TB10 làm tăng độ sụt lên 75 mm và cường độ nén 28 ngày lên 42,4 MPa. Cường độ sau nung đạt 39,0 MPa, tỷ lệ cường độ nén dư đạt 85,3 % và HVL tăng nhẹ từ mức (3,43 ± 0,23) cm lên (3,49 ± 0,24) trước và sau nung. Kết quả cho thấy TB10 có tính công tác tốt và khả năng chắn xạ tương đối ổn định sau tác động nhiệt.

MK10 đạt cường độ nén cao nhất cả trước và sau nung, tương ứng 42,7 MPa và 41,5 MPa; tỷ lệ cường độ nén dư đạt 88,1 %. HVL của MK10 tăng từ (3,26 ± 0,27) cm lên (3,40 ± 0,28) cm sau nung nhưng vẫn thấp nhất trong các cấp phối được khảo sát. Xét đồng thời các chỉ tiêu cơ học, khả năng duy trì cường độ sau tác động nhiệt và hiệu quả chắn xạ, MK10 có đặc tính tổng hợp phù hợp và triển vọng nhất trong phạm vi các cấp phối được chọn.

Bảng 6. Ảnh hưởng của cốt liệu chịu lửa và phụ gia khoáng.

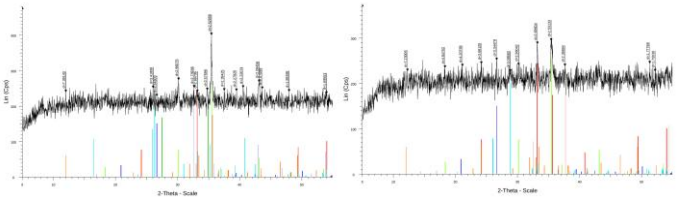
Chỉ tiêu	CP12	CL4	TB10	MK10
Quặng MH 5–20 mm (kg/m^3)	1.735	1.735	1.735	1.735
Quặng MH 0–5 mm (kg/m^3)	1.404	843	1.404	1.404
Cốt liệu chịu lửa 0–5 mm (kg/m^3)	–	414	–	–
PC40 (kg/m^3)	308	308	277	277
CA50 (kg/m^3)	77	77	69	69
Tro bay (kg/m^3)	–	–	39	–
Meta cao lanh (kg/m^3)	–	–	–	39
Độ sụt (mm)	60	55	75	60
KLTT 28 ngày (kg/m^3)	3.615	3.254	3.628	3.610
R28 (MPa)	38,8	33,5	42,4	42,7
R28 sau nung tại 600 °C (MPa)	33,8	30,5	39,0	41,5
Tỷ lệ cường độ nén dư (%)	79,1	88,1	85,3	88,1
HVL 1,25 MeV (cm)	3,29 ± 0,18	3,78 ± 0,26	3,43 ± 0,23	3,26 ± 0,27
KLTT 28 ngày, sau nung 600 °C (kg/m^3)	3.421	3.115	3.450	3.432
HVL 1,25 MeV, sau nung 600 °C (cm)	3,54 ± 0,21	3,99 ± 0,32	3,49 ± 0,24	3,40 ± 0,28

4.6. Biến đổi thành phần pha trước và sau nung 600 °C

Phân tích nhiễu xạ tia X (XRD) được thực hiện ở mức định tính nhằm đối chiếu các pha được nhận diện, vị trí và cường độ tương đối của các đỉnh trước và sau nung ở 600 °C (Hình 3).

Trước nung, các pha được phần mềm nhận diện gồm magnetit (Fe_3O_4), hematit (Fe_2O_3), thạch anh (SiO_2), srebrodolskit ($Ca_2Fe_2O_5$), mullit và magnesit ($MgCO_3$). Các đỉnh nổi bật tương ứng với khoảng cách mặt mạng d xấp xỉ 3,418; 2,961; 2,697 và 2,529 Å; trong đó, đỉnh tại d ≈ 2,529 Å có cường độ lớn nhất.

Sau nung, magnetit, hematit, thạch anh và srebrodolskit vẫn được nhận diện. Hai đỉnh nổi bật tại d ≈ 2,696 và 2,531 Å gần trùng với các đỉnh tương ứng trước nung. Sự khác biệt về một số pha được nhận diện và cường độ tương đối của các đỉnh cho thấy dấu hiệu biến đổi thành phần pha dưới tác động nhiệt; tuy nhiên, chưa đủ cơ sở để khẳng định sự hình thành hoặc biến mất hoàn toàn của từng pha.



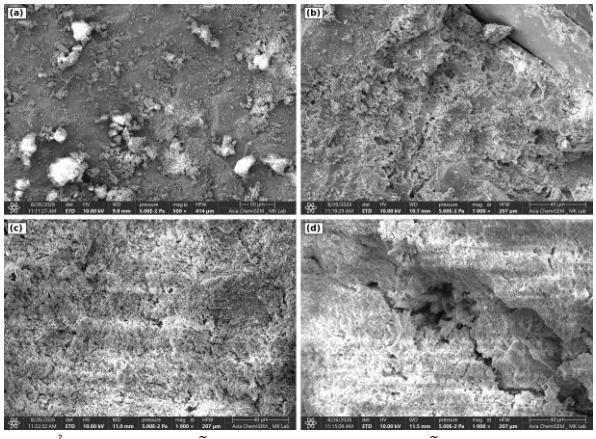
Hình 3. Giản đồ nhiễu xạ XRD của mẫu CP12: (trái) trước nung; (phải) sau nung 600 °C.

4.7. Biến đổi vi cấu trúc sau nung 600 °C

Ảnh SEM được sử dụng để so sánh định tính vi cấu trúc của hai hệ chất kết dính trước và sau nung ở 600 °C (Hình 4). Trước nung, mẫu P2 chỉ sử dụng PC40 thể hiện nền có các vùng tương đối phẳng xen kẽ các cụm hạt và lỗ rỗng cục bộ. Mẫu CP12 sử dụng hệ PC40–CA50 trước nung có nền liên tục hơn trên trường ảnh được chọn, với các sản phẩm dạng sợi hoặc dạng mạng phân bố trên bề mặt; không quan sát thấy khe nứt xuyên qua nền trong trường ảnh này.

Sau nung 600 °C, bề mặt của cả hai hệ trở nên thô ráp hơn và xuất hiện các vùng rỗng do sự thay đổi của nền chất kết dính. Tuy nhiên, mức độ toàn vẹn quan sát được khác nhau. Ở mẫu CP12 dùng hệ PC40–CA50, cấu trúc vẫn liên tục trên trường ảnh được lựa chọn và không ghi nhận vết nứt bên trong. Ngược lại, mẫu P2 chỉ sử dụng PC40 xuất hiện một vết nứt nhỏ chạy qua nền chất kết dính. Dấu hiệu này phù hợp với kết quả đánh giá ngoại quan và tính chất cơ học thu được trong nghiên cứu: mẫu P2 có rạn nhỏ sau nung và tỷ lệ cường độ nén dư 63,4 %, trong khi CP12 chứa 20 % CA50 không rạn nứt và đạt tỷ lệ cường độ nén dư 79,1 %.

Kết quả SEM cho thấy tác động nhiệt ở 600 °C làm thay đổi hình thái nền và làm tăng biểu hiện rỗng, không đồng nhất. Việc bổ sung CA50 trong hệ chất kết dính hỗn hợp gắn với khả năng duy trì tính liên tục của nền tốt hơn trên các trường ảnh được khảo sát. Trên ảnh (d), vết nứt nhỏ được nhận diện ở vùng giữa–phía dưới trường ảnh, chạy qua nền chất kết dính. Bốn ảnh được lựa chọn theo cùng logic so sánh hai hệ chất kết dính trước và sau nung. Độ phóng đại của các ảnh: (a) 500 lần; (b), (c), (d) 1.000 lần. Mỗi ảnh chỉ đại diện cho trường quan sát được lựa chọn, không đại diện thống kê cho toàn bộ mẫu; việc định lượng độ rỗng và mật độ vết nứt chưa được thực hiện trong nghiên cứu này nên kết luận SEM được giới hạn ở hiện tượng quan sát thấy và được đối chiếu với cường độ nén, mất khối lượng và ngoại quan sau nung [18-20].



Hình 4. Ảnh SEM (a) mẫu P2 trước nung; (b) mẫu CP12 trước nung; (c) CP12 sau nung 600 °C, không quan sát thấy vết nứt trong trường ảnh; (d) P2 sau nung 600 °C, vết nứt nhỏ ở vùng giữa–phía dưới trường ảnh.

5. Kết luận

Từ kết quả trong phạm vi nghiên cứu, có thể rút ra các kết luận sau:

Trong phạm vi nguồn vật liệu, tỷ lệ thành phần, chế độ bảo dưỡng, chế độ nhiệt và quy mô phòng thí nghiệm đã khảo sát, tỷ lệ thể tích cốt liệu lớn/cốt liệu nhỏ 55/45 và tổng hàm lượng chất kết dính 385 kg/m^3 tạo sự cân bằng phù hợp giữa tính công tác, khối lượng thể tích và cường độ. Bê tông sử dụng quặng MH Cao Bằng đạt khối lượng thể tích 28 ngày 3.638 kg/m^3, cường độ nén 45,0 MPa và HVL tại 1,25 MeV bằng (3,48 ± 0,19) cm, nên được lựa chọn làm hệ cốt liệu chính cho các thí nghiệm tiếp theo của nghiên cứu.

Loại và tỷ lệ chất kết dính ảnh hưởng rõ đến khả năng chịu nhiệt. Bê tông sử dụng hoàn toàn CA50 đạt tỷ lệ cường độ nén dư 91,1 %, cao hơn mẫu PC40 là 63,4 %, và không xuất hiện rạn nứt sau nung. Tuy nhiên, vùng 40–60 % CA50 bất lợi đối với thời gian đông kết và cường độ ở điều kiện thường. Khi xem xét đồng thời tính công tác, cường độ và ngoại quan sau nung, hàm lượng CA50 khoảng 20–30 % cho sự cân bằng hợp lý.

Cấp phối CP12 với 308 kg/m^3 PC40 và 77 kg/m^3 CA50 đạt độ sụt 60 mm, khối lượng thể tích 28 ngày 3.615 kg/m^3, R28 bằng 38,8 MPa, R28 sau nung 600 °C bằng 33,8 MPa, tỷ lệ cường độ nén dư 79,1 % và không rạn nứt sau nung. HVL tại 1,25 MeV của CP12 là (3,29 ± 0,18) cm ở trạng thái tự nhiên và (3,54 ± 0,21) cm sau nung. CP12 được lựa chọn làm cấp phối nền trong phạm vi vật liệu và điều kiện thí nghiệm của nghiên cứu.

Trong các cấp phối khảo sát, MK10 thể hiện đặc tính tổng hợp tốt nhất nhờ đạt cường độ cao, tỷ lệ cường độ nén dư lớn và HVL thấp cả trước và sau nung. TB10 có ưu điểm về tính công tác và duy trì ổn định HVL sau nung, trong khi việc sử dụng cốt liệu chịu lửa trong CL4 làm giảm khối lượng thể tích và hiệu quả chắn xạ so với các cấp phối sử dụng hoàn toàn cốt liệu manhetit.

Kết quả phân tích định tính bằng XRD của cùng một cấp phối trước và sau nung cho thấy có sự thay đổi về thành phần pha được nhận diện sau khi nung tại 600 °C. Trong trường ảnh chụp SEM được khảo sát, mẫu P2 sử dụng PC40 xuất hiện vết nứt nhỏ bên trong sau nung, trong khi trường ảnh của mẫu CP12 sử dụng hệ kết dính PC40–CA50 không ghi nhận vết nứt; kết quả này thống nhất với xu hướng cường độ nén dư và ngoại quan của hai hệ.

Trong phạm vi vật liệu và điều kiện thí nghiệm của nghiên cứu, có thể chế tạo bê tông có khối lượng thể tích lớn hơn 3.000 kg/m^3, cường độ nén ở điều kiện thường lớn hơn 30 MPa, cường độ nén sau nung 600 °C lớn hơn 25 MPa và duy trì khả năng cản tia gamma theo mục tiêu đặt ra. Việc chuyển cấp phối sang nguồn vật liệu hoặc quy mô sản xuất khác cần được tính toán lại theo thể tích tuyệt đối và kiểm chứng bằng mẻ trộn thử.

Lời cảm ơn

Bài báo này là một phần kết quả nghiên cứu của nhiệm vụ KH&CN cấp bách cấp Bộ trong lĩnh vực điện hạt nhân: “Nghiên cứu chế tạo bê tông chịu nhiệt cản xạ phục vụ xây dựng nhà máy điện hạt nhân tại Việt Nam”, mã số RD.07-25. Nhóm tác giả trân trọng cảm ơn Bộ Xây dựng đã tạo điều kiện và hỗ trợ nhóm nghiên cứu thực hiện nhiệm vụ.

Tài liệu tham khảo

[1]. International Atomic Energy Agency (IAEA), Radiation Protection Aspects of Design for Nuclear Power Plants, IAEA Safety Standards Series No. NS-G-1.13. Vienna: IAEA, 2005.

[2]. A. M. Onaizi et al., “Radiation-shielding concrete: A review of materials, performance, and the impact of radiation on concrete properties,” Journal of Building Engineering, vol. 97, 110800, 2024.

[3]. S. O. Ekolu and M. A. Ramushu, “Material selection and mix design of radiation shielding concrete,” in Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting IV, 2016, pp. 404–410.

[4]. C. Thomas, J. Rico, P. Tamayo, F. Ballester, J. Setién, and J. Polanco, “Effect of elevated temperature on the mechanical properties and microstructure of heavy-weight magnetite concrete with steel fibers,” Cement and Concrete Composites, vol. 103, pp. 80–91, 2019.

[5]. K. Sakr and E. El-Hakim, “Effect of high temperature or fire on heavy weight concrete properties,” Cement and Concrete Research, vol. 35, no. 3, pp. 590–596, 2005.

[6]. X. Huang, Z. Chen, Q. Tao, L. Xie, D. Jin, and D. Wu, “Effect of magnetite concrete on splitting tensile strength and gamma ray shielding performance exposed to repeated heating at high temperature,” Materials, vol. 16, no. 7, 2592, 2023.

[7]. D. Madeja et al., “Effect of temperature on gamma radiation shielding capabilities of bauxite-based refractory concrete,” Cement and Concrete Composites, vol. 152, 105608, 2024.

[8]. L. Luo et al., “Effects of high temperatures on the splitting tensile strength and gamma ray shielding performance of radiation shielding concrete,” Construction and Building Materials, vol. 343, 127953, 2022.

[9]. E. Horszczaruk, P. Sikora, and P. Zaporowski, “Mechanical properties of shielding concrete with magnetite aggregate subjected to high temperature,” Procedia Engineering, vol. 108, pp. 39–46, 2015.

[10]. ASTM International, ASTM C637-26: Standard Specification for High-Density Aggregates for Concrete. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2026.
[11]. GOST R 70222-2022, Extra heavy-weight concretes. Specifications.
[12]. GOST 20910-2019, Refractory concretes – Specifications.
[13]. ACI 304.3R-20, Heavyweight Concrete: Measuring, Mixing, Transporting, and Placing. ACI Committee 304.
[14]. ACI PRC-211.1-22, Selecting Proportions for Normal-Density and High-Density Concrete Guide. ACI Committee 211.
[15]. J. H. Hubbell, *Photon Cross Sections, Attenuation Coefficients, and Energy Absorption Coefficients from 10 keV to 100 GeV*. Washington, D.C.: National Bureau of Standards, NSRDS-NBS 29, 1969.
[16]. Berger, M. J., & Hubbell, J. H. (1987). *XCOM: Photon Cross Sections on a Personal Computer*. NBSIR 87-3597, National Bureau of Standards, Gaithersburg, MD. DOI: 10.6028/NBS.IR.87-3597.
[17]. JCGM 100:2008, Evaluation of measurement data – Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM), mục 5.1.
[18]. T. C. Ling and C. S. Poon, “High temperatures properties of barit concrete with cathode ray tube funnel glass,” Fire and Materials, vol. 38, no. 3, pp. 385–397, 2014.
[19]. A.-L. Beaucour et al., “Influence of elevated temperature on properties of radiation shielding concrete with electric arc furnace slag as coarse aggregate,” Construction and Building Materials, vol. 256, 119385, 2020.
[20]. M. A. Tantawy, “Effect of High Temperatures on the Microstructure of Cement Paste,” Journal of Materials Science and Chemical Engineering, vol. 5, no. 11, pp. 33–48, 2017.
[21]. ISO 4037-1:2019, Radiological protection — X and gamma reference radiation for calibrating dosemeters and doserate meters and for determining their response as a function of photon energy — Part 1: Radiation characteristics and production methods.