

Công nghệ 4.0 trong giám sát thông minh công trình bê tông cốt thép cũ: Trường hợp các chung cư ở TP Hồ Chí Minh

Industry 4.0 technology for intelligent monitoring of old reinforced concrete structures: The case of apartment buildings in Ho Chi Minh City

> **NGUYỄN KHẮC QUÂN^{1,2,3}, NGUYỄN THANH PHONG^{1,2,*}, NGUYỄN MẬU PHƯỚC⁴, CHÂU ĐỨC HUỆ⁴**

¹Nhóm nghiên cứu liên ngành về QLDA & Tri thức chuyên nghiệp (K2P), Trường Đại học Mở Thành phố Hồ Chí Minh

²Bộ môn QLXD, Khoa Xây dựng, Trường Đại học Mở Thành phố Hồ Chí Minh

³Trung tâm nghiên cứu ứng dụng và chuyển giao công nghệ xây dựng (REATTEC), Khoa Xây dựng, Trường Đại học Mở Thành phố Hồ Chí Minh

⁴Công ty Cổ phần Kỹ thuật Geoscan

*Corresponding author: Email: phong.nt@ou.edu.vn

TÓM TẮT

Trong các công trình chung cư bê tông cốt thép (BTCT) cũ ở TP.HCM (được xây dựng từ giai đoạn 1960 - 1970, thời gian sử dụng khoảng 50 - 60 năm), quá trình cacbonat hóa đã tiến triển sâu rộng, đe dọa đến tuổi thọ kết cấu công trình. Các kết quả khảo sát hiện trường cho thấy chiều sâu cacbonat hóa phổ biến là 30 - 50 mm (có nơi lên tới gần 60 mm), thường lớn hơn hoặc xấp xỉ độ dày lớp bảo vệ bê tông (20 - 40 mm). Điều này cho thấy lớp môi trường kiềm bảo vệ cốt thép đã bị phá hủy, thép bên trong mất tính thụ động và dễ bắt đầu quá trình ăn mòn (rỉ sét) nếu không được khắc phục. Kết quả nghiên cứu này có ý nghĩa quan trọng trong giám sát và quản lý công trình, chứng minh rằng nhiều vị trí trong kết cấu đã đạt hoặc vượt giới hạn an toàn do cacbonat hóa. Do đó, công tác giám sát bảo trì và quản lý rủi ro công trình BTCT cần chú trọng kiểm định định kỳ (như đo chiều sâu cacbonat, kiểm tra bề mặt bê tông), ưu tiên các cấu kiện có lớp bảo vệ mỏng hoặc đã bị phá hủy. Ngoài ra, các biện pháp bảo vệ bổ sung (ví dụ: sơn chống cacbonat hóa) và kế hoạch cải tạo chung cư cũ cũng cần được xem xét nhằm kéo dài tuổi thọ của công trình.

Từ khóa: Bê tông cốt thép; độ bền công trình; quản lý bảo trì; giám sát hiện trạng; mất thụ động; ăn mòn cốt thép; chung cư cũ.

ABSTRACT

In old reinforced-concrete apartment buildings in Ho Chi Minh City (constructed between 1960 and 1970), carbonation has progressed extensively, posing a serious threat to structural service life. Field investigations indicate that carbonation depth commonly ranges from 30 to 50 mm (reaching nearly 60 mm at some locations), and is often greater than or comparable to the concrete cover thickness (20 - 40 mm). This implies that the alkaline environment protecting the reinforcement has been destroyed; the embedded steel has become depassivated and may readily initiate corrosion (rusting) if no remedial measures are taken. These findings have important implications for structural monitoring and asset management: they provide evidence that many structural locations have reached or exceeded safety thresholds due to carbonation. Therefore, maintenance monitoring and risk management should prioritize periodic inspections (e.g., measuring carbonation depth and checking concrete surface condition), with special attention to elements where the cover is thin or already compromised. In addition, supplementary protection measures (such as anti-carbonation coatings) and renovation plans for aging apartment buildings should be considered to extend the service life of the structures.

Keywords: Reinforced concrete; structural durability; maintenance management; condition monitoring; depassivation; reinforcement corrosion; aging apartment building.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

BTCT là vật liệu xây dựng được sử dụng rộng rãi trong các công trình nhà ở đô thị nhờ khả năng chịu lực tốt và hiệu quả kinh tế. Tuy nhiên, nhiều công trình BTCT được xây dựng vào giữa thế kỷ XX ở TP.HCM hiện nay đã tiến gần hoặc vượt quá tuổi thọ thiết kế ban đầu. Điều kiện khí hậu nhiệt đới ẩm (độ ẩm 50 - 75%) tại TP.HCM tạo điều kiện thuận lợi cho quá trình cacbonat hóa bê tông diễn ra nhanh hơn (Papadakis, 1992; Chen, 2018). Cacbonat hóa là quá trình CO_2 trong không khí xâm nhập bê tông và phản ứng với canxi trong hồ xi măng, tạo thành canxi cacbonat và làm giảm pH bên trong bê tông. Khi pH giảm xuống mức khoảng 8-9, lớp màng thụ động bảo vệ cốt thép sẽ bị suy yếu và phá vỡ, khiến thép dễ bị rỉ sét và gây nứt vỡ bê tông (Tuutti, 1980; Angst, 2020; Song & Saraswathy, 2007).

Công nghệ 4.0 trong giám sát công trình có thể được hiểu là sự tích hợp giữa việc thu thập dữ liệu hiện trường và nền tảng mô hình hóa-đồng bộ dữ liệu kết hợp với việc phân tích dữ liệu hỗ trợ quyết định giúp đánh giá rủi ro và tối ưu kế hoạch bảo trì (Wei, 2025). Đối với chung cư BTCT cũ, dữ liệu cacbonat hóa và lớp bảo vệ trong nghiên cứu này đóng vai trò “dữ liệu nền” để thiết lập chỉ số suy giảm độ bền, từ đó kết nối vào quy trình giám sát thông minh theo thời gian, giúp cảnh báo sớm, và ưu tiên can thiệp theo mức rủi ro.

Trong bối cảnh đô thị hóa nhanh và điều kiện môi trường ngày càng khắc nghiệt do biến đổi khí hậu, suy thoái độ bền của các công trình BTCT cũ đang trở thành mối quan tâm lớn đối với công tác quản lý và cải tạo nhà ở. Mặc dù cacbonat hóa đã được nghiên cứu bằng các thí nghiệm trong phòng và các mô hình, các dữ liệu hiện trường dài hạn từ các công trình đã khai thác hàng chục năm vẫn còn hạn chế, đặc biệt trong điều kiện khí hậu nhiệt đới (Hu et al., 2020). Tại Việt Nam, nhiều khu chung cư BTCT xây dựng từ thập niên 1960 - 1970 hiện đang xuống cấp nghiêm trọng, tuy nhiên các nghiên cứu khoa học định lượng về vai trò của cacbonat hóa trong hiện tượng mất thụ động cốt thép vẫn còn rất ít.

Mặt khác, trong quy hoạch đô thị, TP.HCM đã xác định hàng trăm chung cư cũ cần được cải tạo: ví dụ năm 2025 có khoảng 474 chung cư (xây trước 1975) cần bảo trì hoặc tái thiết, trong đó nhiều toà ở mức độ hư hỏng nghiêm trọng (cấp độ D). Do đó, hiểu rõ tác động của cacbonat hóa là hết sức cần thiết để định hướng công tác bảo trì, đảm bảo an toàn và tính bền vững của các công trình chung cư này. Nghiên cứu này nhằm khảo sát sự phát triển chiều sâu cacbonat hóa và đánh giá hiện tượng mất thụ động cốt thép trong bảy chung cư BTCT đã cũ tại TP.HCM. Thông qua các phép đo hiện trường và so sánh với chiều dày lớp bê tông bảo vệ, nghiên cứu cung cấp bằng chứng khoa học về cơ chế suy thoái độ bền chi phối trong các công trình nhà ở đô thị trong điều kiện khí hậu nhiệt đới tại TP.HCM.

2. TỔNG QUAN NGHIÊN CỨU

Cacbonat hóa bê tông là một quá trình kết hợp giữa khuếch tán khí CO_2 và phản ứng hóa học trong hệ mao mạch của bê tông. Các mô hình phản ứng - khuếch tán đã chỉ ra rằng chiều sâu cacbonat hóa tăng theo căn bậc hai của thời gian trong điều kiện môi trường ổn định (Lele et. al., 2023). Theo mô hình hai giai đoạn của Tuutti (1980), cacbonat hóa đóng vai trò là cơ chế khởi phát ăn mòn, dẫn đến hiện tượng mất thụ động cốt thép khi mặt cacbonat hóa chạm đến bề mặt thép.

Nhiều nghiên cứu cho thấy độ ẩm tương đối, nhiệt độ và chu kỳ ướt - khô có ảnh hưởng quyết định đến tốc độ cacbonat hóa. Trong điều kiện khí hậu nhiệt đới, độ ẩm cao kéo dài, lượng mưa

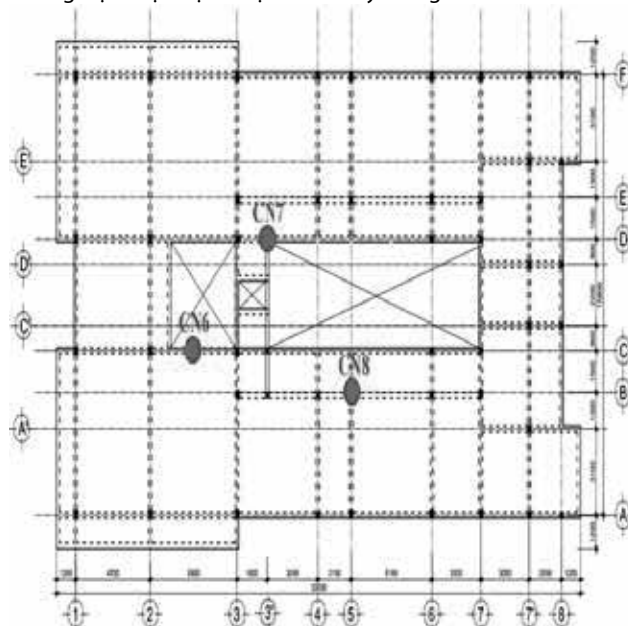
lớn và hiện tượng thẩm ẩm thường xuyên sẽ tạo điều kiện thuận lợi cho quá trình cacbonat hóa dài hạn. Các nghiên cứu hiện trường ở các khu vực nhiệt đới và cận nhiệt đới ghi nhận chiều sâu cacbonat hóa lớn hơn đáng kể so với các khu vực ôn đới đối với các công trình cùng tuổi. Độ ẩm duy trì ở mức 50 - 75% là ngưỡng tối ưu cho cacbonat hóa, trong khi độ ẩm rất cao ($\geq 75\%$) có thể làm bão hòa hơi nước trong lỗ rỗng và hạn chế CO_2 xâm nhập.

Mặt khác, mất thụ động cốt thép xảy ra khi pH của dung dịch lỗ rỗng giảm xuống dưới ngưỡng cần thiết để duy trì lớp màng thụ động bảo vệ thép. Khi đã mất thụ động, cốt thép trở nên nhạy cảm với ăn mòn trong sự hiện diện của oxy và độ ẩm. Chiều dày lớp bê tông bảo vệ được xem là tham số quyết định thời gian đến mất thụ động, đặc biệt trong các công trình cũ có lớp bảo vệ mỏng. Thực tế cho thấy, chất lượng bê tông (đặc chắc, tỷ lệ nước/xi măng, độ bền), điều kiện thi công và môi trường xung quanh chung cư quyết định mức độ suy giảm nhiều hơn. Tóm lại, cacbonat hóa diễn biến chậm nhưng tích lũy, và khi nó chạm đến thép thì hậu quả lâu dài cho độ bền kết cấu là rất lớn.

3. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

Có 7 chung cư BTCT cũ của TP.HCM được lựa chọn cho trường hợp nghiên cứu này. Các công trình có quy mô từ 4 đến 8 tầng, được xây dựng trong giai đoạn từ thập niên 1960 - 1970, với hệ kết cấu khung BTCT. Các công trình đã được khai thác liên tục trong khoảng 50 - 60 năm và có nhiều biểu hiện xuống cấp.

Vị trí các điểm thí nghiệm được phân bố tại nhiều tầng và nhiều loại cấu kiện nhằm phản ánh các điều kiện môi trường sử dụng khác nhau trong công trình. Sơ đồ mặt bằng các tầng và vị trí thí nghiệm đại diện được trình bày trong Hình 1.



Hình 1. Vị trí các điểm thí nghiệm đo chiều sâu cacbonat hóa tại các tầng và cấu kiện chịu lực chính trong các chung cư khảo sát

Chiều sâu cacbonat hóa được xác định bằng dung dịch chỉ thị phenolphthalein 1% theo tiêu chuẩn TCVN 13933:2024. Bề mặt bê tông tại mỗi vị trí thí nghiệm được làm lộ phần bê tông mới, sau đó phun dung dịch chỉ thị để xác định ranh giới cacbonat hóa thông qua sự thay đổi màu sắc của bê tông. Quá trình thí nghiệm hiện trường và ranh giới cacbonat hóa được minh họa thông qua các hình ảnh thí nghiệm điển hình trong Hình 2.

Hiện tượng mất thụ động cốt thép được đánh giá gián tiếp thông qua so sánh chiều sâu cacbonat hóa đo được với chiều dày lớp bê tông bảo vệ. Khi chiều sâu cacbonat hóa vượt quá lớp bảo vệ, cốt thép được coi là đã mất môi trường kiểm bảo vệ và ở trạng thái mất thụ động.



Hình 2. Hình ảnh thí nghiệm hiện trường đo chiều sâu cacbonat hóa bằng dung dịch phenolphthalein 1% tại các cấu kiện dầm và cột

4. KẾT QUẢ NGHIÊN CỨU

4.1. Tổng hợp kết quả đo chiều sâu cacbonat hóa

Kết quả tổng hợp chiều sâu cacbonat hóa và chiều dày lớp bê tông bảo vệ của các cấu kiện cột BTCT tại các công trình khảo sát được trình bày trong Bảng 1. Dữ liệu thu thập từ 37 vị trí cột thuộc 7 chung cư BTCT cũ, phân bố trên nhiều tầng (từ tầng 1 đến tầng mái). Chiều dày lớp bê tông bảo vệ cốt thép đo được dao động trong khoảng từ 18 - 45 mm, với phần lớn các vị trí nằm trong khoảng 23 - 40 mm. Trong khi đó, chiều sâu cacbonat hóa đo được có giá trị khá lớn, dao động từ 13 - 59 mm. Phân tích sơ bộ cho thấy, trong số 37 vị trí khảo sát, phần lớn các cột có chiều sâu cacbonat hóa lớn hơn hoặc gần bằng lớp bê tông bảo vệ. Điều này phản ánh tình trạng suy giảm đáng kể khả năng bảo vệ cốt thép của bê tông.

Kết quả tổng hợp chiều sâu cacbonat hóa và chiều dày lớp bê tông bảo vệ của các cấu kiện dầm bê tông cốt thép tại các công trình khảo sát được trình bày trong Bảng 2. Dữ liệu được thu thập từ 35 vị trí dầm thuộc 07 chung cư BTCT cũ, phân bố trên nhiều tầng khác nhau, từ tầng 1 đến tầng mái. Chiều dày lớp bê tông bảo vệ cốt thép tại các dầm khảo sát dao động trong khoảng từ 10 - 74 mm, trong đó phần lớn các vị trí nằm trong khoảng 20 - 35 mm. Trong khi đó, chiều sâu cacbonat hóa ghi nhận được có giá trị tương đối lớn, dao động từ 7 - 57 mm. Phân tích sơ bộ cho thấy, tại phần lớn các vị trí dầm, chiều sâu cacbonat hóa đã vượt quá hoặc xấp xỉ chiều dày lớp bê tông bảo vệ, đặc biệt tại các dầm tầng cao và dầm tầng mái, cho thấy khả năng bảo vệ cốt thép của bê tông đã suy giảm đáng kể.

Dựa trên kết quả trong Bảng 1 và Bảng 2, có thể khẳng định hiện tượng mất thụ động của cốt thép đã xảy ra hoặc đang ở trạng thái cận kề tại phần lớn các vị trí cột và dầm được khảo sát.

Bảng 1. Tổng hợp kết quả đo chiều sâu cacbonat hóa và chiều dày lớp bê tông bảo vệ kết cấu Cột

STT	Mã vị trí	Vị trí kiểm tra	Lớp bê tông bảo vệ cốt thép (mm)	Chiều sâu cacbonat hóa (mm)
1	CN1	Cột tầng 1 Trục 2/A	40	33
2	CN3	Cột tầng 2 Trục 4/B	33	47
3	CN5	Cột tầng 3 Trục 3/C	36	30
4	CN7	Cột tầng 4 Trục 3/D	39	50
5	CN8	Cột tầng 4 Trục 5/B	34	29
6	CN1	Cột tầng 1 Trục 5/D	35	45
7	CN3	Cột tầng 2 Trục 3/D	33	40
8	CN5	Cột tầng 3 Trục 6/D	31	46
9	CN7	Cột tầng 4 Trục 7/D	33	52
10	CN9	Cột tầng 5 Trục 6/D	35	42
11	CN11	Cột tầng 6 Trục 4/C	23	34
12	CN12	Cột tầng 6 Trục 3/E	23	32
13	CN14	Cột tầng 7 Trục 7/B	33	40
14	CN16	Cột tầng 8 Trục 2/B	29	32
15	CN1	Cột tầng 1 Trục 11/B2	37	45
16	CN2	Cột tầng 1 Trục 13/B2	28	42
17	CN3	Cột tầng 1 Trục 12/E1	40	28
18	CN6	Cột tầng 2 Trục 13/B2	34	49
19	CN7	Cột tầng 2 Trục 10/E1	18	32
20	CN9	Cột tầng 3 Trục 5/C1	40	51
21	CN10	Cột tầng 3 Trục 9/B2	34	45
22	CN13	Cột tầng 4 Trục 7/E1	30	15
23	CN14	Cột tầng 4 Trục 11/B2	30	44
24	CN1	Cột tầng 1 Trục 4/D	28	18
25	CN3	Cột tầng 2 Trục 7/C	22	31
26	CN5	Cột tầng 3 Trục 1/D	23	14
27	CN7	Cột tầng 4 Trục 8/C	23	15
28	CN9	Cột tầng 5 Trục 3/B	23	13
29	CN1	Cột tầng mái Trục 4/C	26	43
30	CN4	Cột tầng 3 Trục 3/C	26	41
31	CN6	Cột tầng 2 Trục 5/D1	23	42
32	CN1	Cột tầng 1 Trục 1/A	32	44
33	CN2	Cột tầng 1 Trục 2/A	20	36
34	CN4	Cột tầng 2 Trục 1/A	45	59
35	CN6	Cột tầng 3 Trục 1/B	14	7
36	CN8	Cột tầng 4 Trục 2/A	35	50
37	CN10	Cột tầng 5 Trục 2/A	26	40

Bảng 2. Tổng hợp kết quả đo chiều sâu cacbonat hóa và chiều dày lớp bê tông bảo vệ kết cấu Dầm

STT	Mã vị trí	Vị trí kiểm tra	Lớp bê tông bảo vệ cốt thép (mm)	Chiều sâu cacbonat hóa (mm)
1	CN2	Dầm tầng 2 Trục 2/D-F	20	12
2	CN4	Dầm tầng 3 Trục C/3-4	35	43
3	CN6	Dầm tầng 4 Trục C/2-3	32	45
4	CN2	Dầm tầng 2 Trục 6/E-F	26	32
5	CN4	Dầm tầng 3 Trục 6/E-F	20	35
6	CN6	Dầm tầng 4 Trục 2/A-B	33	45
7	CN8	Dầm tầng 5 Trục F/6-7	32	45
8	CN10	Dầm tầng 6 Trục F/6-7	46	57
9	CBN13	Dầm tầng 7 Trục 2/E-F	33	45
10	CN15	Dầm tầng 8 Trục 2/E-F	46	52
11	CN4	Dầm tầng 2 Trục 13/B2-C2	22	35
12	CN5	Dầm tầng 2 Trục 17/B2-B3	20	40
13	CN8	Dầm tầng 3 Trục B2/13-15	36	44
14	CN11	Dầm tầng 4 Trục 6/B1-B3	25	31
15	CN12	Dầm tầng 4 Trục 7/E-E1	52	30
16	CN2	Dầm tầng 2 Trục 3/A-B	23	32
17	CN4	Dầm tầng 3 Trục 7/B-C	25	16
18	CN6	Dầm tầng 4 Trục 4/C-D	25	36
19	CN8	Dầm tầng 5 Trục 6-7/C	25	37
20	CN10	Dầm tầng mái Trục 7/B-C	25	36
21	CN2	Dầm tầng mái Trục 3-4/C	14	32
22	CN3	Dầm tầng 4 Trục 3-4/C	17	38
23	CN5	Dầm tầng 3 Trục 2/D-G	15	34
24	CN7	Dầm tầng 2 Trục 3-4/C	24	40
25	CN8	Dầm tầng 3 Trục 7-8/D	26	47
26	CN1	Dầm tầng mái Trục 9/C'-D	43	55
27	CN2	Dầm tầng mái Trục 2-3/E	23	40
28	CN3	Dầm tầng mái Trục 2-3/A	25	48
29	CN4	Dầm tầng mái Trục 3/C-D	10	43
30	CN5	Dầm tầng 1 Trục 3-4/D'	40	56
31	CN6	Dầm tầng 1 Trục 2-3/A	33	45
32	CN3	Dầm tầng 2 Trục 2/A-B	32	48
33	CN5	Dầm tầng 3 Trục 2/B-C	74	53
34	CN7	Dầm tầng 4 Trục 2/A-B	32	47
35	CN9	Dầm tầng 5 Trục 1-2/C	18	7

5. THẢO LUẬN

5.1. Mối quan hệ giữa chiều sâu cacbonat hóa và lớp bê tông bảo vệ

Kết quả khảo sát hiện trường cho thấy các chung cư cũ đều có chiều sâu cacbonat hóa lớn. Cụ thể, so sánh trực tiếp giữa chiều sâu cacbonat hóa và chiều dày lớp bê tông bảo vệ tại từng vị trí cho thấy một xu hướng nhất quán: lớp bê tông bảo vệ hiện hữu không còn đủ khả năng ngăn chặn quá trình cacbonat hóa tiếp cận cốt thép. Một số vị trí có chiều dày lớp bảo vệ tương đối lớn (từ 35 - 45 mm), chẳng hạn các cột tại chung cư L.C.T và chung cư P.N.T, vẫn ghi nhận chiều sâu cacbonat hóa vượt quá 45 - 50 mm. Điều này cho thấy, mặc dù lớp bê tông bảo vệ ban đầu đáp ứng yêu cầu thiết kế, dưới tác động của thời gian và môi trường, hiệu quả bảo vệ đã suy giảm rõ rệt.

Ngược lại, một số vị trí có chiều dày lớp bảo vệ nhỏ hơn (dưới 25 mm) thể hiện mức độ cacbonat hóa nhanh và sâu hơn, đặc biệt tại các cột tầng thấp và tầng trung gian. Điều này phản ánh vai trò quan trọng của chiều dày lớp bảo vệ, đồng thời cho thấy chiều dày lớp bê tông bảo vệ ban đầu không phải là yếu tố duy nhất quyết định mức độ cacbonat hóa. Các kết quả trên cho thấy, quá trình cacbonat hóa không chỉ phụ thuộc vào thiết kế ban đầu mà còn chịu ảnh hưởng mạnh mẽ của chất lượng bê tông, độ đặc chắc, mức độ thấm ẩm và điều kiện môi trường trong suốt vòng đời công trình.

5.2. Hiện tượng mất thụ động của cốt thép và ý nghĩa độ bền

Khi chiều sâu cacbonat hóa vượt quá lớp bê tông bảo vệ, môi trường kiềm cao của bê tông xung quanh cốt thép bị suy giảm, dẫn đến phá vỡ màng thụ động bảo vệ cốt thép. Dựa trên kết quả trong Bảng 1 và Bảng 2, có thể khẳng định rằng hiện tượng mất thụ động của cốt thép đã xảy ra hoặc đang ở trạng thái cận kề tại phần lớn các vị trí cột và dầm được khảo sát.

Đây là một kết quả có ý nghĩa quan trọng trong đánh giá độ bền của các chung cư cũ. Mặc dù không phải tất cả các vị trí đều đã xuất hiện biểu hiện ăn mòn rõ ràng trên bề mặt, nhưng việc lớp thụ động bị phá vỡ đồng nghĩa với việc cốt thép trở nên nhạy cảm hơn với sự xâm nhập của oxy và độ ẩm, từ đó làm gia tăng nguy cơ ăn mòn trong giai đoạn tiếp theo.

So sánh kết quả giữa các cấu kiện cột và dầm cho thấy xu hướng suy thoái do cacbonat hóa xuất hiện trên diện rộng và mang tính hệ thống, không giới hạn ở một loại cấu kiện hay một vị trí tầng cụ thể. Mức độ cacbonat hóa chịu ảnh hưởng tổng hợp của nhiều yếu tố như chất lượng bê tông ban đầu, chiều dày lớp bảo vệ, điều kiện thấm ẩm và môi trường khai thác trong suốt vòng đời công trình, thay vì chỉ phụ thuộc vào chiều dày lớp bê tông bảo vệ theo thiết kế.

6. KẾT LUẬN

Nghiên cứu đã trình bày các bằng chứng hiện trường về sự phát triển chiều sâu cacbonat hóa và hiện tượng mất tính thụ động của cốt thép trong bảy chung cư BTCT cũ tại TP.HCM, được xây dựng trong giai đoạn thập niên 1960 - 1970 và đã khai thác liên tục trong khoảng 50 - 60 năm.

Thông qua tổng cộng 72 phép đo hiện trường tại các cấu kiện chịu lực chính (cột và dầm), chiều sâu cacbonat hóa được xác định bằng dung dịch phenolphthalein 1% theo TCVN 13933:2024, và được so sánh trực tiếp với chiều dày lớp bê tông bảo vệ cốt thép.

Kết quả nghiên cứu cho thấy chiều sâu cacbonat hóa tại các công trình khảo sát có giá trị tương đối lớn, phổ biến trong khoảng 30 - 50 mm và đạt tới gần 60 mm tại một số vị trí. Trong khi đó, chiều dày lớp bê tông bảo vệ cốt thép đo được chủ yếu nằm trong khoảng 20 - 40 mm, phù hợp với các tiêu chuẩn thiết kế và thi công được áp dụng tại thời điểm xây dựng. Phân tích dữ liệu cho thấy tại phần lớn các vị trí cột và dầm được khảo sát, chiều sâu cacbonat hóa đã vượt quá hoặc xấp xỉ bằng chiều dày lớp bê tông bảo vệ, phản ánh sự suy

giảm rõ rệt khả năng bảo vệ cốt thép của bê tông sau thời gian sử dụng dài.

Chiều sâu cacbonat hóa vượt qua lớp bê tông bảo vệ cho thấy môi trường kiềm cao xung quanh cốt thép đã bị phá vỡ, dẫn đến hiện tượng mất thụ động của cốt thép tại nhiều cấu kiện. Mặc dù không phải tất cả các vị trí đều đã xuất hiện biểu hiện ăn mòn rõ ràng trên bề mặt, trạng thái mất thụ động làm gia tăng đáng kể nguy cơ ăn mòn cốt thép trong sự hiện diện của oxy và độ ẩm, đặc biệt trong điều kiện khí hậu nhiệt đới ẩm của TP.HCM.

Kết quả trên nhấn mạnh rằng cần kiểm tra định kỳ và bảo trì ở các chung cư BTCT cũ. Cụ thể, các cán bộ quản lý nên đưa kiểm tra cacbonat hóa bê tông vào quy trình bảo dưỡng định kỳ (ví dụ đo chiều sâu cacbonat, khảo sát vết nứt bê tông). Kết quả đo hiện trường có thể sử dụng để dự báo tuổi thọ còn lại của kết cấu, từ đó xác định thời điểm sửa chữa tiếp theo. Những phần bị cacbonat hóa sâu (cột, dầm tầng trệt/tầng thấp) nên được ưu tiên can thiệp: có thể gia cố, trám sửa phần bê tông hư hại và sử dụng vật liệu bịt kín chống xâm nhập. Ngoài ra, các biện pháp chống cacbonat hóa bổ sung (như sơn phủ chống CO₂ trên bề mặt mới) cũng được khuyến nghị. Những chung cư có rủi ro cao cần được lên kế hoạch cải tạo hoặc thay thế sớm, phù hợp với định hướng chung của TP.HCM.

Từ những kết quả trên, rõ ràng rằng cacbonat hóa bê tông là một trong các cơ chế chính làm suy giảm độ bền của chung cư cũ. Bằng chứng thực tế này cung cấp cơ sở khoa học để các nhà quản lý xây dựng lên kế hoạch kiểm định, bảo trì và cải tạo hợp lý, đảm bảo an toàn công trình. Việc áp dụng tư duy quản lý tài sản (asset management) và giải pháp kỹ thuật kịp thời sẽ giúp kéo dài tuổi thọ kết cấu và bảo vệ tốt hơn nguồn vốn hạ tầng đô thị.

Lời cảm ơn: Nghiên cứu này được Bộ Giáo dục và Đào tạo tài trợ trong đề tài mã số B2025-MBS-03.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. Papadakis, V. G., Vayenas, C. G., & Fardis, M. N. Experimental investigation and mathematical modeling of the concrete carbonation problem. *Chemical Engineering Science*, 46(5-6), 1333-1338, (1991).
- [2]. Papadakis, V. G., Fardis, M. N., & Vayenas, C. G. Effect of composition, environmental factors and cement-lime mortar coating on concrete carbonation. *Materials and Structures*, 25(5), 293-304, (1992).
- [3]. Tuutti, K. Service life of structures with regard to corrosion of embedded steel. *Special Publication*, 65, 223-236, (1980).
- [4]. Angst, U. M. Challenges and opportunities in corrosion of steel in concrete. *Materials and Structures*, 51(1), 4, (2018).
- [5]. Chen, Y., Wang, J., Zhou, Z., & Chen, X. Effects of environmental factors on carbonation depth of concrete. *Materials*, 11(11), 2167, (2018).
- [6]. Bastidas-Arteaga, E., Rianna, G., Gervasio, H., & Nogal, M. Multi-region lifetime assessment of reinforced concrete structures subjected to carbonation and climate change. In *Structures* (Vol. 45, pp. 886-899). Elsevier, (2022).
- [7]. Lele, H. F., Beushausen, H., & Alexander, M. G. A practical carbonation model for service life design of reinforced concrete structures. *Scientific African*, 20, e01677, (2023).
- [8]. Vu, Q. H., Pham, G., Huet, B., & Barbarulo, R. Natural carbonation of concrete: An Initiation model for service life prediction. *International Journal of Sustainable Building Technology and Urban Development*, 15(2), 176-197, (2024).
- [9]. Phong Thanh Nguyen. Introduction to AI in Construction & Project Management (Internal circulation document), Ho Chi Minh City Open University, (2025).
- [10]. Pugliese, F., Prescott, D. R., Andrews, J., & Calvert, G. An advanced Petri-Net Modelling Approach for Risk Asset Management of Reinforced Concrete Ageing Transportation Infrastructure Under Climate Change Effects. *Reliability Engineering & System Safety*, 112253, (2026).
- [11]. Stewart, M. G., & Mullard, J. A. Spatial time-dependent reliability analysis of corrosion damage and the timing of first repair for RC structures. *Engineering structures*, 29(7), 1457-1464, (2007).

- [12]. Luping, T., & Nilsson, L. O. Rapid determination of the chloride diffusivity in concrete by applying an electric field. *Materials Journal*, 89(1), 49-53, (1993).
- [13]. Song, H. W., & Saraswathy, V. Corrosion monitoring of reinforced concrete structures-A review. *International Journal of Electrochemical Science*, 2, 1-28, (2007).
- [14]. Andrade, C., & Alonso, C. On-site measurements of corrosion rate of reinforcements. *Construction and Building Materials*, 15(2-3), 141-145, (2001).
- [15]. TCVN 13933:2024. Bê tông-Xác định chiều sâu cacbonat hóa. Bộ Khoa học và Công nghệ, (2024).
- [16]. Chang, C. F., & Chen, J. W. The experimental investigation of concrete carbonation depth. *Cement and Concrete research*, 36(9), 1760-1767, (2006).
- [17]. Torres-Acosta, A. A., Castro-Borges, P., de Rincón, O. T., Martín-Pérez, B., Martínez-Molina, W., Alonso-Guzmán, E., ... & Moreno-Herrera, J. A. Concrete carbonation in tropical urban and urban/marine environments after 20 years of natural exposure. *Construction and Building Materials*, 450, 138511, (2024).
- [18]. Wei, H. U., Yifu, O. U., & Haiyi, L. I. U. Integrating digital twin technologies for maintenance 4.0 in the building industry: A review and conceptual framework. *Building and Environment*, 113997, (2025).
- [19]. Hu, W., Lim, K. Y. H., & Cai, Y. Digital twin and industry 4.0 enablers in building and construction: a survey. *Buildings*, 12(11), 2004, (2022).
- [20]. Jirawattanasomkul, T., Hang, L., Srivaranun, S., Likitlersuang, S., Jongvivatsakul, P., Yodsudjai, W., & Thammarak, P.. Digital twin-based structural health monitoring and measurements of dynamic characteristics in balanced cantilever bridge. *Resilient Cities and Structures*, 4(3), 48-66, (2025).