

Đánh giá dưỡng hộ CO₂ ở tuổi muộn cho bê tông chứa phụ gia khoáng hoạt tính

Evaluation of late-age CO₂ curing on hardened concrete incorporating supplementary cementitious materials

> PHẠM QUỐC NHẬT^{1,2}, TRẦN VĂN MIỄN^{1,2,*}

¹Khoa Kỹ thuật Xây dựng, Trường Đại học Bách khoa TP.HCM

²Đại học Quốc gia TP.HCM

*Email: tvmien@hcmut.edu.vn

TÓM TẮT

Nghiên cứu này đánh giá ảnh hưởng của dưỡng hộ CO₂ áp dụng sau 28 ngày dưỡng hộ nước đến tính chất kỹ thuật của bê tông thường sử dụng chất kết dính xi măng Portland và phụ gia khoáng hoạt tính (SCMs) bổ sung gồm tro bay (TB) và xỉ lò cao nghiền mịn (XLM). Bốn cấp phối được khảo sát, gồm cấp phối đối chứng và ba cấp phối bổ sung SCMs lần lượt là 20, 30 và 40% so với khối lượng xi măng (trong đó 20 và 30% sử dụng TB, 40% là kết hợp 30% TB và 10% XLM). Tỷ lệ nước/xi măng được giữ cố định ở 0.58 cho tất cả các cấp phối. Sau khi trộn và kiểm tra độ sụt, mẫu được dưỡng hộ nước đến 28 ngày, sau đó được dưỡng hộ CO₂ trong 168 giờ. Các chỉ tiêu được thí nghiệm gồm cường độ chịu nén, khối lượng thể tích, độ hút nước, chiều sâu cacbonat hóa và điện trở suất bề mặt. Kết quả cho thấy việc sử dụng SCMs làm tăng độ sụt, trong khi dưỡng hộ CO₂ nhìn chung làm tăng cường độ chịu nén, tăng nhẹ khối lượng thể tích, giảm độ hút nước và tăng điện trở suất bề mặt; đồng thời chiều sâu cacbonat hóa tăng khi tăng hàm lượng SCMs, đặc biệt ở T30X10. Nhìn chung, dưỡng hộ CO₂ sau 28 ngày cho thấy tiềm năng cải thiện tính chất và lưu giữ CO₂ trong bê tông, song cần tối ưu thành phần chất kết dính để kiểm soát tính đồng nhất theo chiều sâu.

Từ khóa: Dưỡng hộ tuổi 28 ngày; tro bay; xỉ lò cao nghiền mịn; chiều sâu cacbonat hóa; điện trở suất bề mặt; độ hút nước.

ABSTRACT

The present study evaluates the effect of CO₂ curing applied after 28 days of water curing on the engineering performance of conventional concrete made with a Portland cement binder and incorporating supplementary cementitious materials (SCMs), including fly ash (FA) and ground granulated blast-furnace slag (GGBFS). Four mixtures were investigated, including a control mixture and three mixtures with SCMs added at 20, 30, and 40% by mass of cement; among these, the mixtures with 20% and 30% SCMs used FA, whereas the 40% SCM mixture combined 30% FA and 10% GGBFS. The water-to-cement ratio was kept constant at 0.58 for all mixtures. After mixing and slump testing, the specimens were water-cured for 28 days and then underwent a CO₂ curing stage for 168 h. The measured properties included compressive strength, bulk density, water absorption, carbonation depth, and surface resistivity. The experimental results indicate that incorporating SCMs increased slump, whereas CO₂ curing generally enhanced compressive strength, slightly increased bulk density, reduced water absorption, and increased surface resistivity. In addition, carbonation depth increased with higher SCM contents, with the greatest depth observed for the FA-GGBFS blend. Overall, late-age CO₂ curing shows potential to improve properties and CO₂ sequestration in concrete, although further optimization of binder composition is required to better control carbonation-depth uniformity across specimens.

Keywords: Late-age CO₂ curing; fly ash; ground granulated blast-furnace slag; carbonation depth; compressive strength; surface resistivity; water absorption.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Phát thải CO₂ là một chỉ số quan trọng trong đánh giá tính bền vững của các ngành công nghiệp có cường độ phát thải cao. Trong lĩnh vực xây dựng, vật liệu gốc xi măng, cụ thể là xi măng Portland, được sử dụng với khối lượng lớn [1]. Việc sản xuất xi măng được ước tính đóng góp đến 8% tổng lượng CO₂

phát thải toàn cầu [2], khiến lĩnh vực này thuộc nhóm nguồn phát thải lớn của ngành vật liệu công nghiệp. Lượng phát thải này phát sinh chủ yếu từ tiêu thụ năng lượng trong lò nung và phản ứng phân hủy đá vôi khi tạo clinker. Do một phần lớn lượng phát thải CO₂ phát sinh trực tiếp từ phản ứng hóa học

trong quá trình tạo clinker, các giải pháp giảm phát thải thường chịu nhiều ràng buộc kỹ thuật [3]. Vì vậy, các giải pháp nhằm giảm phát thải CO₂ cho vật liệu gốc xi măng cần khả thi ở quy mô sản xuất, đồng thời duy trì yêu cầu cơ học và độ bền trong điều kiện khai thác.

Trước áp lực cắt giảm phát thải nêu trên, các giải pháp theo hướng thu giữ, tận dụng và lưu giữ CO₂ (CCUS) ngay trong chuỗi sản xuất xi măng và bê tông đang được xem như một hướng tiếp cận triển vọng [3]. Trong hệ vật liệu gốc xi măng, CCUS thường được triển khai theo hai phương pháp là trộn và dưỡng hệ CO₂ [4]. Đối với phương pháp trộn CO₂ cho hỗn hợp bê tông, phương pháp này thuận lợi với quy trình hiện hữu nhưng mức độ cố định CO₂ có thể biến thiên lớn do nguy cơ thất thoát CO₂ cao và điều kiện phản ứng khó đồng nhất trong quá trình trộn. Ngược lại, dưỡng hệ CO₂ cho phép kiểm soát môi trường phản ứng rõ ràng hơn và có thể thúc đẩy khoáng hóa CO₂ để tạo dạng cacbonat lưu giữ ổn định trong pha rắn. Tuy nhiên, hiệu quả dưỡng hệ vẫn phụ thuộc vào độ ẩm tương đối, nhiệt độ, nồng độ CO₂, khả năng khuếch tán và độ thấm của cấu kiện, nên tính đồng nhất theo chiều sâu là một thách thức cần được làm rõ.

Bên cạnh CCUS, phụ gia khoáng hoạt tính (SCMs) như tro bay (TB) và xỉ lò cao nghiền mịn (XLM) thường được sử dụng trong hệ chất kết dính xi măng để điều chỉnh thành phần pha, khả năng phản ứng và cấu trúc lỗ rỗng vật liệu [5]. Hai loại SCMs này có thể cải thiện một số tính chất dài hạn nhờ phản ứng pozzolan của TB và tính thủy lực tiềm tàng của XLM. Tuy nhiên, sự có mặt của SCMs làm thay đổi thành phần pha, hàm lượng Ca(OH)₂, độ kiềm và cấu trúc lỗ rỗng của vật liệu gốc xi măng, nên có thể chi phối quá trình khuếch tán CO₂, động học cacbonat hóa và mức độ hình thành sản phẩm cacbonat khi áp dụng dưỡng hệ CO₂ [6]. Trong khi phần lớn các nghiên cứu tiếp cận SCMs theo hướng thay thế xi măng, ảnh hưởng của việc bổ sung TB và XLM vào hệ bê tông có hàm lượng xi măng cố định đối với khả năng cacbonat hóa và hiệu năng kỹ thuật sau dưỡng hệ CO₂ vẫn cần được làm rõ. Vì vậy, đánh giá dưỡng hệ CO₂ trên bê tông có bổ sung TB và XLM là cần thiết, nhằm làm rõ mối quan hệ giữa thành phần chất kết dính, khả năng khoáng hóa CO₂ và các tính chất kỹ thuật của bê tông.

Do đó, bài báo này nhằm đánh giá hiệu quả của dưỡng hệ CO₂ đối với các tính chất kỹ thuật của bê tông thường có bổ sung SCMs sau 28 ngày dưỡng hệ nước. Các tính chất được khảo sát bao gồm cường độ chịu nén, độ hút nước, chiều sâu cacbonat hóa và điện trở suất bề mặt bê tông. Các mẫu được dưỡng hệ cacbonat hóa trong 7 ngày nhằm đánh giá hiệu quả khoáng hóa CO₂ cho bê tông ở tuổi muộn.

2. VẬT LIỆU VÀ PHƯƠNG PHÁP THÍ NGHIỆM

2.1. Chuẩn bị vật liệu

Thành phần nguyên vật liệu thô được sử dụng bao gồm xi măng, cốt liệu, nước nhào trộn và phụ gia. Chất kết dính là xi măng Portland loại I (XMP) có nguồn gốc từ Công ty Xi măng Nghi Sơn. XMP có khối lượng riêng 3.10 g/cm³, cường độ chịu nén đạt 43.70 MPa ở 3 ngày và 62.50 MPa ở 28 ngày, bắt đầu và kết thúc đông kết lần lượt là 135 và 170 phút, cùng độ mịn 3375 cm²/g. Thành phần hóa học và chỉ tiêu kỹ thuật của XMP phù hợp với TCVN 2682:2020 [7] đối với PC50. Ngoài ra, nghiên cứu này sử dụng SCMs gồm TB và XLM, với khối lượng riêng lần lượt là 2.30 g/cm³ và 2.93 g/cm³ nhằm khảo sát ảnh hưởng của việc bổ sung SCMs đến hệ chất kết dính và hiệu quả dưỡng hệ CO₂. TB và XLM này phù hợp với TCVN 10302:2014 [8] và

11586:2016 [9] (với TB thuộc loại F (hàm lượng CaO < 10%) và XLM thuộc loại S95).

Cốt liệu mịn (CM) là cát sông có khối lượng riêng 2.65 g/cm³, mô đun độ lớn 2.08 và độ hút nước 0.22%. Cốt liệu thô (CT) là đá dăm có khối lượng riêng 2.74 g/cm³, độ nén dập trong xilanh 3.30%, độ hút nước trong 24 giờ 0.19% và cỡ hạt 5-20 mm. Các chỉ tiêu của cốt liệu đáp ứng TCVN 7570:2006 [10]. Nước máy dùng để trộn tuân thủ TCVN 4506:2012 [11], không chứa tạp chất, váng dầu và chất hữu cơ hoặc cặn không tan. Phụ gia sử dụng trong nghiên cứu là phụ gia siêu dẻo (PGSD) Sika 319-H, được phân loại D và G theo ASTM C494 [12], và dùng để hỗ trợ duy trì tính công tác của hỗn hợp bê tông.

2.2. Thiết kế thành phần cấp phối

Cấp phối đối chứng (ĐC) được thiết kế theo ACI 211-22 [13], với tỷ lệ nước trên xi măng bằng 0.58. Độ sụt thiết kế được lựa chọn là 180±20 mm, cường độ chịu nén thiết kế ở 28 ngày tối thiểu 40 MPa. Dựa trên cấp phối chuẩn này, các hỗn hợp có sử dụng SCMs được xây dựng bằng cách bổ sung TB và XLM vào hệ chất kết dính theo các tỷ lệ đã chọn so với khối lượng XMP, nhằm khảo sát ảnh hưởng của hệ chất kết dính giàu SCMs dưới điều kiện dưỡng hệ CO₂. Trong tất cả các cấp phối, hàm lượng XMP và nước được giữ cố định lần lượt là 313 kg/m³ và 180 kg/m³; lượng cốt liệu mịn và cốt liệu thô được hiệu chỉnh giảm nhẹ để bảo đảm thể tích 1 m³ bê tông. Hàm lượng Sika 319-H sử dụng là 1.25% so với khối lượng XMP và được giữ cố định cho tất cả các cấp phối, tương ứng khoảng 3.91 kg/m³. Phụ gia này được áp dụng để hỗ trợ duy trì tính công tác của hỗn hợp. Trong nghiên cứu này, hàm lượng PGSD không được điều chỉnh riêng cho từng cấp phối; do đó, độ sụt đo được sau khi trộn được xem là kết quả thực nghiệm phản ánh ảnh hưởng của TB và XLM đến tính công tác của hỗn hợp bê tông. Thành phần cấp phối cho 1 m³ bê tông được tổng hợp trong Bảng 1.

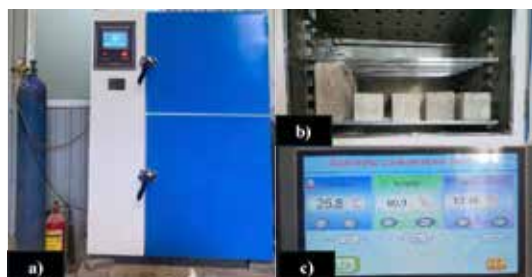
Bảng 1. Thành phần cấp phối cho một m³ bê tông

Tên mẫu	Đơn vị: kg/m ³						
	XMP	TB	XLM	CM	CT	N	PGSD
ĐC	313	-	-	831	1100	180	3.91
T20	313	63	-	823	1089	180	3.91
T30	313	94	-	819	1084	180	3.91
T30X10	313	94	31	818	1083	180	3.91

Chú thích: XMP: xi măng Portland; TB: tro bay; XLM: xỉ lò cao nghiền mịn; CM: cốt liệu mịn (cát sông); CT: cốt liệu thô (đá dăm); N: nước; -: không sử dụng.

2.3. Chuẩn bị mẫu thí nghiệm

Quy trình thí nghiệm gồm nhào trộn, kiểm tra độ sụt, tạo mẫu, dưỡng hệ nước đến 28 ngày và dưỡng hệ CO₂, được mô tả theo các bước sau: Đầu tiên, hỗn hợp bê tông được trộn theo cấp phối thiết kế đến khi đạt trạng thái đồng nhất. Độ sụt được kiểm tra ngay sau khi trộn theo TCVN 3106:2022 [14] nhằm đánh giá tính công tác của hỗn hợp bê tông. Hỗn hợp bê tông được đúc vào khuôn lập phương 100×100×100 mm cho các thí nghiệm cường độ chịu nén, khối lượng thể tích, độ hút nước và chiều sâu cacbonat hóa, trong khi mẫu trụ 200×100 mm được dùng để đo điện trở suất bề mặt. Tiếp theo, sau 24 giờ dưỡng hệ trong khuôn, mẫu được tháo khuôn và dưỡng hệ trong nước đến 28 ngày. Sau 28 ngày dưỡng hệ nước, mẫu được đặt trong buồng cacbonat hóa GA-300B (Hình 1a) và bố trí trên khay dưỡng hệ (Hình 1b). Điều kiện dưỡng hệ được thiết lập ở nhiệt độ 27±2.0 °C, độ ẩm tương đối 60±3.0% và nồng độ CO₂ 10±0.5% (Hình 1c) trong 7 ngày. Sau đó, tất cả các mẫu cacbonat hóa và mẫu dưỡng hệ nước ở cùng ngày tuổi được thí nghiệm các chỉ tiêu tương ứng.



Hình 1. Dưỡng hộ CO₂ trong (a) buồng dưỡng hộ, (b) đặt mẫu trên khay dưỡng hộ và (c) thiết lập các thông số nhiệt độ, độ ẩm tương đối và nồng độ CO₂ áp dụng

2.4. Phương pháp thí nghiệm

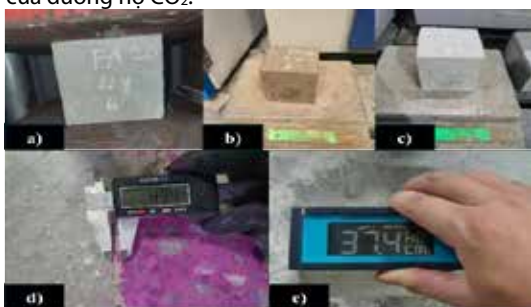
Cường độ chịu nén (Hình 2a) được thực hiện theo TCVN 3118:2022 [15] cho cả hai nhóm mẫu dưỡng hộ nước và cacbonat hóa. Kết quả này được dùng để đánh giá ảnh hưởng của dưỡng hộ CO₂ đến tính chất cơ học của bê tông ở tuổi muộn.

Khối lượng thể tích (Hình 2b) được xác định trước và sau 168 giờ dưỡng hộ trong buồng cacbonat hóa theo TCVN 3115:2022 [16]. Giá trị khối lượng thể tích được dùng để so sánh mức thay đổi độ đặc sít của bê tông giữa trạng thái trước và sau cacbonat hóa.

Độ hút nước (Hình 2c) được xác định theo TCVN 3113:2022 [17] cho các mẫu dưỡng hộ trong nước và cacbonat hóa. Chỉ tiêu này được sử dụng để phản ánh mức độ hút nước theo khối lượng sau các chế độ dưỡng hộ khác nhau.

Chiều sâu cacbonat hóa (Hình 2d) được xác định theo TCVN 13933:2024 [18] cho các mẫu cacbonat hóa với thời gian tiếp xúc 168 giờ. Dựa trên kết quả chiều sâu cacbonat hóa trung bình (tối thiểu 10 điểm đo), hệ số cacbonat hóa gia tốc được tính theo TCVN 13929:2024 [19] theo biểu thức $k = x/t^{1/2}$, trong đó k là hệ số cacbonat hóa (mm/ $\sqrt{\text{tuần}}$), x là chiều sâu cacbonat hóa trung bình (mm) và t là thời gian tiếp xúc với CO₂ (tuần).

Điện trở suất bề mặt (Hình 2e) được đo sau khi ngâm nước trong 24 giờ theo AASHTO T 358 [20] cho mẫu chưa cacbonat hóa (1, 14, 28 ngày tuổi) và mẫu sau khi cacbonat hóa. Chỉ tiêu này được sử dụng để đánh giá khả năng cản trở dẫn truyền ion ở vùng bề mặt và mức độ thay đổi tính vận chuyển của bê tông do ảnh hưởng của dưỡng hộ CO₂.



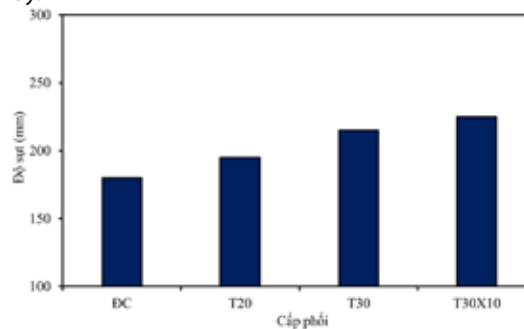
Hình 2. Thí nghiệm kiểm tra (a) cường độ chịu nén, (b) khối lượng thể tích trước và sau cacbonat hóa, (c) độ hút nước, (d) chiều sâu cacbonat hóa, và (e) điện trở suất bề mặt

3. KẾT QUẢ THÍ NGHIỆM VÀ THẢO LUẬN

3.1. Tính công tác

Hình 3 thể hiện độ sụt của hỗn hợp bê tông không có và có SCMs (bao gồm TB và XLM). Độ sụt của mẫu ĐC đạt khoảng 180 mm và đạt độ sụt thiết kế ban đầu, trong khi các cấp phối có TB tăng từ xấp xỉ 195 mm ở T20 lên khoảng 215 mm ở T30. Do hàm lượng PGSD được giữ cố định cho tất cả các cấp phối, sự thay đổi độ sụt chủ yếu phản ánh ảnh hưởng của việc bổ sung TB và XLM đến tính công tác của hỗn hợp, thay vì do điều chỉnh hàm lượng phụ gia. Khi phối hợp thêm 10% XLM, độ sụt tiếp tục tăng và đạt khoảng 225 mm ở mẫu T30X10. Xu hướng

này cho thấy việc bổ sung TB vào hệ chất kết dính, cũng như phối hợp TB và XLM, có thể cải thiện tính công tác của hỗn hợp trong điều kiện thí nghiệm. Hiệu ứng này thường liên quan đến hình thái hạt TB tương đối tròn, giúp giảm ma sát nội và giảm nhu cầu nước; đồng thời, hệ hạt của chất kết dính được điều chỉnh theo hướng thuận lợi cho khả năng chảy.

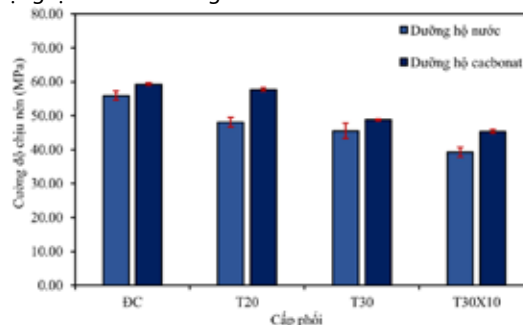


Hình 3. Độ sụt của hỗn hợp bê tông không có và có TB và XLM

3.2. Cường độ chịu nén

Tính chất cơ học của bê tông sau khi dưỡng hộ CO₂ so với bê tông dưỡng hộ trong môi trường nước (không có và có TB và XLM) được trình bày ở Hình 4. Đối với mẫu ĐC, cường độ chịu nén của mẫu dưỡng hộ nước đạt khoảng 55 MPa (đạt cường độ chịu nén theo thiết kế là tối thiểu 40 MPa). Khi mẫu được dưỡng hộ CO₂, cường độ của ĐC tăng nhẹ lên xấp xỉ 59 MPa, cho thấy tác động cải thiện cơ học nhưng không quá lớn đối với hệ chỉ dùng xi măng Portland. Với các cấp phối có TB, cường độ chịu nén ở chế độ dưỡng hộ nước giảm so với ĐC, lần lượt khoảng 49 MPa cho T20 và khoảng 45 MPa cho T30. Khi dưỡng hộ CO₂, cường độ chịu nén của T20 tăng rõ rệt lên khoảng 58 MPa, trong khi T30 tăng lên gần 49 MPa. Đối với cấp phối phối hợp TB và XLM, T30X10 có cường độ chịu nén khi dưỡng hộ nước thấp nhất khoảng 40 MPa, nhưng tăng lên khoảng 45 MPa sau dưỡng hộ cacbonat.

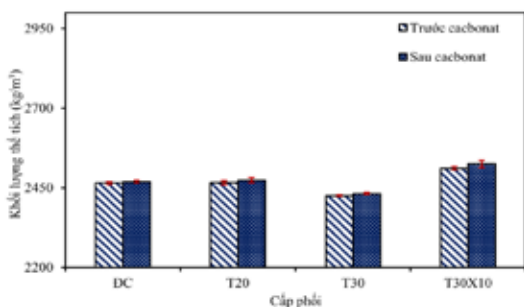
Xu hướng này phản ánh hai cơ chế chính. Thứ nhất, việc tăng hàm lượng TB và phối hợp XLM làm giảm cường độ ở chế độ dưỡng hộ nước tại cùng ngày tuổi, mặc dù tỷ lệ nước trên tổng khối lượng chất kết dính danh nghĩa giảm. Nguyên nhân là TB và XLM được bổ sung vào hệ chất kết dính, trong khi hàm lượng xi măng PC50 và nước được giữ cố định. Vì vậy, sự giảm tỷ lệ này không tương đương với việc giảm nước trộn trong hệ chỉ sử dụng xi măng Portland. Ở tuổi 28 ngày, phản ứng pozzolan của TB và tính thủy lực tiềm tàng của XLM chưa đóng góp đầy đủ vào sự hình thành các sản phẩm C-S-H/C-A-S-H. Thứ hai, dưỡng hộ CO₂ góp phần tăng cường độ nhờ thúc đẩy hình thành sản phẩm cacbonat, đặc biệt là CaCO₃, làm đặc ma trận và tinh chỉnh hệ lỗ rỗng, từ đó nâng khả năng chịu tải. Kết quả này cho thấy hiệu quả của dưỡng hộ CO₂ phụ thuộc đáng kể vào thành phần chất kết dính, trong đó tỷ lệ SCMs cần được tối ưu để vừa duy trì nền thủy hóa đủ mạnh vừa tận dụng lợi ích của khoáng hóa CO₂.



Hình 4. Cường độ chịu nén của bê tông dưỡng hộ nước và cacbonat không có và có TB và XLM

3.3. Khối lượng thể tích

Hình 5 trình bày khối lượng thể tích của bê tông (không có và có TB và XLM) trước và sau quá trình cacbonat hóa. Nhìn chung, khối lượng thể tích của các mẫu thay đổi không lớn sau cacbonat hóa và xu hướng chính là tăng nhẹ. Ở trạng thái trước cacbonat hóa, ĐC và T20 có giá trị xấp xỉ nhau quanh mức 2,450 kg/m³, trong khi T30 thấp hơn đôi chút. Mẫu T30X10 đạt khối lượng thể tích cao nhất trong nhóm, vượt nhẹ so với ĐC. Sau cacbonat hóa, tất cả các cấp phối đều tăng nhẹ so với ban đầu và mức tăng thể hiện khá đồng đều giữa các mẫu. Sự gia tăng khối lượng thể tích sau cacbonat hóa có thể liên quan đến quá trình khoáng hóa CO₂, trong đó sản phẩm cacbonat hình thành có xu hướng lấp đầy một phần lỗ rỗng và làm ma trận đặc hơn. Chênh lệch giữa các cấp phối ở trạng thái trước cacbonat hóa phản ánh ảnh hưởng của việc bổ sung SCMs đến mức độ xếp chặt của hệ hạt và đến khối lượng riêng của chất kết dính. Khi tăng hàm lượng TB, khối lượng thể tích có xu hướng giảm do TB có khối lượng riêng thấp hơn XMP, đồng thời lượng cốt liệu được hiệu chỉnh giảm nhẹ để bảo đảm thể tích cấp phối. Ngược lại, việc phối hợp thêm XLM, với khối lượng riêng cao hơn TB và cấp hạt mịn, có thể cải thiện mức độ xếp chặt và tăng độ đặc sít của hệ, nên T30X10 đạt giá trị cao hơn. Kết quả này cho thấy cacbonat hóa làm tăng độ đặc sít nhưng mức tăng khối lượng thể tích thường không lớn vì cơ chế chính là tinh chỉnh vi cấu trúc.

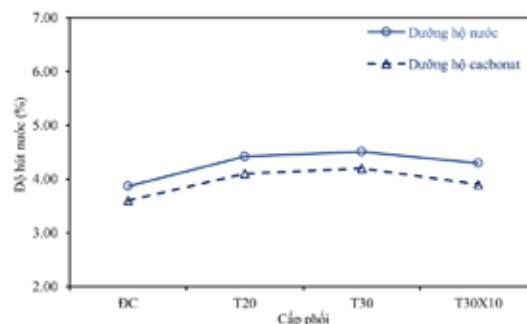


Hình 5. Khối lượng thể tích của bê tông không có và có TB và XLM trước và sau khi cacbonat hóa

3.4. Độ hút nước

Độ hút nước của bê tông được dưỡng hộ cacbonat hóa so với dưỡng hộ nước (không có và có TB và XLM) được thể hiện ở Hình 6. Nhìn chung, các mẫu dưỡng hộ cacbonat hóa có độ hút nước thấp hơn so với các mẫu dưỡng hộ nước ở cùng cấp phối. Mẫu ĐC giảm từ khoảng 3.9% xuống khoảng 3.6% sau cacbonat hóa. Với các cấp phối dùng TB, độ hút nước tăng so với ĐC, đạt khoảng 4.4% ở T20 và khoảng 4.5% ở T30 khi dưỡng hộ nước. Sau cacbonat hóa, các giá trị này giảm còn xấp xỉ 4.1% đối với T20 và khoảng 4.2% đối với T30. Đối với cấp phối phối hợp TB và XLM, T30X10 có độ hút nước khoảng 4.3% khi dưỡng hộ nước và giảm xuống khoảng 3.9% sau cacbonat hóa.

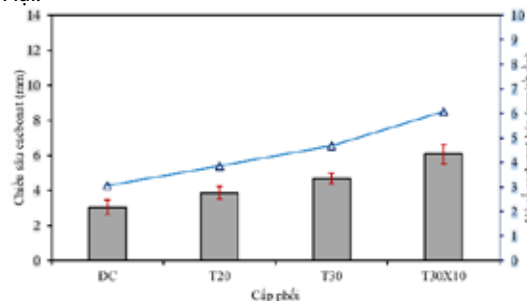
Xu hướng giảm độ hút nước sau cacbonat hóa phù hợp với biến thiên khối lượng thể tích đã được trình bày ở Mục 3.3, trong đó các mẫu sau cacbonat hóa có xu hướng tăng nhẹ khối lượng thể tích, phản ánh mức độ đặc sít cao hơn của ma trận. Về cơ chế, khoáng hóa CO₂ có thể tạo sản phẩm cacbonat và lấp đầy một phần lỗ rỗng liên thông, qua đó hạn chế đường dẫn thấm từ của nước. Ở chế độ dưỡng hộ nước, các hệ có hàm lượng TB cao và phối hợp XLM cho độ hút nước lớn hơn, cho thấy mạng mao quản ở tuổi thí nghiệm vẫn tương đối phát triển khi tỷ lệ SCMs trong tổng hệ chất kết dính tăng. Khi chuyển sang dưỡng hộ cacbonat hóa, mức giảm độ hút nước ở các cấp phối có SCMs rõ hơn so với ĐC, gợi ý rằng sản phẩm cacbonat đã bù đắp một phần độ rỗng mao quản và cải thiện tính đặc sít.



Hình 6. Độ hút nước của bê tông dưỡng hộ nước và cacbonat không có và có TB và XLM

3.5. Chiều sâu cacbonat hóa

Hình 7 mô tả chiều sâu cacbonat hóa của bê tông (không có và có TB và XLM) sau khi cacbonat hóa và hệ số cacbonat hóa (mm/√tuần) tương ứng. Chiều sâu cacbonat hóa tăng dần theo hàm lượng SCMs, từ khoảng 3 mm ở ĐC lên khoảng 4 mm ở T20 và khoảng 4,7 mm ở T30. Mẫu T30X10 cho giá trị lớn nhất, xấp xỉ 6 mm. Xu hướng tương tự cũng được ghi nhận đối với hệ số cacbonat hóa, trong đó T30X10 đạt mức cao nhất so với các cấp phối còn lại.



Hình 7. Chiều sâu và hệ số cacbonat hóa của bê tông sau khi cacbonat hóa

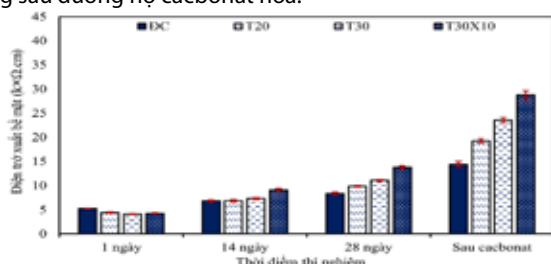
Sự gia tăng chiều sâu và hệ số cacbonat hóa khi tăng TB và phối hợp XLM có thể liên quan đến khả năng thâm nhập CO₂ thuận lợi hơn, đồng thời mức dự trữ kiềm trong hệ có thể thay đổi do TB và XLM được bổ sung vào hệ chất kết dính. Về cơ chế hóa học, TB có thể tham gia phản ứng pozzolan với Ca(OH)₂ để hình thành thêm C-S-H, trong khi XLM có thể phát triển tính thủy lực tiềm tàng trong môi trường kiềm để tạo thêm C-S-H/C-A-S-H, qua đó làm giảm một phần hàm lượng vôi tự do có khả năng tham gia phản ứng cacbonat hóa trực tiếp. Tuy nhiên, chiều sâu cacbonat hóa được xác định bằng chỉ thị phenolphthalein không chỉ phản ánh lượng Ca(OH)₂ bị cacbonat hóa, mà còn chịu chi phối bởi khả năng khuếch tán CO₂, độ liên thông lỗ rỗng và khả năng đệm kiềm của pha rắn trong chất kết dính. Điều này phù hợp với kết quả độ hút nước ở Mục 3.4, nơi các cấp phối có SCMs cho độ hút nước cao hơn trong chế độ dưỡng hộ nước, hàm ý rằng mạng mao quản và tính liên thông lỗ rỗng có thể lớn hơn ở tuổi thí nghiệm. Vì vậy, dù lượng Ca(OH)₂ tự do có thể giảm khi bổ sung SCMs, các cấp phối có TB và XLM vẫn cho chiều sâu cacbonat hóa lớn hơn ĐC do CO₂ thâm nhập thuận lợi hơn.

3.6. Điện trở suất bề mặt

Chỉ số điện trở suất bề mặt của bê tông (không có và có TB và XLM) được đo ở 1, 14, 28 ngày và sau khi cacbonat hóa được trình bày ở Hình 8. Ở giai đoạn sớm từ 1 đến 28 ngày, điện trở suất của tất cả các cấp phối đều tăng theo thời gian, phản ánh quá trình thủy hóa làm giảm tính liên thông của hệ lỗ rỗng và làm dung dịch lỗ rỗng kém dẫn điện hơn. Ở 1 ngày tuổi, các cấp phối sử dụng SCMs có điện trở suất bề mặt thấp hơn so với mẫu ĐC. Kết quả này liên quan đến việc bổ sung TB và XLM vào hệ chất kết dính, trong khi phản ứng pozzolan của TB và tính thủy lực tiềm tàng của XLM

chưa phát triển đáng kể ở tuổi sớm. Do đó, lượng sản phẩm C-S-H/C-A-S-H bổ sung chưa đủ để tinh chỉnh và giảm tính liên thông của hệ lỗ rỗng mao quản, khiến bê tông chứa SCMs vẫn có điện trở suất bề mặt thấp hơn ở giai đoạn đầu. Ngược lại, các thời điểm thí nghiệm khác, các cấp phối có TB và XLM có điện trở suất cao hơn tại cùng thời điểm, và mức chênh lệch có xu hướng tăng khi hàm lượng SCMs tăng. Đến 28 ngày, T30X10 đạt giá trị lớn nhất, cho thấy hệ có SCMs có khả năng cản trở dẫn truyền ion bề mặt tốt hơn ngay cả trước khi áp dụng cacbonat hóa.

Sau giai đoạn tiền dưỡng hộ 28 ngày tuổi, khi chuyển sang trạng thái sau cacbonat hóa, điện trở suất của tất cả các cấp phối tăng rõ rệt và mức tăng thể hiện mạnh nhất ở các hỗn hợp có SCMs, đặc biệt là T30X10. Xu hướng này cho thấy quá trình cacbonat hóa đã làm thay đổi cấu trúc lỗ rỗng theo hướng giảm tính liên thông, qua đó làm tăng khả năng cản trở vận chuyển ion ở vùng bề mặt. Kết quả này phù hợp với xu hướng giảm độ hút nước (Mục 3.4) và xu hướng tăng nhẹ khối lượng thể tích ở Mục 3.3, đều hàm ý hệ nền chất kết dính đặc sít hơn sau cacbonat hóa. Tuy nhiên, khi đối chiếu với chiều sâu cacbonat hóa ở Mục 3.5, các cấp phối có SCMs lại cho chiều sâu cacbonat hóa lớn hơn, cho thấy khả năng thâm nhập CO₂ theo chiều sâu có thể thuận lợi hơn trong các hệ này. Điều này gợi ý rằng điện trở suất bề mặt phản ánh chủ yếu trạng thái vùng bề mặt, trong khi chiều sâu cacbonat hóa chịu sự chi phối bởi cả mức dự trữ kiềm và khả năng khuếch tán CO₂ vào trong cấu kiện. Do đó, việc sử dụng đồng thời điện trở suất bề mặt và chiều sâu cacbonat hóa giúp mô tả đầy đủ hơn sự thay đổi về tính vận chuyển và mức độ đồng nhất theo chiều sâu của bê tông sau dưỡng hộ cacbonat hóa.



Hình 8. Điện trở suất bề mặt của bê tông không có và có TB và XLM ở 1, 14 ngày, trước (28 ngày) và sau cacbonat hóa

4. KẾT LUẬN

Nghiên cứu này đánh giá ảnh hưởng của dưỡng hộ CO₂ sau 28 ngày dưỡng hộ nước đối với bê tông có bổ sung SCMs gồm TB và XLM. Từ các kết quả thực nghiệm, có thể rút ra các kết luận chính như sau:

- Về tính công tác: Việc bổ sung TB hoặc TB kết hợp với XLM làm tăng 8 - 25% độ sụt của hỗn hợp bê tông so với cấp phối đối chứng.
- Về cường độ chịu nén: Dưỡng hộ cacbonat hóa làm tăng khoảng 7 - 18% cường độ chịu nén ở tất cả các cấp phối so với dưỡng hộ nước.
- Về khối lượng thể tích: Mẫu bê tông cacbonat hóa tăng nhẹ khối lượng thể tích so với trước khi cacbonat hóa.
- Về độ hút nước: Dưỡng hộ cacbonat hóa làm giảm khoảng 7 - 9% độ hút nước ở tất cả các cấp phối so với dưỡng hộ nước.
- Về chiều sâu cacbonat hóa: Chiều sâu cacbonat hóa sau 168 giờ dưỡng hộ CO₂ đạt khoảng 3 - 6 mm và tăng khi tăng hàm lượng SCMs.
- Về điện trở suất bề mặt: Dưỡng hộ cacbonat hóa làm tăng khoảng 75-105% điện trở suất bề mặt so với trạng thái trước cacbonat hóa ở 28 ngày tuổi.

Nhìn chung, dưỡng hộ CO₂ sau 28 ngày dưỡng hộ nước có thể cải thiện một số chỉ tiêu kỹ thuật của bê tông, đặc biệt là giảm độ hút nước, tăng điện trở suất bề mặt và duy trì hoặc cải thiện cường độ chịu nén. Các nghiên cứu tiếp theo cần tối ưu thành phần chất kết dính và điều kiện dưỡng hộ CO₂ nhằm cân bằng hiệu quả lưu giữ CO₂, tính đồng nhất theo chiều sâu và độ bền trong môi trường xâm thực.

Lời cảm ơn: Nhóm tác giả xin trân trọng cảm ơn Trường Đại học Bách khoa - Đại học Quốc gia TP.HCM đã hỗ trợ thực hiện nghiên cứu này. Tác giả xin gửi lời cảm ơn chân thành đến anh Trần Quốc Thọ vì sự hỗ trợ trong quá trình thực nghiệm.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] M. Hanifa, R. Agarwal, U. Sharma, P. C. Thapliyal and L. P. Singh. A review on CO₂ capture and sequestration in the construction industry: Emerging approaches and commercialized technologies. J. CO₂ Util., vol. 67, p. 102292, Jan. 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jcou.2022.102292>.
- [2] J. Monteiro and S. Roussanly. CCUS scenarios for the cement industry: Is CO₂ utilization feasible? J. CO₂ Util., vol. 61, p. 102015, Jul. 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jcou.2022.102015>.
- [3] M. Schneider. The cement industry on the way to a low-carbon future. Cem. Concr. Res., vol. 124, p. 105792, Oct. 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.105792>.
- [4] K. Aghaee. Carbon capture, utilization and storage for sustainable construction: Insights into CO₂ mixing, curing, and mineralization. Carbon Capture Sci. Technol., vol. 17, p. 100503, Dec. 2025, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ccs.2025.100503>.
- [5] Y.-X. Zou, X.-B. Zuo, G.-J. Yin, H.-L. Zhang and F.-B. Ding. Utilization of industrial wastes on the durability improvement of cementitious materials: A comparative study between FA and GGBFS. Constr. Build. Mater., vol. 421, p. 135629, Mar. 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.135629>.
- [6] A. Kashani, R. Hameed, Md. T. H. Khondoker, W. Li, T. Kim, and V. W. Y. Tam. Carbon utilization for low-carbon concrete: Prospects for carbonated steel slag and recycled concrete. Resour. Conserv. Recycl., vol. 226, p. 108698, Feb. 2026, doi: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2025.108698>.
- [7] Bộ Khoa học và Công nghệ. TCVN 2682:2020 Xi măng poóc lăng, 2020.
- [8] Bộ Khoa học và Công nghệ. TCVN 10302:2014 Phụ gia hoạt tính tro bay dùng cho bê tông, vữa xây và xi măng, 2014.
- [9] Bộ Khoa học và Công nghệ. TCVN 11586:2016 Xi hạt lò cao nghiền mịn dùng cho bê tông và vữa.
- [10] Bộ Khoa học và Công nghệ. TCVN 7570:2006 Cốt liệu cho bê tông và vữa - Yêu cầu kỹ thuật, 2006.
- [11] Bộ Khoa học và Công nghệ. TCVN 4506:2012 Nước cho bê tông và vữa - Yêu cầu kỹ thuật, 2012.
- [12] American Society for Testing and Materials. ASTM C494/C494M-19e1 Standard specification for chemical admixtures for concrete, 2019.
- [13] American Concrete Institute. ACI 211-22 Standard practice for selecting proportions for normal, heavyweight, and mass concrete, 2022.
- [14] Bộ Khoa học và Công nghệ. TCVN 3106:2022 Hỗn hợp bê tông - Phương pháp xác định độ sụt, 2022.
- [15] Bộ Khoa học và Công nghệ. TCVN 3118:2022 Bê tông - Phương pháp xác định cường độ chịu nén, 2022.
- [16] Bộ Khoa học và Công nghệ. TCVN 3115:2022 Bê tông - Phương pháp xác định khối lượng thể tích, 2022.
- [17] Bộ Khoa học và Công nghệ. TCVN 3113:2022 Bê tông - Phương pháp xác định độ hút nước, 2022.
- [18] Bộ Khoa học và Công nghệ. TCVN 13933:2024 Bê tông - Phương pháp xác định chiều sâu cacbonat hóa, 2024.
- [19] Bộ Khoa học và Công nghệ. TCVN 13929:2024 Bê tông - Phương pháp thử tăng tốc cacbonat hóa.
- [20] American Association of State Highway and Transportation Officials. AASHTO T358-21 Surface Resistivity Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration, 2021.