

# Ảnh hưởng của điều kiện dưỡng hộ CO<sub>2</sub> đến cường độ, mức độ cacbonat hóa và biến đổi vi cấu trúc của gạch xây không nung

Lê Văn Quang<sup>1</sup>, Nguyễn Huy Dũng<sup>1</sup>, Huỳnh Trọng Phước<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup> Phân Viện Vật liệu xây dựng miền Nam

<sup>2</sup> Trường Bách Khoa – Đại học Cần Thơ

## TỪ KHOÁ

Gạch xây không nung  
Dưỡng hộ CO<sub>2</sub>  
Cường độ chịu nén  
Cacbonat hóa  
Vi cấu trúc

## TÓM TẮT

Việc giảm phát thải khí CO<sub>2</sub> trong ngành công nghiệp xây dựng đang trở thành yêu cầu cấp thiết nhằm hướng đến mục tiêu phát triển bền vững. Trong bối cảnh đó, dưỡng hộ vật liệu bằng khí CO<sub>2</sub> là một giải pháp công nghệ mới đầy triển vọng, vừa góp phần hấp thụ khí nhà kính, vừa cải thiện chất lượng sản phẩm. Nghiên cứu này tập trung đánh giá hiệu quả của phương pháp dưỡng hộ CO<sub>2</sub> đối với gạch không nung xi măng cốt liệu (GKN) mác M15, sản xuất theo công nghệ rung ép. Thí nghiệm được thực hiện với các điều kiện dưỡng hộ về áp suất CO<sub>2</sub> (2 bar) và thời gian tiếp xúc (6, 12, 18, 24 giờ) ở nhiệt độ khí quyển, so sánh với mẫu đối chứng dưỡng hộ truyền thống. Các chỉ tiêu được đánh giá bao gồm: cường độ nén tại 3, 7 và 28 ngày; cường độ uốn; độ hút nước; chiều sâu cacbonat hóa; cùng với phân tích vi cấu trúc bằng SEM và XRD. Kết quả cho thấy mẫu dưỡng hộ CO<sub>2</sub> đạt cường độ nén trung bình cao hơn từ 33–61 % tại 3 ngày và từ 16–23 % tại 28 ngày so với mẫu đối chứng. Độ hút nước giảm từ 11,3 % xuống còn 8,5 %; chiều sâu cacbonat hóa sau 24 giờ dưỡng hộ đạt đến 18 mm. Phân tích XRD cho thấy sự hình thành mạnh mẽ của các pha calcite và vaterite, trong khi SEM cho thấy cấu trúc vi mô chặt hơn, lỗ rỗng được lấp đầy bởi sản phẩm cacbonat hóa. Dưỡng hộ CO<sub>2</sub> là giải pháp khả thi để nâng cao chất lượng và tuổi thọ của GKN mác M15, đồng thời góp phần giảm phát thải khí nhà kính trong sản xuất vật liệu xây dựng.

## KEYWORDS

Unfired building blocks  
CO<sub>2</sub> curing  
Compressive strength  
Carbonation  
Microstructure

## ABSTRACT

The reduction of CO<sub>2</sub> emissions in the construction industry has become an urgent requirement in pursuit of sustainable development goals. In this context, CO<sub>2</sub> curing of concrete emerges as a promising technological solution, contributing both to greenhouse gas sequestration and to product quality enhancement. This study focuses on evaluating the effectiveness of CO<sub>2</sub> curing on cement-based non-fired building blocks (NBB) grade M15 and manufactured by vibration-pressing technology. Experiments were conducted under varying curing conditions, including CO<sub>2</sub> pressure (2 bar) and exposure durations (6, 12, 18, and 24 hours) at ambient temperature, compared to traditional water-cured control samples. The evaluated parameters include compressive strength at 3, 7, and 28 days; flexural strength; water absorption; carbonation depth; and microstructural characteristics analyzed via SEM and XRD. The results show that CO<sub>2</sub>-cured samples achieved 33–61% higher compressive strength at 3 days and 16–23% higher at 28 days compared to the control. Water absorption decreased from 11.3% to 8.5%, while carbonation depth reached up to 18 mm after 24 hours of curing. XRD analysis revealed strong formation of calcite and vaterite phases, while SEM images indicated a denser microstructure with pores filled by carbonation products. CO<sub>2</sub> curing is thus a feasible solution to improve the quality and durability of the grade M15 NBBs, while simultaneously contributing to greenhouse gas mitigation in building material production.

## 1. Giới thiệu

Ngành công nghiệp xây dựng đóng vai trò trụ cột trong phát triển kinh tế – xã hội nhưng cũng là một trong những lĩnh vực phát thải CO<sub>2</sub> lớn nhất, chiếm khoảng 7–8 % tổng lượng phát thải toàn cầu, chủ yếu từ quá trình sản xuất clinker xi măng và tiêu thụ năng lượng trong chế tạo vật liệu gốc khoáng [1]. Sức ép từ các mục tiêu phát triển bền vững

(SDGs) và cam kết trung hòa carbon buộc ngành xây dựng phải tìm kiếm các giải pháp công nghệ vừa giảm thiểu phát thải, vừa cải thiện hiệu suất và độ bền của vật liệu [2]. Trong bối cảnh đó, dưỡng hộ CO<sub>2</sub> nổi lên như một công nghệ đầy triển vọng, mang lại lợi ích kép: hấp thụ và cố định CO<sub>2</sub> ngay trong cấu kiện xi măng, đồng thời nâng cao cường độ, độ bền và tuổi thọ sản phẩm [3]. Cơ chế của phương pháp này dựa trên phản ứng cacbonat hóa sớm, trong đó CO<sub>2</sub> khuếch tán vào

\*Liên hệ tác giả: [htphuoc@ctu.edu.vn](mailto:htphuoc@ctu.edu.vn)

Nhận ngày 18/08/2025, sửa xong ngày 05/09/2025, chấp nhận đăng ngày 08/09/2025

Link DOI: <https://doi.org/10.54772/jomc.06.2025.1082>

lỗ rỗng mao quản và phản ứng trực tiếp với portlandite [ $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ] cùng các pha giàu canxi trong sản phẩm thủy hóa để hình thành canxi cacbonat ( $\text{CaCO}_3$ ) [4]. Sự kết tinh  $\text{CaCO}_3$  không chỉ làm lấp đầy hệ mao quản mà còn tái cấu trúc gel C–S–H, giúp tăng độ đặc chắc, giảm tính thấm và cải thiện tính chất cơ học [5].

Những tiến bộ gần đây trong công nghệ đường hô  $\text{CO}_2$  đã mở rộng đáng kể khả năng ứng dụng đối với các hệ xi măng khác nhau, tập trung mạnh vào tối ưu hóa hiệu quả cơ học và tính bền vững môi trường. Cho và cộng sự [6] đã chứng minh rằng việc bổ sung nước nhiều lần trong quá trình đường hô giúp gia tăng đáng kể khả năng hấp thụ  $\text{CO}_2$ , thúc đẩy phát triển tinh thể và cải thiện cường độ chịu nén của hệ chất kết dính canxi thấp, cho thấy vai trò then chốt của độ ẩm trong việc duy trì động học cacbonat hóa. Các nghiên cứu đánh giá vòng đời của Huang và cộng sự [7] cũng đã cho thấy tiềm năng giảm phát thải  $\text{CO}_2$  đến 30 % thông qua khoáng hóa  $\text{CO}_2$ , khẳng định vai trò kép của công nghệ này trong việc vừa tăng hiệu suất vừa giảm phát thải.

Li và cộng sự [8] nhấn mạnh độ ẩm môi trường là yếu tố then chốt đối với hệ xi măng đá vôi – đất sét nung (LC3), trong đó độ ẩm cao giúp tăng cường độ nén gần 19 % tại 28 ngày. Tjong và cộng sự [9] đã xác định rằng áp lực ép và tỷ lệ nước/xi măng chi phối trực tiếp sự bão hòa lỗ rỗng và hiệu suất cacbonat hóa, với điều kiện tối ưu có thể đạt cường độ nén trên 20 MPa chỉ trong thời gian đường hô ngắn. Xu và cộng sự [10] chỉ ra nhiệt độ, độ ẩm và nồng độ  $\text{CO}_2$  phối hợp quyết định tốc độ và độ sâu cacbonat hóa, trong khi Xuan và cộng sự [11] đã đề xuất mô hình độ chín (maturity model) để dự đoán cường độ chính xác hơn so với các quan hệ thực nghiệm.

Ngoài hệ xi măng Poóc-lăng thông thường (OPC), công nghệ đường hô  $\text{CO}_2$  đã chứng minh hiệu quả rõ rệt trong các hệ vật liệu tái chế và thân thiện môi trường. Liu và cộng sự [12] tái chế bùn xử lý nước thành khối bê tông xanh qua cacbonat hóa, đạt cường độ tương đương OPC đồng thời giảm rò rỉ kim loại nặng xuống dưới ngưỡng US-EPA. Liu và cộng sự [4] đã làm rõ cơ chế vi cấu trúc của bê tông lỗ rỗng từ chất thải rắn, ghi nhận mức giảm 25 % độ rỗng sau đường hô. Song và cộng sự [13] cho thấy bê tông khối sau đường hô  $\text{CO}_2$  có khả năng chịu nhiệt tốt hơn, với cường độ ở 600 °C cao hơn so với mẫu chuẩn. Merino-Lechuga và cộng sự [14] kết hợp chất kết dính kiềm hoạt hóa với cốt liệu tái chế, thu được cường độ 14–16 MPa đồng thời giảm 49 % lượng  $\text{CO}_2$  phát thải hàm chứa. Shi và cộng sự [15] nghiên cứu khối bê tông nhẹ, ghi nhận cải thiện về độ bền và khả năng chống phong hóa trong điều kiện cacbonat hóa tăng tốc. Tang và cộng sự [16] chỉ ra rằng cốt liệu tái chế giàu silica fume khi đường hô  $\text{CO}_2$  đạt cường độ cao hơn và giảm hút nước rõ rệt. Zhang và cộng sự [17] tối ưu công nghệ đường hô  $\text{CO}_2$  cho hệ chứa thạch cao và xi BOF, với mức hấp thụ  $\text{CO}_2$  lên đến 38 kg/tấn và giảm 96 % tiềm năng nóng lên toàn cầu (GWP). Bên cạnh đó, Zhuang và cộng sự [18] đề xuất đường hô  $\text{CO}_2$  nồng độ thấp, vừa nâng cao hiệu quả hấp thụ, vừa cải thiện cơ tính, mở ra hướng đi khả thi cho quy mô công nghiệp với chi phí năng lượng thấp. Tổng thể, các kết quả nghiên cứu nêu trên cho thấy đường hô  $\text{CO}_2$  đang chuyển từ một quá trình thí nghiệm hẹp sang giải pháp công nghiệp đa dạng, kết hợp học máy, tối ưu vòng đời và tái chế vật liệu, góp phần định hình thể hệ vật liệu xây dựng carbon

thấp trong tương lai.

Mặc dù các bằng chứng khoa học về công nghệ đường hô  $\text{CO}_2$  ngày càng nhiều, vẫn tồn tại những khoảng trống nghiên cứu đáng kể. Thứ nhất, hầu hết công trình tập trung vào bê tông mác trung bình và cao hoặc các sản phẩm đúc sẵn giá trị lớn (bản sàn, tấm bê tông đúc sẵn), trong khi gạch không nung xi măng cốt liệu (GKN) mác thấp (M15), vốn chiếm tỷ trọng sản xuất lớn ở các nước đang phát triển như Việt Nam, lại ít được nghiên cứu chuyên sâu. Thứ hai, nhiều nghiên cứu trước áp dụng điều kiện áp suất  $\text{CO}_2$  cao ( $\geq 5$  bar) hoặc thời gian đường hô kéo dài (vài ngày), chưa phù hợp với dây chuyền công nghiệp thực tế, nơi yêu cầu quy trình ngắn, chi phí thấp và dễ tích hợp. Thứ ba, các phân tích kết hợp giữa cơ học – vi cấu trúc (SEM, XRD) và mức độ cacbonat hóa còn chưa được triển khai đầy đủ cho đối tượng gạch M15, khiến cơ chế cải thiện chưa được làm rõ một cách toàn diện.

Xuất phát từ những khoảng trống trên, nghiên cứu này được thực hiện nhằm đánh giá có hệ thống ảnh hưởng của áp suất  $\text{CO}_2$  thấp (2 bar) và thời gian đường hô ngắn (6–24 giờ) đến các tính chất cơ học, mức độ cacbonat hóa và biến đổi vi cấu trúc của GKN mác M15 sản xuất theo công nghệ ép rung bán khô. Các chỉ tiêu được khảo sát bao gồm: (i) cường độ chịu nén ở các tuổi 3, 7 và 28 ngày, (ii) độ hút nước, (iii) chiều sâu thâm nhập cacbonat, và (iv) phân tích cấu trúc vi mô và khoáng học bằng SEM và XRD. Điểm mới và đóng góp chính của nghiên cứu là chứng minh rằng ngay cả ở áp suất thấp và thời gian đường hô ngắn, đường hô  $\text{CO}_2$  vẫn có thể mang lại cải thiện rõ rệt về cơ học và vi cấu trúc cho GKN mác M15, qua đó khẳng định tính khả thi và tiềm năng ứng dụng rộng rãi trong sản xuất vật liệu xây dựng xanh.

## 2. Vật liệu và phương pháp

### 2.1. Vật liệu

Xi măng sử dụng trong nghiên cứu là loại PC40 Sài Gòn, đáp ứng yêu cầu kỹ thuật của Tiêu chuẩn Việt Nam TCVN 2682:2020. Đây là xi măng Poóc-lăng thông dụng với đặc tính cơ học ổn định, thích hợp cho sản xuất gạch xi măng. Các đặc trưng vật lý cơ bản của xi măng bao gồm kích thước hạt trung bình 19,86  $\mu\text{m}$ , khối lượng riêng 3,08  $\text{g}/\text{cm}^3$  và độ mịn Blaine 3963  $\text{cm}^2/\text{g}$ . Thành phần hóa học chủ yếu được xác định bằng phương pháp huỳnh quang tia X (XRF) như trình bày ở Bảng 1.

Hàm lượng CaO cao đóng vai trò quan trọng trong cả quá trình thủy hóa lẫn cacbonat hóa, cung cấp nguồn portlandite ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) dồi dào để phản ứng với  $\text{CO}_2$  hình thành  $\text{CaCO}_3$ , từ đó tăng độ đặc chắc của cấu trúc vi mô. Tỷ lệ  $\text{SiO}_2$  đáng kể góp phần tạo gel canxi-silicat-hydrat (C–S–H) [8], là pha chính quyết định cường độ của vật liệu, trong khi hàm lượng oxit kiềm và MgO được kiểm soát ở mức thấp nhằm hạn chế nguy cơ giãn nở thể tích và phản ứng kiềm-silic. Thành phần hóa học này cho thấy PC40 có tiềm năng phản ứng cao với  $\text{CO}_2$  ở giai đoạn đường hô, phù hợp với mục tiêu nghiên cứu nhằm tối ưu hóa hiệu quả cơ học và bền lâu của GKN.

Cốt liệu mịn được sử dụng trong nghiên cứu là hỗn hợp phối trộn từ hai nguồn với tỷ lệ khối lượng bằng nhau: 50 % cát sông Đồng Nai và 50 % cát nghiền từ mỏ đá Tân Cang, tỉnh Đồng Nai. Việc lựa chọn

và phối trộn này nhằm kết hợp ưu điểm về hình dạng hạt tròn của cát sông với bề mặt nhám và góc cạnh của cát nghiền, từ đó cải thiện khả năng lên chặt và tăng cường độ liên kết ma trận xi măng-cốt liệu.

Cốt liệu mịn đáp ứng các yêu cầu kỹ thuật của TCVN 7570:2006, với các đặc tính vật lý gồm khối lượng riêng  $2,65 \text{ g/cm}^3$ , độ hút nước 0,8 % và mô đun độ lớn 2,73. Có thể thấy, phân bố thành phần hạt của hỗn hợp cát (xem Hình 1) được thiết kế để đạt cấp phối liên tục, giảm khoảng trống và tối ưu hóa độ đặc chắc của GKN mức thấp trong điều kiện ép rung, đồng thời tạo điều kiện thuận lợi cho quá trình thâm nhập  $\text{CO}_2$  trong giai đoạn dưỡng hộ.

## 2.2. Thiết kế cấp phối và chuẩn bị mẫu thí nghiệm

Cấp phối hỗn hợp được thiết kế nhằm sản xuất GKN đạt mức M15, đáp ứng yêu cầu cường độ và độ bền cho ứng dụng xây dựng dân dụng. Quá trình thiết kế cấp phối dựa trên kết quả cấp phối thực tế của nhà máy sản xuất GKN, kết hợp điều chỉnh thông qua các thí nghiệm trong phòng nhằm tối ưu hóa tính công tác và khả năng phản ứng  $\text{CO}_2$  trong giai đoạn dưỡng hộ. Cấp phối tối ưu cuối cùng gồm 420 kg xi măng PC40, 1505 kg cát (hỗn hợp 50 % cát sông và 50 % cát nghiền) và 300 lít nước, tương ứng với tỷ lệ nước/xi măng (w/c) bằng 0,71.

Đặc tính hỗn hợp M15 là có độ ẩm thấp, phù hợp với công nghệ ép rung bán khô. Tỷ lệ w/c thấp giúp gia tăng lượng portlandite còn lại sau thủy hóa, từ đó nâng cao hiệu quả phản ứng cacbonat hóa khi dưỡng hộ bằng  $\text{CO}_2$ . Tổng hàm lượng chất kết dính được tính toán vừa đủ để đảm bảo sự liên kết giữa các hạt cốt liệu, đáp ứng yêu cầu cường độ nén và ổn định hình dạng sản phẩm.

Quy trình chế tạo mẫu được thực hiện trên dây chuyền sản xuất công nghiệp. Cụ thể, sau khi trộn khô xi măng và cốt liệu, nước được bổ sung từ từ cho đến khi đạt độ ẩm yêu cầu. Hỗn hợp sau đó được tạo hình thành các viên GKN bằng phương pháp ép rung bán khô (Hình 2a). Mẫu được tháo khuôn ngay sau khi ép, để yên ở điều kiện môi trường phòng trong 24 giờ trước khi đưa vào buồng dưỡng hộ  $\text{CO}_2$ . Quá trình dưỡng hộ được thực hiện ở áp suất 2 bar trong các khoảng thời gian khác nhau tùy theo mục đích thí nghiệm (Hình 2b). Sau khi kết thúc dưỡng hộ, mẫu được bảo quản trong điều kiện phòng thí nghiệm cho đến khi đạt tuổi thí nghiệm quy định.

## 2.3. Phương pháp thí nghiệm

Các thí nghiệm được thiết kế nhằm đánh giá toàn diện ảnh hưởng của quá trình dưỡng hộ  $\text{CO}_2$  đến tính chất cơ học và vi cấu trúc của GKN mức M15. Kích thước mẫu GKN tuân thủ theo yêu cầu của TCVN 6477:2016. Mỗi điều kiện dưỡng hộ được chế tạo tối thiểu 5 mẫu để đảm bảo tính lặp lại và độ tin cậy thống kê. Cường độ chịu nén được xác định ở các tuổi 3, 7 và 28 ngày theo TCVN 6477:2016, với tải trọng gia tăng liên tục cho đến khi phá hủy mẫu.

Các chỉ tiêu khác, bao gồm độ hút nước, chiều sâu thâm nhập cacbonat, và phân tích vi cấu trúc (SEM và XRD), được thực hiện trên các mẫu 3 ngày tuổi. Những thí nghiệm này chỉ tiến hành cho mẫu đối

chứng (M15-00, bảo dưỡng tự nhiên) và mẫu dưỡng hộ  $\text{CO}_2$  cho kết quả tối ưu về cường độ (M15-18).

Quy trình dưỡng hộ  $\text{CO}_2$  được tiến hành ngay sau khi tạo hình và tháo khuôn. Mẫu GKN được để ổn định ở điều kiện môi trường phòng trong 24 giờ, sau đó đặt vào buồng dưỡng hộ kín, bơm  $\text{CO}_2$  ở áp suất 2 bar trong các khoảng thời gian khác nhau (6, 12, 18 và 24 giờ). Lưu ý rằng, nguồn  $\text{CO}_2$  được sử dụng trong nghiên cứu này là  $\text{CO}_2$  tinh khiết trong bình nén công nghiệp. Sau khi kết thúc giai đoạn dưỡng hộ, mẫu được bảo quản trong điều kiện phòng thí nghiệm cho đến khi đạt tuổi thí nghiệm. Bảng 2 trình bày các điều kiện dưỡng hộ  $\text{CO}_2$  áp dụng cho từng nhóm mẫu thí nghiệm.

Hình 3 minh họa các thí nghiệm chính được tiến hành nhằm đánh giá toàn diện GKN mức M15 sau dưỡng hộ  $\text{CO}_2$ . Cụ thể, Hình 3a trình bày thí nghiệm nén xác định cường độ chịu nén theo TCVN 6477:2016; Hình 3b cho thấy phép đo chiều sâu thâm nhập cacbonat bằng dung dịch phenolphthalein 1 % (Lưu ý: Các mẫu thử được cắt tại mặt cắt giữa viên gạch theo phương vuông góc với chiều dài, nhằm loại bỏ ảnh hưởng của mép biên và điều kiện đóng rắn không đồng đều); Hình 3c minh họa quan sát vi cấu trúc bằng hiển vi điện tử quét (SEM); và Hình 3d thể hiện kết quả phân tích nhiễu xạ tia X (XRD) để xác định thành phần khoáng học (Lưu ý: Vị trí lấy mẫu để phân tích SEM và XRD được chọn tại vùng đã bị cacbonat hóa nhằm quan sát chi tiết sự biến đổi vi cấu trúc của hồ xi măng sau quá trình tiếp xúc  $\text{CO}_2$ ). Các thí nghiệm này bổ trợ lẫn nhau, cung cấp cơ sở dữ liệu từ cấp độ cơ học, hóa học đến vi mô, qua đó làm sáng tỏ cơ chế cải thiện tính chất vật liệu nhờ quá trình dưỡng hộ  $\text{CO}_2$ .

## 3. Kết quả và thảo luận

### 3.1. Cường độ chịu nén

Các mẫu GKN được dưỡng hộ trong môi trường  $\text{CO}_2$  ở áp suất cố định 2 bar, Mẫu M15 đóng vai trò đối chứng, không được tiếp xúc với  $\text{CO}_2$ . Kết quả chi tiết được thể hiện trong Hình 4. Kết quả dưỡng hộ GKN bằng  $\text{CO}_2$  ở áp suất 2 bar cho thấy cường độ nén tăng rõ trong giai đoạn đầu (6–12 giờ), sau đó chậm lại và gần như ổn định từ 18–24 giờ. Điều này khẳng định hiệu quả chính của dưỡng hộ  $\text{CO}_2$  là thúc đẩy phát triển cường độ sớm, phù hợp với cơ chế carbonat hóa và các nghiên cứu quốc tế.

Cường độ nén ở 3 ngày tuổi (R3) của mẫu M15-00 tăng từ 9,0 MPa (mẫu đối chứng) lên 12,0 MPa sau 6 giờ dưỡng hộ  $\text{CO}_2$  (+33 %) và đạt 14,5 MPa sau 24 giờ (+61 %). Mức tăng này chủ yếu do phản ứng carbonat hóa giữa  $\text{CO}_2$  và  $\text{Ca(OH)}_2$ , tạo thành  $\text{CaCO}_3$  lấp kín lỗ rỗng và tăng mật độ vi cấu trúc. Kết quả phù hợp với nghiên cứu của Lee [19], trong đó cường độ nén tăng từ 14,6 lên 18,6 MPa (+27,7 %) sau 8 giờ dưỡng  $\text{CO}_2$  trong điều kiện bán khô. Với cường độ nén ở 7 (R7) và 28 ngày tuổi (R28), mức tăng cũng rõ rệt nhưng thấp hơn so với R3. Cụ thể, R7 tăng từ 13,2 MPa lên 16,2 MPa (+23 %) và R28 tăng từ 16,5 MPa lên 19,1 MPa (+16 %) sau 24 giờ dưỡng  $\text{CO}_2$ . Điều này phản ánh hiệu quả cao nhất của carbonat hóa nằm trong 24 giờ đầu, sau đó quá trình hydrat hóa chiếm ưu thế. Báo cáo của Trivedi và Das [20]

cũng cho thấy đường  $\text{CO}_2$  trong 7 ngày chỉ tăng R28 khoảng 11,3 %, khẳng định không cần kéo dài thời gian dưỡng hộ nếu hiệu quả đã đạt ngưỡng tối ưu.

Một điểm đáng lưu ý là sau khoảng 18 giờ, cả ba giá trị R3, R7 và R28 đều có xu hướng tăng rất chậm, gần như bão hòa. Cụ thể, cường độ R3 chỉ tăng thêm 0,1 MPa từ 18 đến 24 giờ; R28 cũng chỉ tăng 0,1 MPa trong khoảng thời gian tương tự. Điều này phù hợp với kết luận của Mingfang Ba và cộng sự [21], khi nghiên cứu trên bê tông rỗng thoát nước (pervious concrete) cho thấy quá trình cacbonat hóa ban đầu mang lại hiệu quả lớn, nhưng sau khi sản phẩm  $\text{CaCO}_3$  phủ kín bề mặt hạt xi măng, khả năng khuếch tán  $\text{CO}_2$  bị hạn chế, khiến hiệu quả giảm nhanh chóng.

Từ dữ liệu thu được, có thể rút ra ba quy luật chính: (1) cường độ nén tăng nhanh trong giai đoạn đầu rồi bão hòa; (2) hiệu quả dưỡng  $\text{CO}_2$  cao nhất ở tuổi sớm (R3), giảm dần về sau; (3) thời gian dưỡng hộ tối ưu cho GKN mác M15 là 12–18 giờ ở áp suất 2 bar để cân bằng hiệu quả kỹ thuật và chi phí. Kết quả này phù hợp với xu hướng công nghệ bê tông đúc sẵn trên thế giới, nơi dưỡng hộ  $\text{CO}_2$  được xem là giải pháp hiệu quả cả về kỹ thuật và môi trường. Công nghệ này đang được ứng dụng trong sản xuất gạch xi măng, tấm tường và cấu kiện không nung, và cần được tối ưu theo từng cấp phối và điều kiện thực tế.

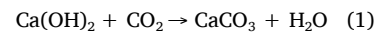
### 3.2. Độ sâu thâm nhập cacbonat

Kết quả ở Bảng 3 cho thấy GKN dưỡng hộ trong môi trường  $\text{CO}_2$  đã làm gia tăng đáng kể độ sâu thâm nhập cacbonat. Cụ thể, mẫu đối chứng M15-00 chỉ đạt chiều sâu cacbonat hóa khoảng 1 mm, trong khi mẫu M15-18 sau 18 giờ dưỡng hộ ở áp suất 2 bar ghi nhận độ thâm nhập tới 16 mm, tức tăng gấp 16 lần so với mẫu đối chứng. Sự gia tăng này có thể được giải thích bởi cơ chế khuếch tán  $\text{CO}_2$  vào mao quản, phản ứng với  $\text{Ca(OH)}_2$  và các khoáng C–S–H, tạo thành  $\text{CaCO}_3$  lấp đầy lỗ rỗng, đồng thời thúc đẩy phản ứng cacbonat hóa tiến sâu vào khối vật liệu [22]. So sánh với nghiên cứu của Zhang và cộng sự [17], kết quả này cho thấy mức thâm nhập 16 mm sau 18 giờ ở 2 bar là khá lớn, vượt ngưỡng ~10 mm mà Zhang và cộng sự xác định có thể gây hạn chế thủy hóa tiếp theo. Điều này gợi ý rằng mặc dù GKN có tiềm năng hấp thụ  $\text{CO}_2$  mạnh, nhưng cần kiểm soát thời gian và áp suất dưỡng hộ để tránh nguy cơ suy giảm tính bền lâu do cacbonat hóa quá sâu.

### 3.3. Phân tích XRD

Kết quả phân tích XRD và định lượng khoáng học của hai mẫu M15-00 và mẫu dưỡng hộ  $\text{CO}_2$  trong 18 giờ M15-18, đã cho thấy những khác biệt đáng kể về thành phần khoáng, phản ánh rõ tác động của quá trình dưỡng hộ bằng khí  $\text{CO}_2$  lên cấu trúc vật liệu. Đầu tiên, phổ XRD của cả hai mẫu (Hình 5) đều cho thấy sự hiện diện của các khoáng vật trơ nguồn gốc từ cốt liệu như quartz ( $\text{SiO}_2$ ), muscovite, albite và microcline, với cường độ đỉnh tương đối ổn định giữa hai mẫu. Đây là các khoáng không tham gia vào quá trình thủy hóa hoặc cacbonat hóa, do đó có thể được xem là nền ổn định trong cấu trúc khoáng học. Tuy

nhiên, sự khác biệt rõ ràng nhất nằm ở cường độ đỉnh nhiễu xạ của các pha phản ứng – đặc biệt là portlandite ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) và calcite ( $\text{CaCO}_3$ ). Mẫu M15-00 thể hiện đỉnh nhiễu xạ mạnh tại khoảng  $18^\circ 2\theta$  – vị trí đặc trưng của portlandite, trong khi đỉnh này đã giảm đáng kể trong mẫu M15-18. Ngược lại, mẫu M15-18 xuất hiện đỉnh nhiễu xạ mới tại khoảng  $29,4^\circ 2\theta$ , đặc trưng cho canxi cacbonat ( $\text{CaCO}_3$ ), vốn không có mặt trong mẫu đối chứng. Đây là bằng chứng trực tiếp cho quá trình cacbonat hóa sơ cấp, diễn ra khi khí  $\text{CO}_2$  phản ứng với  $\text{Ca(OH)}_2$  tự do tạo thành  $\text{CaCO}_3$  và nước.



Kết quả phân tích định lượng khoáng bổ sung thêm cơ sở vững chắc cho nhận định trên (xem Bảng 4). Hàm lượng portlandite -  $\text{Ca(OH)}_2$  trong mẫu M15-00 giảm từ 12 % (ở mẫu đối chứng) xuống còn 4 % (mẫu M15-18), tức giảm gần 67 %, đồng thời calcite tăng từ 0 % lên 7 %. Điều này cho thấy một lượng lớn  $\text{Ca(OH)}_2$  đã bị cacbonat hóa chỉ sau 18 giờ dưỡng hộ trong môi trường khí  $\text{CO}_2$ . Đáng chú ý, mẫu M15-18 còn xuất hiện thêm pha hillebrandite ( $\text{Ca}_2\text{SiO}_3(\text{OH})_2$ ) với hàm lượng 3 %, là một dạng sản phẩm phụ có thể hình thành khi  $\text{Ca}^{2+}$  từ  $\text{Ca(OH)}_2$  phản ứng với các mảnh gel silicat trong môi trường  $\text{CO}_2$  – điều phù hợp với các nghiên cứu trước đây của Kashef-Haghighi và cộng sự [3]. Một biến đổi đáng chú ý khác là giảm nhẹ pha C–S–H vô định hình từ 45 % xuống 39 %. Việc giảm pha vô định hình này không đồng nghĩa với việc giảm chất lượng gel, mà có thể do một phần C–S–H đã bị tái tổ chức hoặc kết tinh lại thành các sản phẩm  $\text{CaCO}_3$  hoặc hillebrandite – hiện tượng đã được xác nhận trong các nghiên cứu của Kashef-Haghighi [3] và Zhan và cộng sự [23]. Như vậy, sự thay đổi này được xem là tái cấu trúc gel theo hướng ổn định hơn, giúp tăng tính cơ học và giảm tính thấm của vật liệu. Việc mất đi một lượng lớn  $\text{Ca(OH)}_2$  tự do cũng mang lại lợi ích rõ rệt về mặt độ bền lâu. Portlandite là pha dễ bị hòa tan và phản ứng trong môi trường xâm thực (sunfat, axit, nước mềm). Khi được thay thế bằng  $\text{CaCO}_3$  – một pha ổn định hơn về mặt hóa học, khả năng chống lại sự xâm thực hóa học của GKN được nâng cao rõ rệt. Đồng thời, các sản phẩm  $\text{CaCO}_3$  kết tinh dạng vi mô cũng có thể lấp đầy lỗ rỗng và mao quản, từ đó cải thiện cấu trúc vi mô và giảm độ thấm của vật liệu, đúng như những gì đã quan sát được trong ảnh SEM ở phần trên.

Tổng hợp các kết quả XRD và định lượng khoáng học cho thấy quá trình dưỡng hộ  $\text{CO}_2$  trong 18 giờ đã diễn ra hiệu quả, làm thay đổi cơ bản thành phần khoáng học và cấu trúc vật liệu của mẫu GKN mác M15 theo hướng có lợi. Quá trình cacbonat hóa không chỉ giúp giảm  $\text{Ca(OH)}_2$  tự do mà còn thúc đẩy hình thành  $\text{CaCO}_3$  và tái tổ chức pha gel C–S–H, góp phần tăng cường độ nén, độ đặc chắc và độ bền hóa học. Điều này khẳng định tiềm năng ứng dụng của công nghệ dưỡng hộ  $\text{CO}_2$  ngắn hạn ở áp suất thấp trong sản xuất GKN đúc sẵn mác thấp, góp phần thực hiện mục tiêu kép: nâng cao hiệu suất vật liệu và giảm phát thải  $\text{CO}_2$  ngành xây dựng.

### 3.4. Phân tích SEM

Hình ảnh vi cấu trúc (SEM) của mẫu dưỡng  $\text{CO}_2$  thể hiện rõ sự lấp đầy lỗ rỗng và tái tổ chức gel C–S–H. Cụ thể, hình ảnh SEM của mẫu



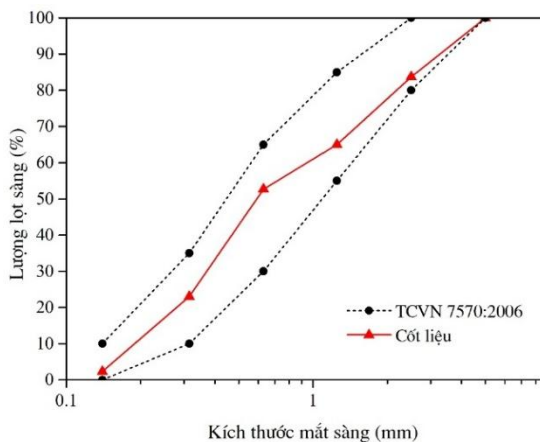
M15-00 đối chứng (không dưỡng hộ  $\text{CO}_2$ ) và mẫu M15-18 (được dưỡng hộ  $\text{CO}_2$  trong 18 giờ) thể hiện sự khác biệt rõ rệt ở các cấp độ phóng đại từ 2.000 lần đến 60.000 lần, phản ánh sự khác nhau về mức độ thủy hóa, sản phẩm phản ứng và mức độ đặc chắc của vật liệu (xem các Hình 6 và 7). Hình ảnh SEM của mẫu M15-00 cho thấy cấu trúc nền còn nhiều khe rỗng, với các cụm sản phẩm thủy hóa như C-S-H dạng sợi và các tinh thể ettringite phân bố không đều. Đặc biệt, sự hiện diện phổ biến của tinh thể  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  dạng bản lớn là minh chứng cho quá trình thủy hóa chưa triệt để, đồng thời cũng là điểm yếu dễ bị tấn công bởi môi trường xâm thực như  $\text{CO}_2$ , sunfat hoặc axit.

Trong khi đó, vi cấu trúc của mẫu M15-18 cho thấy sự cải thiện đáng kể. Ở độ phóng đại thấp (2.000x và 5.000x), các vùng bề mặt GKN xuất hiện dày đặc các hạt tinh thể nhỏ, phân bố đều, kết dính tốt với

nền gel. Ở độ phóng đại cao hơn (40.000x đến 60.000x), các tinh thể dạng chùy gai hoặc sợi mảnh xuất hiện chiếm ưu thế, được xác định là các dạng kết tinh của  $\text{CaCO}_3$  như vaterite hoặc aragonite – sản phẩm của quá trình cacbonat hóa trong điều kiện dưỡng hộ  $\text{CO}_2$  [16]. Sự có mặt của  $\text{CaCO}_3$  này có vai trò “lấp đầy” lỗ rỗng vi mô, làm tăng độ đặc chắc và giảm khả năng thấm nước của GKN. So với mẫu đối chứng, mẫu M15-18 có mật độ gel C-S-H và sản phẩm phản ứng thứ cấp cao hơn, trong khi hàm lượng  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  tự do giảm mạnh. Điều này phù hợp với các nghiên cứu trước đó, khi  $\text{CO}_2$  phản ứng với  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  và các pha canxi trong gel C-S-H để tạo thành  $\text{CaCO}_3$ , đồng thời thúc đẩy tái tổ chức cấu trúc gel – giúp cải thiện cơ học và độ bền [3]. Quá trình dưỡng hộ  $\text{CO}_2$  còn giúp giảm co ngót khô nhờ lấp rỗng và ổn định vi cấu trúc, đặc biệt quan trọng với GKN mức thấp như M15-00.

**Bảng 1.** Thành phần hóa học chủ yếu của xi măng PC40.

| Thành phần hóa học (% theo khối lượng) |                         |                         |       |      |               |                      |                       |      |      |
|----------------------------------------|-------------------------|-------------------------|-------|------|---------------|----------------------|-----------------------|------|------|
| $\text{SiO}_2$                         | $\text{Al}_2\text{O}_3$ | $\text{Fe}_2\text{O}_3$ | CaO   | MgO  | $\text{SO}_3$ | $\text{K}_2\text{O}$ | $\text{Na}_2\text{O}$ | MKN  | Khác |
| 19,70                                  | 4,57                    | 3,15                    | 61,80 | 2,98 | 2,77          | 0,71                 | 0,50                  | 2,55 | 1,27 |



**Hình 1.** Phân bố thành phần hạt của cốt liệu.



(a) Chế tạo mẫu GKN



(b) Dưỡng hộ  $\text{CO}_2$  cho mẫu GKN

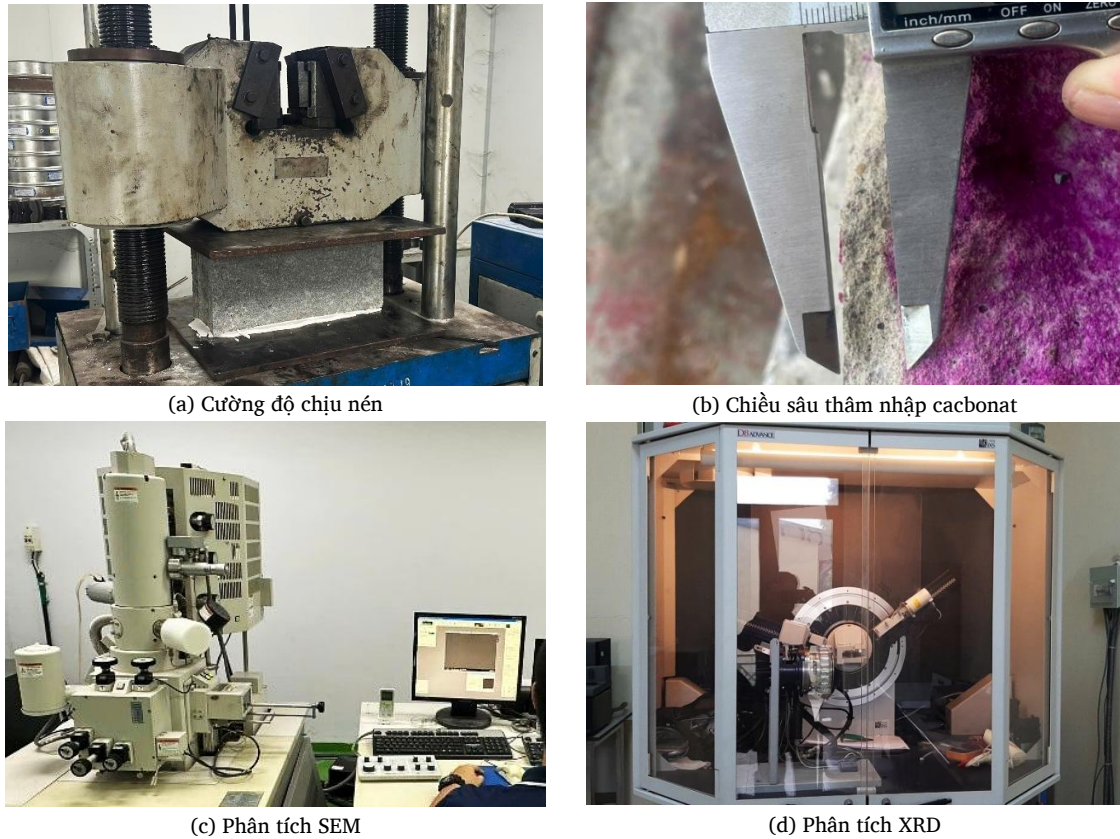
**Hình 2.** Chế tạo và dưỡng hộ mẫu GKN.

**Bảng 2.** Các thông số dưỡng hộ  $\text{CO}_2$  cho mẫu GKN.

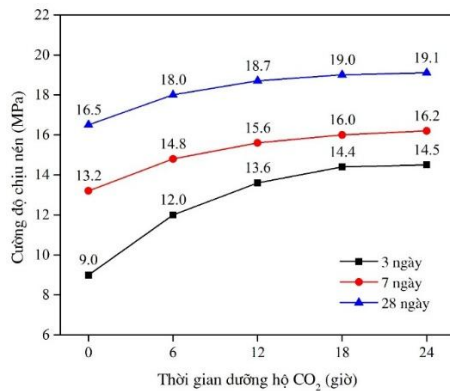
| Kí hiệu mẫu GKN | Áp suất (bar)                                      | Thời gian dưỡng hộ (giờ) |
|-----------------|----------------------------------------------------|--------------------------|
| M15-00          | Dưỡng hộ ở điều kiện tự nhiên của phòng thí nghiệm |                          |
| M15-06          | 2                                                  | 6                        |
| M15-12          | 2                                                  | 12                       |
| M15-18          | 2                                                  | 18                       |
| M15-24          | 2                                                  | 24                       |

**Bảng 3.** Ảnh hưởng của dưỡng hộ  $\text{CO}_2$  chiều sâu thâm nhập cacbonat của GKN.

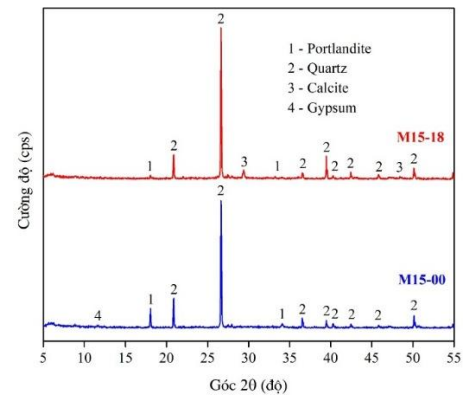
| Kí hiệu mẫu GKN | Áp suất (bar) | Thời gian dưỡng hộ (giờ) | Chiều sâu thâm nhập cacbonat (mm) |
|-----------------|---------------|--------------------------|-----------------------------------|
| M15-00          | 0             | 0                        | 1                                 |
| M15-18          | 2             | 18                       | 16                                |



**Hình 3.** Bố trí thí nghiệm đánh giá các tính chất của GKN.



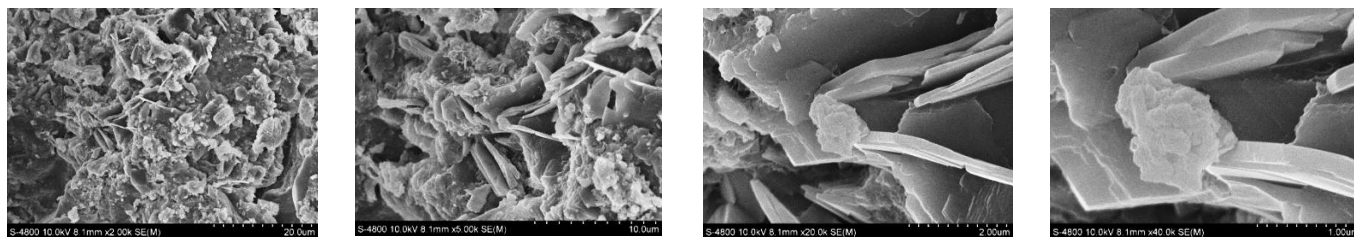
**Hình 4.** Ảnh hưởng của thời gian dưỡng hộ CO<sub>2</sub> đến cường độ chịu nén của GKN.



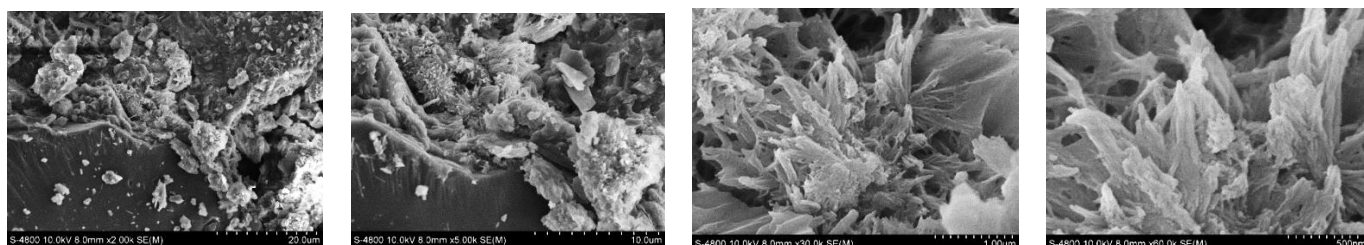
**Hình 5.** Ảnh hưởng của dưỡng hộ CO<sub>2</sub> sự biến đổi thành phần khoáng trong GKN.

**Bảng 4.** Bảng định lượng thành phần khoáng chủ yếu trong các mẫu GKN.

| Thành phần khoáng (%)                         | Ký hiệu mẫu |        | Nhận xét                                                                   |
|-----------------------------------------------|-------------|--------|----------------------------------------------------------------------------|
|                                               | M15-00      | M15-18 |                                                                            |
| Quartz (SiO <sub>2</sub> )                    | 31          | 34     | Không đổi nhiều, khoáng trơ                                                |
| Portlandite (Ca(OH) <sub>2</sub> )            | 12          | 4      | Giảm mạnh (~67 %) do bị cacbonat hóa                                       |
| Calcite (CaCO <sub>3</sub> )                  | 0           | 7      | Tăng nhiều, là sản phẩm của phản ứng với CO <sub>2</sub>                   |
| Gypsum (CaSO <sub>4</sub> .2H <sub>2</sub> O) | 1           | 0      | Biến mất, có thể bị phân hủy trong môi trường CO <sub>2</sub>              |
| Pha vô định hình (CSH)                        | 45          | 39     | Giảm nhẹ (~6 %), có thể do chuyển hóa thành các tinh thể CaCO <sub>3</sub> |



Hình 6. Hình ảnh SEM của mẫu M15-00 ở 28 ngày tuổi.



Hình 7. Hình ảnh SEM của mẫu M15-18 ở 28 ngày tuổi.

#### 4. Kết luận

Nghiên cứu đã đánh giá có hệ thống hiệu quả dưỡng hộ  $\text{CO}_2$  áp suất thấp (2 bar) đối với GKN mác M15 trong khung thời gian 6–24 giờ. Kết quả cho thấy lợi ích kép: (i) tăng cường độ sớm rõ rệt và (ii) tái cấu trúc vi mô theo hướng đặc chắc, được chứng minh nhất quán qua cường độ nén, chiều sâu cacbonat hóa, XRD và SEM. Trên cơ sở đó, các kết luận định lượng và khuyến nghị kỹ thuật chính được tóm lược như sau:

(i). Dưỡng hộ  $\text{CO}_2$  ở áp suất 2 bar trong 18 giờ đã mang lại hiệu quả rõ rệt cả về cơ học lẫn vi cấu trúc cho GKN mác M15. Cường độ chịu nén tuổi 3 ngày tăng từ 9,0 MPa (M15-00) lên 14,5 MPa (M15-24), tức tăng 61 %, trong khi cường độ 7 ngày và 28 ngày tăng lần lượt 23 % và 16 %. Xu hướng này chứng minh tác động mạnh mẽ nhất của cacbonat hóa nằm ở giai đoạn sớm. Hiệu quả gần như bão hòa sau 18 giờ, khi mức tăng cường độ từ 18 → 24 giờ chỉ còn 0,1 MPa, cho thấy thời gian dưỡng hộ tối ưu nằm trong khoảng 12–18 giờ để cân bằng hiệu quả kỹ thuật và chi phí.

(ii). Chiều sâu thâm nhập cacbonat tăng từ 1 mm (M15-00) lên 16 mm (M15-18), phản ánh khả năng thâm nhập và phản ứng sâu của  $\text{CO}_2$  vào cấu trúc. Phân tích XRD khẳng định quá trình cacbonat hóa mạnh mẽ: hàm lượng portlandite giảm từ 12 % xuống 4 % (-67 %), đồng thời hình thành 7 % calcite ( $\text{CaCO}_3$ ) mới. Ngoài ra, pha C–S–H vô định hình giảm nhẹ từ 45 % xuống 39 %, gợi ý sự tái cấu trúc một phần gel và kết tinh thành  $\text{CaCO}_3$  hoặc hillebrandite (3 %). Những thay đổi này không chỉ tăng độ đặc chắc mà còn thay thế portlandite (một pha kém bền) bằng calcite có tính ổn định hóa học cao hơn, từ đó cải thiện khả năng kháng xâm thực.

(iii). Ảnh SEM cung cấp bằng chứng trực quan cho sự cải thiện vi cấu trúc: mẫu M15-18 thể hiện mật độ gel C–S–H cao hơn, sự phân bố đồng đều của tinh thể  $\text{CaCO}_3$  dạng vaterite/aragonite lấp đầy lỗ rỗng

vi mô, trong khi  $\text{Ca(OH)}_2$  tự do giảm mạnh. Kết hợp với số liệu XRD, kết quả này cho thấy cơ chế “lấp rỗng và tái tổ chức gel” là nguyên nhân chính dẫn tới tăng cường độ và độ bền mẫu. Tổng hợp lại, nghiên cứu đã chứng minh rằng dưỡng hộ  $\text{CO}_2$  ngắn hạn (12–18h, 2 bar) là giải pháp khả thi cho GKN mác thấp: vừa tăng cường độ nén tới 61 %, vừa cải thiện đáng kể vi cấu trúc và độ bền hóa học, đồng thời góp phần giảm phát thải  $\text{CO}_2$  trong sản xuất vật liệu xây dựng.

Nghiên cứu hiện tại vẫn còn một số giới hạn nhất định. Thứ nhất, thí nghiệm mới chỉ khảo sát ở một mức áp suất  $\text{CO}_2$  (2 bar) và một loại xi măng duy nhất (PC40), chưa phản ánh hết tính đa dạng của điều kiện thực tế. Thứ hai, nghiên cứu chưa định lượng trực tiếp khả năng hấp thụ  $\text{CO}_2$  (kg/tấn chất kết dính) cũng như chưa đánh giá chuyên sâu độ bền lâu trước các môi trường xâm thực điển hình như sunfat, ion clo. Trong các nghiên cứu tiếp theo, nghiên cứu sẽ mở rộng phạm vi thử nghiệm đối với áp suất, nồng độ  $\text{CO}_2$ , thời gian dưỡng hộ và mức độ ẩm, đồng thời tối ưu hóa các tham số công nghệ như áp lực ép và w/c. Ngoài ra, việc định lượng chi tiết lượng  $\text{CO}_2$ , tích hợp phân tích vòng đời và thực hiện thử nghiệm hiện trường sẽ là các bước cần thiết để xác nhận đồng thời tính bền vững, hiệu quả kinh tế và khả năng ứng dụng thực tiễn ở quy mô sản xuất.

#### Lời cảm ơn

Nghiên cứu được thực hiện thông qua đề tài “Nghiên cứu giải pháp công nghệ sử dụng carbon dioxide ( $\text{CO}_2$ ) trong sản xuất cấu kiện bê tông đúc sẵn nhằm giảm phát thải khí gây hiệu ứng nhà kính” theo hợp đồng thực hiện nhiệm vụ khoa học và công nghệ số 19/HĐKHCN (mã số RD 19-24) ngày 04 tháng 1 năm 2024 giữa Bộ Xây dựng và Viện Vật liệu Xây dựng.



## Tài liệu tham khảo

- [1]. J. Eun Kim, J. Seo, K.-H. Yang, and H.-K. Kim, "Cost and CO<sub>2</sub> emission of concrete incorporating pretreated coal bottom ash as fine aggregate: A case study," *Construction and Building Materials*, vol. 408, p. 133706.
- [2]. M. Alyami, I. Y. Hakeem, M. Amin, A. M. Zeyad, B. A. Tayeh, and I. S. Agwa, "Effect of agricultural olive, rice husk and sugarcane leaf waste ashes on sustainable ultra-high-performance concrete," *Journal of Building Engineering*, vol. 72, p. 106689.
- [3]. S. Kashef-Haghighi and S. Ghoshal, "CO<sub>2</sub> sequestration in concrete through accelerated carbonation curing in a flow-through reactor," *Industrial and Engineering Chemistry Research*, vol. 49, no. 3, pp. 1143–1149.
- [4]. Z. Liu, S. Luo, S. Liu, H. Zhang, C. Unluer, and L. Yang, "Revealing the underlying mechanism behind CO<sub>2</sub> curing light porous solid-waste based concrete," *Construction and Building Materials*, vol. 465, p. 140129.
- [5]. X. Xian, D. Zhang, H. Lin, and Y. Shao, "Ambient pressure carbonation curing of reinforced concrete for CO<sub>2</sub> utilization and corrosion resistance," *Journal of CO<sub>2</sub> Utilization*, vol. 56, p. 101861.
- [6]. S. Cho, H. Suh, J. Park, S. Jeong, J. Park, and S. Bae, "Repetitive water replenishment in CO<sub>2</sub> curing: Enhancement in carbon uptake, reactivity, crystal development, and mechanical properties of low calcium binder composites," *Cement and Concrete Composites*, vol. 160, p. 106053.
- [7]. H. Huang *et al.*, "Life-cycle assessment of emerging CO<sub>2</sub> mineral carbonation-cured concrete blocks: Comparative analysis of CO<sub>2</sub> reduction potential and optimization of environmental impacts," *Journal of Cleaner Production*, vol. 241, p. 118359.
- [8]. Z. Li, Y. Bai, and Q. Luo, "Influence of humidity conditions on the performance of CO<sub>2</sub>-cured LC3," *Case Studies in Construction Materials*, vol. 22, p. e04747.
- [9]. M. Tiong, X. Li, K. H. Mo, and T.-C. Ling, "Effects of moulding pressure and w/c induced pore water saturation on the CO<sub>2</sub> curing efficiency of dry-mix cement blocks," *Construction and Building Materials*, vol. 335, p. 127509.
- [10]. Z. Xu *et al.*, "Effects of temperature, humidity and CO<sub>2</sub> concentration on carbonation of cement-based materials: A review," *Construction and Building Materials*, vol. 346, p. 128399.
- [11]. D. Xuan, B. Zhan, and C. S. Poon, "A maturity approach to estimate compressive strength development of CO<sub>2</sub>-cured concrete blocks," *Cement and Concrete Composites*, vol. 85, pp. 153–160.
- [12]. Y. Liu *et al.*, "Recycling drinking water treatment sludge into eco-concrete blocks with CO<sub>2</sub> curing: Durability and leachability," *Science of The Total Environment*, vol. 746, p. 141182.
- [13]. Q. Song, M.-Z. Guo, Y. Gu, and T.-C. Ling, "CO<sub>2</sub> curing of SCMs blended cement blocks subject to elevated temperatures," *Construction and Building Materials*, vol. 374, p. 130907.
- [14]. A. M. Merino-Lechuga *et al.*, "Technical and environmental assessment of CO<sub>2</sub>-cured alkali-activated pervious paving blocks incorporating recycled aggregates," *Construction and Building Materials*, vol. 489, p. 142286.
- [15]. C. Shi, F. He, and Y. Wu, "Effect of pre-conditioning on CO<sub>2</sub> curing of lightweight concrete blocks mixtures," *Construction and Building Materials*, vol. 26, no. 1, pp. 257–267.
- [16]. W. Tang, C. Wu, B. Zhan, S. Kou, J. Jiang, and F. Xing, "Effect of CO<sub>2</sub> curing on mechanical and physical properties of the recycled aggregates containing silica fume," *Construction and Building Materials*, vol. 453, p. 139060.
- [17]. F. Zhang *et al.*, "Tailoring CO<sub>2</sub> curing technology for compression-formed blocks containing gypsum and basic oxygen furnace slag as a sustainable building material," *Construction and Building Materials*, vol. 491, p. 142713.
- [18]. R. Zhuang *et al.*, "Chelator-enhanced low-concentration CO<sub>2</sub> curing of cement paste: A pathway to improved sustainability and CO<sub>2</sub> sequestration in construction materials," *Journal of Building Engineering*, vol. 111, p. 113295.
- [19]. T. S. Kumar, K. V. G. D., Balaji, S. T. N. Reddy, and G. S. Rao, "Mechanical properties of concrete when cured with carbon dioxide," *International Journal of Engineering and Advanced Technology*, vol. 8, no. 6, pp. 2544–2549.
- [20]. B. Gilroy, L. Black, D. Thompson, R. Hogan, and N. Holmes, "Effects of accelerated carbonation curing on CO<sub>2</sub> sequestration and on the compressive strength of concrete masonry units," *Civil Engineering Research in Ireland (CERI) 2020*, 27th. August, Cork, Ireland.
- [21]. M. Ba, S. Fang, W. Cheng, and Y. Zhao, "Effects of CO<sub>2</sub> curing on the properties of pervious concrete in different paste-aggregate ratios," *Materials*, vol. 16, no. 13, p. 4581.
- [22]. B. J. Zhan, C. S. Poon, and C. J. Shi, "Materials characteristics affecting CO<sub>2</sub> curing of concrete blocks containing recycled aggregates," *Cement and Concrete Composites*, vol. 67, pp. 50–59.
- [23]. B. J. Zhan, C. S. Poon, and C. J. Shi, "Properties of cement-based construction materials prepared with construction waste and CO<sub>2</sub> curing," *14th International Congress on the Chemistry of Cement 2015*, Beijing, China.