

NGHIÊN CỨU SO SÁNH QUY ĐỊNH BẢO VỆ CHỐNG ĂN MÒN CỐT THÉP CÔNG TRÌNH NHÀ BÊ TÔNG CỐT THÉP VEN BIỂN THEO CÁC TIÊU CHUẨN VIỆT NAM VÀ QUỐC TẾ

Nguyễn Đăng Nguyên^{a,*}

^a*Khoa Xây dựng Dân dụng và Công nghiệp, Trường Đại học Xây dựng Hà Nội, 55 đường Giải Phóng, quận Hai Bà Trưng, Hà Nội, Việt Nam*

Nhận ngày 04/9/2024, Sửa xong 17/02/2025, Chấp nhận đăng 18/4/2025

Tóm tắt

Hiện nay, việc thiết kế và thi công các công trình nhà bê tông cốt thép ven biển ở Việt Nam áp dụng các tiêu chuẩn TCVN 9346:2012, TCVN 12041:2017, và TCVN 12251:2020 để đáp ứng các yêu cầu về bảo vệ chống ăn mòn cốt thép, đồng thời sử dụng TCVN 5574:2018 để tính toán dự báo chiều rộng vết nứt. Tuy nhiên, một số quy định trong TCVN 9346:2012, TCVN 12041:2017, và TCVN 12251:2020 còn có nhiều vấn đề bất cập, khá khắt khe trong mối tương quan với các quy định của các tiêu chuẩn quốc tế. Do đó, bài báo này sẽ tổng hợp so sánh các quy định về bảo vệ chống ăn mòn cốt thép cho các công trình bê tông cốt thép ven biển theo các tiêu chuẩn Việt Nam, Mỹ, và Châu Âu nhằm làm rõ hơn sự tương đồng và khác biệt giữa các tiêu chuẩn. Trong bài báo cũng sẽ tổng hợp các phương pháp tính toán và kiểm soát chiều rộng vết nứt giữa các tiêu chuẩn liên quan, từ đó thực hiện ví dụ tính toán để đưa ra nhận xét so sánh.

Từ khóa: bê tông cốt thép; ăn mòn cốt thép; lớp bảo vệ; chiều rộng vết nứt; tiêu chuẩn thiết kế.

COMPARATIVE STUDY OF REGULATIONS ON CORROSION PROTECTION OF REINFORCED CONCRETE STRUCTURES CLOSE TO COAST LINE ACCORDING TO VIETNAMESE AND INTERNATIONAL CODES

Abstract

Currently, coastal reinforced concrete buildings in Vietnam adhere to the standards TCVN 9346:2012, TCVN 12041:2017, and TCVN 12251:2020 to ensure protection against steel corrosion, while TCVN 5574:2018 is used for predicting crack width. However, some regulations in TCVN 9346:2012, TCVN 12041:2017, and TCVN 12251:2020 still have many shortcomings and are quite strict in relation to the specifications of international standards. Therefore, this paper summarizes and compares the specifications on protection against corrosion of steel reinforcement for coastal reinforced concrete structures according to Vietnamese, American, and European standards to clarify the similarities and differences between the standards. The paper also summarizes the methods of calculating and controlling crack width between related standards, from which calculation examples are performed to make comparative comments.

Keywords: reinforced concrete; reinforcement corrosion; cover; crack width; design code.

[https://doi.org/10.31814/stce.huce2025-19\(2V\)-02](https://doi.org/10.31814/stce.huce2025-19(2V)-02) © 2025 Trường Đại học Xây dựng Hà Nội (ĐHXDHN)

1. Mở đầu

Bê tông (BT) kết hợp với cốt thép tạo thành một kết cấu composite hiệu quả, với khả năng bảo vệ cốt thép nhờ tính kiềm cao (pH khoảng 12-13). Môi trường kiềm trong vữa xi măng tạo lớp màng bảo vệ trên bề mặt cốt thép, giúp chống ăn mòn. Sự ăn mòn bắt đầu khi nồng độ clorua vượt ngưỡng hoặc lớp BT bị cacbonat hóa, làm giảm tính kiềm và vô hiệu hóa lớp BT bảo vệ [1].

*Tác giả đại diện. Địa chỉ e-mail: nguyennnd@huce.edu.vn (Nguyễn, N. Đ.)

Ăn mòn cốt thép trong kết cấu bê tông cốt thép (BTCT) là nguyên nhân chính gây xuống cấp công trình trong môi trường xâm thực, làm giảm ứng xử chịu lực và giảm chất lượng cấu kiện [2, 3]. Vì vậy, khi xây dựng công trình mới, cần tuân thủ các biện pháp phòng ngừa ăn mòn cốt thép trong thiết kế và thi công để tránh các vấn đề bảo trì và sửa chữa tốn kém sau này, đôi khi không thể phục hồi khả năng chịu lực ban đầu.

Việt Nam có khí hậu nhiệt đới gió mùa, với bờ biển dài hơn 3260 km. Các thành phố lớn ven biển đã phát triển mạnh mẽ các công trình nhà cao tầng BTCT trong những năm gần đây. Tuy nhiên, do đặc điểm môi trường biển xâm thực mạnh với nhiệt độ cao, độ ẩm lớn, thời gian ẩm ướt kéo dài và gió biển mang theo hơi nước và ion clorua, các công trình này dễ bị ăn mòn cốt thép [4]. Khi thiết kế và thi công công trình nhà BTCT ven biển ở Việt Nam, các tiêu chuẩn như TCVN 9346:2012 [5], TCVN 12041:2017 [6], TCVN 12251:2020 [7] về bảo vệ chống ăn mòn cốt thép và TCVN 5574:2018 [8] về tính toán chiều rộng vết nứt (CRVN) được áp dụng. Tuy nhiên, việc áp dụng các tiêu chuẩn này gặp khó khăn do sự chồng chéo và không rõ ràng so với các tiêu chuẩn quốc tế, đặc biệt là các yêu cầu nghiêm ngặt về giới hạn CRVN, có thể làm tăng đáng kể lượng cốt thép cần sử dụng, như nghiên cứu của Nghị và Bá [9] và Tùng [10] đã chỉ ra. Hiện nay, thực hiện Quyết định số 198/QĐ-TTg ngày 09/02/2018 của Thủ tướng chính phủ về việc hoàn thiện hệ thống tiêu chuẩn, quy chuẩn kỹ thuật xây dựng, Bộ Xây dựng đã và đang tiến hành rà soát và thay thế, đồng thời đảm bảo sự cập nhật và hài hòa với các tiêu chuẩn tiên tiến, nhất là tiêu chuẩn châu Âu.

Bài báo này tổng hợp và so sánh một số các quy định cùng thông số kỹ thuật khác nhau liên quan đến công tác thiết kế và thi công BT nhằm giảm thiểu nguy cơ ăn mòn cốt thép, dựa trên các tiêu chuẩn hiện hành Việt Nam [5–8], Mỹ [11–20], và Châu Âu [21–25]. Mục tiêu là làm rõ những điểm tương đồng và một số khác biệt, từ đó đánh giá lại tiêu chuẩn hiện hành. Bài báo sẽ tập trung vào ba vấn đề chính được quy định trong các tiêu chuẩn bảo vệ chống ăn mòn cốt thép: (i) Xác định hàm lượng clorua tối đa cho phép trong BT; (ii) Xác định chiều dày và chất lượng lớp BT bảo vệ; và (iii) Xác định CRVN cho phép theo tiêu chuẩn thiết kế.

2. Hàm lượng clorua tối đa cho phép trong bê tông

Các tiêu chuẩn kỹ thuật Việt Nam và quốc tế quy định giới hạn clorua tối đa trong BTCT do tác động tiêu cực của nó đối với thép. Tuy nhiên, hàm lượng clorua trong vật liệu làm BT không phải lúc nào cũng được đo lường hoặc báo cáo. Các dự án thường chỉ quy định giới hạn clorua đối với phụ gia. Hàm lượng clorua trong BT cần được tính toán và so sánh với giới hạn cho phép theo tiêu chuẩn hiện hành. Hàm lượng clorua trong xi măng rất nhỏ và được kiểm soát trong sản xuất, nhưng không phải toàn bộ clorua trong BT góp phần gây ăn mòn. Một phần clorua liên kết hóa học trong sản phẩm thủy hóa, trong khi 50-75% tồn tại tự do trong dung dịch lỏng rỗng của BT và có thể gây ăn mòn cốt thép [11]. Hàm lượng clorua hòa tan trong nước thường nhỏ hơn (25-50%) so với hàm lượng hòa tan trong axit, và thường tương đương với clorua trong BT. Các tiêu chuẩn quốc tế sử dụng hai phương pháp thí nghiệm để xác định clorua: phương pháp hòa tan trong nước và phương pháp hòa tan trong axit [15, 22, 26]. Tiêu chuẩn ACI 222R-01 [11] còn đề xuất phương pháp Soxhlet (ACI 222.1-96 [27]). Các tiêu chuẩn quốc tế quy định giới hạn clorua theo các phương pháp khác nhau. EN 206 [22], ACI 318-19 [15], ACI 222R-01 [11] dựa vào phương pháp hòa tan trong nước, trong khi IS-456 [28] và NZS 3109-97 [29] dùng phương pháp hòa tan trong axit.

2.1. Tiêu chuẩn Mỹ

Tiêu chuẩn Mỹ không đưa ra giới hạn hàm lượng clorua đối với các thành phần được sử dụng trong BT, ngoại trừ nước. Hàm lượng clorua có trong xi măng rất thấp, chỉ khoảng 0,005% đến 0,01% [13]. Các tiêu chuẩn nước uống thường đặt ra giới hạn ion clorua tối đa khoảng 0,025%. Hàm lượng

clorua của các nguồn nước không uống được khác phải được kiểm tra. ASTM C1602-13 [16] đưa ra giới hạn tùy chọn đối với clorua trong nước trộn theo Bảng 1. Ở mức 1000 mg/L hàm lượng clorua từ nước trộn trong BT chiếm khoảng 0,05% theo khối lượng xi măng. Tổng hàm lượng clorua của cốt liệu thay đổi tùy theo nguồn, nhưng thường dưới 0,025% theo trọng lượng cốt liệu [13]. Phụ gia đông kết nhanh chứa canxi clorua là nguồn chính sinh ra clorua, mặc dù hiệu quả trong việc thúc đẩy đông kết, cần được hạn chế trong BTCT và bị cấm trong BT ứng suất trước theo ACI 318-19.

Bảng 1. Hàm lượng clorua tối đa trong nước theo ASTM C1602-13 [16]; EN 1008:2002 [25]; TCVN 9346:2012 và TCVN 12251:2020

Cấu kiện	Hàm lượng clorua, mg/L		
	ASTM C1602-13	EN 1008:2002	TCVN 9346:2012 TCVN 2251:2020
BTCT ứng lực trước hoặc vừa	500	500	3500 ^[a]
BTCT hoặc kim loại khác	1000	1000	500 ^[a]
BT không có cốt thép hoặc kim loại khác	Không đề cập quy định riêng	4500	Không đề cập quy định riêng

^[a]Với kết cấu vùng khí quyển. Nếu là kết cấu ở vùng nước thay đổi và ngập nước thì lượng muối hoà tan không vượt quá 2000 mg/L.

Tiêu chuẩn xây dựng của Mỹ quy định giới hạn clorua trong BT tùy thuộc vào mức độ tiếp xúc với môi trường. ACI 318-19 xác định các cấp độ phơi lộ mà kỹ sư thiết kế phải chỉ định cho các bộ phận kết cấu BTCT, từ đó xác định các yêu cầu cụ thể đối với BT, những yêu cầu này cũng được trình bày trong ACI 301-10 [14]. ACI 318-19 đưa ra giới hạn clorua dựa trên phương pháp thử nghiệm hòa tan trong nước theo ASTM C1218 [16] ở độ tuổi từ 28 đến 42 ngày. Khoảng thời gian này cho phép quá trình thủy hóa của xi măng diễn ra hoàn chỉnh. Một phần clorua trong dung dịch sẽ bị liên kết hóa học trong quá trình thủy hóa, không hòa tan trong nước và không ảnh hưởng đến tốc độ ăn mòn của cốt thép. Giới hạn clorua trong ACI 318-19 được cung cấp trong Bảng 2. Lưu ý rằng ACI 318-19 quy định hàm lượng cho phép của clorua dựa trên khối lượng toàn bộ vật liệu kết dính (bao gồm việc có thể trộn thêm các phụ gia khoáng như tro bay/xi lò cao/muội silic hoặc kết hợp các thành phần trên cùng với xi măng) thay vì chỉ dựa trên khối lượng xi măng portland như các tài liệu ACI 222R-01 [11], ACI 201R-08 [12], ACI 301-10 [13], và các phiên bản trước đây của ACI 318.

Bảng 2. Hàm lượng clorua tối đa trong BT theo ACI 318-19

Cấp phơi lộ	Tỉ lệ N/X tối đa ^[d]	Cường độ chịu nén ^[f] nhỏ nhất f'_c , MPa	Hàm lượng clorua tối đa hòa tan trong nước, % theo khối lượng vật liệu kết dính ^[e]	
			BTCT thường	BTCT ứng lực trước
C0 ^[a]	N/A ^[g]	17	1,00	0,06
C1 ^[b]	N/A ^[g]	17	0,30	0,06
C2 ^[c]	0,40	35	0,15	0,06

^[a]BT khô hoặc được bảo vệ khỏi độ ẩm; ^[b]BT tiếp xúc với độ ẩm nhưng không tiếp xúc với nguồn clorua bên ngoài; ^[c]BT tiếp xúc với độ ẩm và nguồn clorua bên ngoài từ hóa chất phá băng, muối, nước lợ, nước biển hoặc hơi nước từ các nguồn này; ^[d]Tỉ lệ N/X dựa trên toàn bộ xi măng portland và vật liệu kết dính bổ sung trong hỗn hợp BT; ^[e]Khối lượng vật liệu kết dính bổ sung dùng để xác định hàm lượng clorua không được vượt quá khối lượng xi măng portland; ^[f]Cường độ chịu nén của BT được xác định từ mẫu trụ kích thước 150×300 mm; ^[g]N/A (Not Applicable) có nghĩa là không áp dụng.

Hướng dẫn của ACI cho BT bền lâu (ACI 201R-08), tài liệu về ăn mòn (ACI 222R-01), và ACI 301-10 cung cấp hướng dẫn (không phải yêu cầu) về giới hạn clorua trong BT. ACI 201R-08 tham chiếu đến hướng dẫn của ACI 222R-01. Giới hạn clorua trong ACI 222R-01 được đề xuất dựa trên nghiên cứu về nồng độ clorua ngưỡng gây ăn mòn, cao hơn so với giới hạn trong ACI 318-19 và ACI 301-10. Các giá trị giới hạn cao hơn này được giải thích chi tiết trong ACI 222R-01. Khuyến nghị về giới hạn clorua của ACI 222R-01 được trình bày trong Bảng 3, và nếu áp dụng trong thiết kế dự án, các chất phụ gia có chứa clorua đáng kể sẽ bị cấm.

Ủy ban ACI 357 [17] khuyến nghị rằng với công trình ngoài khơi, không được cố ý thêm clorua vào trong hỗn hợp BT. Tổng hàm lượng clorua hòa tan trong nước của BT trước khi đổ không được vượt quá 0,10% theo khối lượng xi măng đối với BTCT thông thường và 0,06% theo khối lượng xi măng đối với BT ứng lực trước. Hàm lượng clorua lên đến 0,15% có thể được chấp nhận trong kết cấu BTCT, nhưng chỉ nên sử dụng sau khi thực hiện đánh giá khả năng ăn mòn của kết cấu cụ thể trong các điều kiện môi trường cụ thể.

Bảng 3. Hàm lượng clorua tối đa trong BT theo ACI 222R-01 và ACI 201R-08

Phân loại	Hàm lượng clorua tối đa (% theo khối lượng xi măng)		
	Hoà tan trong axit	Hoà tan trong nước	
	ASTM C1152	ASTM C 1218	Soxhlet*
BTCT ứng lực trước	0,08	0,06	0,06
BTCT với điều kiện ẩm ướt	0,10	0,08	0,08
BTCT với điều kiện khô ráo	0,20	0,15	0,15

*Phương pháp Soxhlet được mô tả trong tiêu chuẩn ACI 222.1-96 [27].

2.2. Tiêu chuẩn Châu Âu

Theo EN 206 [22], hàm lượng clorua tối đa trong BT được quy định trong Bảng 4, và việc sử dụng bất kỳ phụ gia nào chứa clorua hoặc sử dụng canxi clorua trong BTCT hoặc BT ứng lực trước đều không được phép. Tương tự như ACI 318-19, EN 206 cho phép xác định hàm lượng clorua theo phương pháp hoà tan trong axit và giới hạn hàm lượng clorua theo phần trăm khối lượng xi măng và các vật liệu kết dính bổ sung. EN 206 [22] cũng quy định về tỉ lệ N/X tối đa, lớp cường độ tối thiểu của BT, và lượng xi măng tối thiểu, dựa theo tính chất của lớp BT phơi lộ tiếp xúc với môi trường.

Bảng 4. Hàm lượng clorua tối đa trong BT theo EN 206 và TCVN 12041:2017

BT sử dụng	Cấp hàm lượng ion clo	Hàm lượng ion clorua cho phép (% khối lượng xi măng*)
Không có cốt thép	Cl 1,0	1,0
BTCT thường	Cl 0,20	0,20
	Cl 0,40	0,40
BTCT ứng lực trước	Cl 0,10	0,10
	Cl 0,20	0,20

*Khi sử dụng vật liệu kết dính bổ sung để thay thế một phần xi măng, hàm lượng ion clo được tính theo tổng khối lượng xi măng và vật liệu kết dính bổ sung.

EN 1008:2002 [25] quy định hàm lượng clorua trong nước sử dụng trong BT, được thử nghiệm theo EN 196-21:1992 [24] và được biểu thị dưới dạng Cl^- , không được vượt quá mức cho trong

Bảng 1, trừ khi có thể chứng minh rằng hàm lượng clorua trong BT sẽ không vượt quá giá trị tối đa cho loại BT được chỉ định theo EN 206.

EN 197 [23] chỉ định giới hạn hàm lượng clorua trong xi măng là 0,1%. Tuy nhiên, đối với xi măng loại CEM III, nó có thể chứa nhiều hơn 0,1%, nhưng giá trị phải được công bố. Đối với BT ứng suất trước, xi măng có thể được sản xuất với hàm lượng clorua thấp hơn, và giá trị này phải được báo cáo bởi nhà sản xuất.

2.3. Tiêu chuẩn Việt Nam

TCVN 9346:2012 và TCVN 12251:2020 quy định hàm lượng clorua trong các vật liệu hỗn hợp BT, bao gồm cát, cốt liệu lớn (đá hoặc sỏi), phụ gia, và nước (với nước sử dụng có thể xem Bảng 1). Quy định về hàm lượng clorua trong nước của TCVN 9346:2012 và TCVN 12251:2020 có phần nghiêm ngặt hơn so với các tiêu chuẩn quốc tế như ASTM C1602-13 [16] và EN 1008:2002 [25]. Nếu không thể kiểm soát hàm lượng clorua của từng vật liệu, có thể kiểm soát tổng hàm lượng clorua trong tất cả vật liệu, biểu thị dưới dạng kg/m^3 hoặc phần trăm theo khối lượng xi măng hoặc vật liệu kết dính [6-8]. TCVN 12041:2017 quy định hàm lượng clorua tối đa theo phần trăm khối lượng xi măng, như được chỉ rõ trong Bảng 4, tương tự với quy định của EN 206 [22]. Đồng thời, TCVN 12251:2020 quy định hàm lượng clorua theo phương pháp hòa tan trong nước, với giá trị phần trăm tương đồng với tiêu chuẩn ACI 318-19. Tuy nhiên, cần lưu ý rằng, ACI 318-19 đã quy định hàm lượng cho phép của clorua dựa trên khối lượng toàn bộ vật liệu kết dính bao gồm cả xi măng và phụ gia khoáng bổ sung, thay vì chỉ dựa trên khối lượng xi măng.

Cả ba tiêu chuẩn TCVN 9346:2012, TCVN 12041:2017, và TCVN 12251:2020 đều quy định hàm lượng clorua hòa tan không vượt quá $0,6 \text{ kg/m}^3$ đối với BT cốt thép thông thường và $0,3 \text{ kg/m}^3$ đối với BT cốt thép ứng lực trước. Quy định này chặt chẽ hơn so với các tiêu chuẩn IS-456 [28] và NZS 3109-97 [29]. Đối với BT không cốt thép, TCVN 9346:2012 không giới hạn hàm lượng clorua trừ khi cần hạn chế loang lổ trên bề mặt, trong khi TCVN 12041:2017 và TCVN 12251:2020 quy định hàm lượng clorua tối đa là 1% khối lượng xi măng.

TCVN 7572-15:2006 [26] đề cập hai phương pháp xác định hàm lượng clorua, đó là phương pháp hoà tan trong nước và bằng phương pháp hoà tan trong axit. Như đã nêu, hàm lượng clorua xác định bằng phương pháp hoà tan trong axit thường cho kết quả cao hơn so với phương pháp hoà tan trong nước. Ngoại trừ TCVN 12251:2020, quy định lượng clorua hoà tan trong nước, TCVN 9346:2012 và TCVN 12041:2017 chưa quy định rõ phạm vi sử dụng các phương pháp thí nghiệm cụ thể cũng như khoảng thời gian thí nghiệm mẫu, điều này khác với các yêu cầu chi tiết đã được nêu trong tiêu chuẩn ACI 318-19.

3. Chiều dày tối thiểu lớp bê tông bảo vệ

Lớp BT bảo vệ đóng vai trò ngăn chặn sự xâm nhập của ion clorua và bảo vệ cốt thép khỏi ăn mòn. Nhiều tiêu chuẩn quy định chiều dày tối thiểu của lớp này tùy thuộc vào các yếu tố như đặc điểm kết cấu, phương pháp thi công, chất lượng BT và điều kiện thời tiết. Trong quá trình kiểm soát chất lượng BT, mục tiêu là tạo ra lớp BT không nứt, có cường độ cao, đảm bảo mật độ thể tích lớn, khả năng chống thấm tốt và tỷ lệ N/X thấp. Những yếu tố này giúp ngăn nước xâm nhập, giảm thiểu ảnh hưởng của nước đối với cốt thép và ngăn ngừa sự ăn mòn. Vì vậy, độ dày lớp BT bảo vệ có thể thay đổi tùy vào chất lượng BT. Ví dụ, với BT chất lượng cao, lớp BT bảo vệ có thể mỏng hơn nhưng vẫn đảm bảo khả năng bảo vệ hiệu quả.

3.1. Tiêu chuẩn Mỹ

Tiêu chuẩn của ACI Mỹ quy định độ dày tối thiểu của lớp BT bảo vệ đối với BTCT thường đổ tại công trường được thể hiện trong Bảng 5. Để sản xuất BT chất lượng cao khi tiếp xúc với nước có độ

mặn cao, chẳng hạn như nước biển, tiêu chuẩn Mỹ quy định tỷ lệ N/X tối đa là 0,4. Đối với các công trình tiếp xúc với nước biển, chiều dày tối thiểu của lớp BT bảo vệ là 50 mm. Đối với BT cốt thép đúc sẵn, các tiêu chuẩn Mỹ cho phép tính toán chiều dày lớp BT bảo vệ thấp hơn so với các giá trị trong Bảng 5, nhờ vào việc kiểm soát chất lượng BT và thi công tốt hơn so với BT đổ tại công trường. Đối với BT ứng lực trước, quy định về chiều dày lớp BT bảo vệ có thể tham khảo từ ACI 318-19 và ACI 301-10.

Bảng 5. Chiều dày lớp BT bảo vệ nhỏ nhất với cấu kiện BTCT thường đổ tại chỗ theo ACI 318-19 và ACI 301-10

	Chiều dày, mm
i) BT nằm dưới đất vĩnh viễn	75
ii) BT tiếp xúc với đất hoặc phơi lộ với thời tiết	
Cốt thép d19 tới d57	50
Cốt thép d16 và nhỏ hơn; dây thép MW200 hoặc MD200 và nhỏ hơn Trong đó: MW và MD sử dụng để chỉ loại dây thép trong lưới thép hàn. MW là dây thép trơn; MD là dây thép có gờ. Số hiệu 200 thể hiện đường kính danh định của dây thép là 200 mm ²	40
iii) BT không tiếp xúc với đất hoặc không phơi lộ với thời tiết	
Sàn, vách lõi, dầm phụ	
Cốt thép d43 tới d57	40
Cốt thép d36 và nhỏ hơn	20
Dầm, cột	
Thép dọc, thép đai	40

Chiều dày lớp BT bảo vệ tối thiểu $c_{min,dur}$ theo yêu cầu của EC2 [21], cùng với các điều kiện môi trường và phân loại cấu kiện áp dụng cho từng loại, được tóm tắt trong Bảng 6. Phân loại cấu kiện tiêu chuẩn là lớp S4 (tuổi thọ thiết kế là 50 năm). Tuy nhiên, phân loại này có thể được điều chỉnh tùy theo các yếu tố như tuổi thọ thiết kế tăng lên, sử dụng BT có cường độ cao hơn so với những loại được ghi chú trong Bảng 6, các thành phần dạng tấm, và có sự kiểm soát đặc biệt trong quá trình sản xuất BT. Khi tuổi thọ thiết kế được tăng lên 100 năm, cấp kết cấu sẽ được nâng lên hai cấp cao hơn, trong khi các yếu tố còn lại có thể làm giảm cấp kết cấu xuống một cấp thấp hơn. Chiều dày lớp BT bảo vệ tối thiểu c_{min} được xác định bởi:

$$c_{min} = \max \{ c_{min,b}, c_{min,dur} + \Delta c_{dur,\gamma} - \Delta c_{dur,st} - \Delta c_{dur,add}; 10 \text{ mm} \} \quad (1)$$

trong đó $c_{min,b}$ là chiều dày lớp BT bảo vệ nhỏ nhất để đảm bảo lực dính, $\Delta c_{dur,\gamma}$ là yếu tố an toàn bổ sung (kiến nghị bằng 0), $\Delta c_{dur,st}$ là mức giảm chiều dày do sử dụng thép không gỉ (khuyến nghị bằng 0), $\Delta c_{dur,add}$ là mức giảm chiều dày khi sử dụng biện pháp bảo vệ cốt thép bổ sung (khuyến nghị bằng 0).

Chiều dày lớp BT bảo vệ nhỏ nhất để đảm bảo lực dính $c_{min,b}$ đối với BTCT thường là đường kính thanh đối với các thanh riêng lẻ và đường kính tương đương. Đối với BTCT ứng lực trước căng sau thì $c_{min,b}$ lấy là đường kính của ống tròn chứa cáp. Đối với BTCT ứng lực trước căng trước thì $c_{min,b}$ lấy

Bảng 6. Chiều dày nhỏ nhất lớp BT bảo vệ với cấu kiện BTCT thường gặp với môi trường gần biển theo EC2, EN 206, và TCVN 12041:2017

Cấp phoi lộ	Môi trường	Phân cấp cấu kiện						Cấp BT tối thiểu	
		S1	S2	S3	S4	S5	S6	EC2, EN206	TCVN 12041:2017
XC0	Không có nguy cơ ăn mòn	10	10	10	10	15	20	C12/15	B15
XC1	Khô hoặc ướt thường xuyên	10	10	10	15	20	25	C20/25	B25
XC2	Ướt, hiếm khi khô; nền móng;	10	15	20	25	30	35	C25/30	B30
XC3	Độ ẩm trung bình. BT được che chắn bên ngoài	10	15	20	25	30	35	C30/37	B35
XC4	Ướt và khô tuần hoàn	15	20	25	30	35	40	C30/37	B35
XS1	Vùng khí quyển trên mặt nước biển	20	25	30	35	40	45	C30/37	B35
XS2	Vùng ngập trong nước biển	25	30	35	40	45	50	C35/45	B45
XS3	Vùng thủy triều lên xuống và sóng táp	30	35	40	45	50	55	C35/45	B45

bằng 1,5 lần đường kính cáp hoặc sợi thép trơn hoặc gấp 2,5 lần đường kính sợi thép có khía. Chiều dày lớp BT bảo vệ danh nghĩa c_{nom} được sử dụng trong thiết kế:

$$c_{nom} = c_{min} + \Delta c_{dev} \quad (2)$$

Giá trị khuyến nghị cho Δc_{dev} là 10 mm, mặc dù quy định cho phép giảm khi có hệ thống kiểm soát chất lượng (có thể đảm bảo tốt hơn trong BT đúc sẵn) hoặc khi sử dụng thiết bị rất chính xác để giám sát và khi có sai sót cần phải thực hiện chỉnh sửa để đảm bảo chất lượng thi công đúng theo thiết kế.

Ngoài ra, EN 206 [22] còn đưa ra các khuyến nghị về tỉ lệ N/X, hàm lượng xi măng tối thiểu, và một số yêu cầu khác về thành phần và tính chất của BT.

3.2. Tiêu chuẩn Việt Nam

Đối với công trình BTCT ven biển, ngoài việc thiết kế kết cấu theo các tiêu chuẩn hiện hành như TCVN 5574:2018, cần bổ sung yêu cầu chống ăn mòn cốt thép từ các tiêu chuẩn TCVN 9346:2012, TCVN 12041:2017, và TCVN 12251:2020.

So với TCVN 5574:2018, các tiêu chuẩn TCVN 9346:2012 và TCVN 12041:2017 đưa ra yêu cầu cao hơn và chi tiết hơn, phụ thuộc vào môi trường xâm thực và cường độ BT. Cụ thể, TCVN 9346:2012 quy định các điều kiện tối thiểu về cấp độ bền BT, khả năng chống thấm, chiều dày lớp BT bảo vệ và giới hạn CRVN để đảm bảo niên hạn 50 năm. TCVN 12041:2017 đã phân loại môi trường xâm thực, giới hạn hàm lượng clorua, yêu cầu chiều dày lớp BT bảo vệ và các tiêu chuẩn tương tự EC2, EN 206, như thể hiện ở Bảng 6, nhưng khắt khe hơn về tỉ lệ N/X và khối lượng BT tối thiểu.

Đối với công trình yêu cầu thời gian sử dụng trên 50 năm (đến 100 năm), cần áp dụng thêm một số biện pháp chống ăn mòn như tăng cường độ chịu nén của BT, tăng chiều dày lớp BT bảo vệ, sơn bảo vệ cốt thép hoặc dùng phương pháp catot [6–8]. Các yêu cầu này tương đồng với chỉ dẫn trong EC2 và được nêu trong TCVN 9346:2012, TCVN 12041:2017, và TCVN 12251:2020.

4. Chiều rộng vết nứt theo các tiêu chuẩn

Các vết nứt xuất hiện ở vùng kéo của các cấu kiện chịu uốn, như dầm, khi ứng suất cốt thép đạt khoảng 20 MPa [19]. Việc kiểm soát vết nứt là quan trọng để đảm bảo tính thẩm mỹ cho bề mặt cấu kiện. Tuy nhiên, mối quan hệ giữa vết nứt và sự ăn mòn cốt thép vẫn còn tranh cãi [19]. Một quan

điều cho rằng vết nứt giảm tuổi thọ công trình, tạo điều kiện cho các tác nhân gây ăn mòn như ion clorua, hơi nước và oxy thâm nhập vào cốt thép, thúc đẩy ăn mòn. Mặt khác, một số ý kiến cho rằng vết nứt chỉ làm tăng tốc độ ăn mòn cục bộ tại các vị trí nứt, trong khi sự ăn mòn chủ yếu diễn ra ở vùng BT chưa nứt. Sau thời gian dài, sự khác biệt giữa mức độ ăn mòn ở BT có vết nứt và không nứt là không đáng kể. Các yếu tố quan trọng nhất trong việc bảo vệ cốt thép khỏi ăn mòn là lớp BT bảo vệ và chất lượng của BT.

Nứt trong kết cấu được kiểm soát khi CRVN tính toán nhỏ hơn giá trị giới hạn cho phép. Hầu hết các công thức hiện nay dự đoán CRVN lớn nhất, nghĩa là phần lớn các vết nứt trong cấu kiện sẽ nhỏ hơn giá trị tính toán. Tuy nhiên, nghiên cứu cho thấy một số vết nứt trên dầm BTCT có thể lớn hơn gấp đôi giá trị tính toán, mặc dù hệ số biến động CRVN thường vào khoảng 40% [19]. Việc tính toán CRVN giới hạn được thực hiện theo các tiêu chuẩn như sau:

4.1. Tiêu chuẩn Mỹ

Trong hệ thống tiêu chuẩn ACI của Mỹ, phương pháp kiểm soát vết nứt trong thiết kế kết cấu BTCT chủ yếu xuất phát từ các tiêu chuẩn ACI 318-19 [15], ACI 224R-01 [19]; và ACI 224.1R-07 [20].

Hệ thống tiêu chuẩn ACI 318 của Mỹ kiểm soát CRVN kết cấu BTCT trải qua hai giai đoạn. Phương pháp hệ số z được sử dụng trong các phiên bản ACI từ những năm 1971 tới 1995, trong khi các phiên bản ACI sau năm 1995, đặc biệt là ACI 318-19, sử dụng khoảng cách cốt thép để kiểm soát chiều rộng vết nứt.

Phương pháp hệ số z được đề xuất bởi Gergely và Lutz [30], dựa trên phương pháp thống kê toán học, sử dụng dữ liệu thí nghiệm thu được từ một số nghiên cứu trước đó. Phương trình đề xuất này được áp dụng cho các phiên bản ACI 318-95 và trước đó, như sau:

$$w_{\max} = 0,011\beta f_s \sqrt[3]{d_c A} \times 10^{-3} \quad (3)$$

trong đó $w_{\max}$ là CRVN lớn nhất, mm; $\beta = (h - x)/(d - x)$ là hệ số khoảng cách giữa trục trung hoà và thớ chịu kéo xa nhất và khoảng cách giữa trục trung hoà và trọng tâm cốt thép chịu kéo, $\beta = 1, 2$ có thể chấp nhận được đối với dầm để so sánh CRVN xuất hiện khi chịu uốn và kéo dọc trục; d_c là chiều dày lớp bảo vệ được tính từ thớ chịu kéo xa nhất tới trọng tâm cốt thép chịu kéo gần nhất, mm; A là diện tích vùng kéo hữu hiệu của BT bao quanh cốt thép chịu kéo uốn và có cùng trọng tâm với cốt thép đó chia cho số thanh hoặc sợi, khi cốt thép chịu uốn bao gồm các kích thước thanh hoặc sợi khác nhau thì số thanh hoặc sợi sẽ được tính là tổng diện tích của thanh hoặc sợi lớn nhất được sử dụng, mm²; f_s là ứng suất tính được của cốt thép với tải trọng sử dụng (gồm tải trọng thường xuyên và tạm thời không nhân hệ số vượt tải), MPa.

CRVN chịu uốn như thể hiện ở trên với $(h - x)/(d - x) = 1,2$ được sử dụng trong tiêu chuẩn ACI 318-95 thể hiện dưới dạng hệ số z như sau:

$$z = f_s \sqrt[3]{d_c A} = \frac{w_{\max}}{1,1\beta} \times 10^5 \quad (4)$$

Giá trị lớn nhất của $z = 31060$ N/mm được cho phép đối với kết cấu trong nhà, tương ứng với việc giới hạn CRVN là 0,41 mm. ACI 318-95 cũng giới hạn giá trị $z = 25000$ N/mm cho kết cấu phơi lộ với môi trường bên ngoài, tương ứng với CRVN 0,33 mm.

CRVN trong các kết cấu BTCT có đặc tính là biến thiên rất lớn và khó có thể tính toán chính xác. Vì vậy, từ phiên bản năm 1999 thì ACI 318 đã quyết định đơn giản hoá yêu cầu về kiểm soát CRVN, dựa trên những bằng chứng nghiên cứu cho thấy mối liên hệ giữa ăn mòn và CRVN bề mặt không

rõ ràng trong phạm vi thường gặp khi ứng suất cốt thép ở mức tải trọng sử dụng. Vai trò của các vết nứt đối với quá trình ăn mòn cốt thép vẫn còn là chủ đề gây tranh cãi, như đã được chỉ ra trong các nghiên cứu. Do đó, kể từ phiên bản năm 1999, ACI 318 không còn phân biệt giữa các bề mặt phơi lộ bên trong và bên ngoài. Các quy định trong ACI 318-19 nhằm mục đích giới hạn CRVN bề mặt ở mức độ chấp nhận được trong thực tế, mặc dù có thể biến động lớn trong từng kết cấu cụ thể.

ACI 318-19 đề xuất phương trình sau đây về khoảng cách tối đa của cốt thép trong bản sàn một phương và dầm không ứng suất trước và ứng suất trước Class C để kiểm soát vết nứt trong phạm vi 0,40 mm:

$$s_{\max} = 380 \left(\frac{280}{f_s} \right) - 2,5c_c \leq 300 \left(\frac{280}{f_s} \right) \quad (5)$$

trong đó $s_{\max}$ là khoảng cách lớn nhất của cốt thép gần nhất với bề mặt chịu kéo, mm; c_c là lớp BT bảo vệ cốt thép (từ mép BT chịu kéo đến mép cốt thép).

So sánh khoảng cách giữa các thanh thép s với $s_{\max}$ đã tính toán, nếu $s \leq s_{\max}$, điều này cho thấy CRVN thực tế đã được giới hạn trong phạm vi cho phép. Ngược lại, nếu $s > s_{\max}$, điều này có nghĩa là CRVN không đáp ứng yêu cầu của quy định. Trong trường hợp này, có thể điều chỉnh bằng cách giảm đường kính của các thanh thép và/hoặc tăng số lượng thanh thép, sao cho khoảng cách giữa các thanh thép (s) giảm xuống và thỏa mãn điều kiện $s \leq s_{\max}$. Cách này sẽ giúp đảm bảo CRVN thực tế của các cấu kiện chịu uốn được kiểm soát trong giới hạn cho phép.

Ủy ban ACI 224.1R-07 đánh giá lại dữ liệu đã đề xuất một phương trình CRVN mới và được tính như sau:

$$w_{\max} = 2 \frac{f_s}{E_s} \beta \sqrt{d_c^2 + \left(\frac{s}{2} \right)^2} \quad (6)$$

Trên thực tế, kiểm soát vết nứt đạt được trong ACI 318-19 thông qua việc sử dụng khoảng cách lớn nhất cho cốt thép dựa trên ứng suất cốt thép ở mức tải trọng sử dụng và chiều dày lớp bảo vệ từ thớ kéo xa nhất tới trọng tâm cốt thép chịu kéo gần nhất (d_c). Phương trình thiết kế (5) dựa trên phương trình (6) cho một số giả định và đơn giản hóa, với CRVN kiểm soát là 0,40 mm.

4.2. Tiêu chuẩn Châu Âu

Tiêu chuẩn EC2 [21] đề xuất công thức sau để tính toán CRVN của cấu kiện BTCT chịu uốn:

$$w_k = S_{r,\max} (\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm}) \quad (7)$$

trong đó w_k là CRVN thiết kế, mm; $S_{r,\max}$ là khoảng cách vết nứt lớn nhất, mm; ε_{sm} là biến dạng trung bình trong cốt thép do tổ hợp tải trọng có liên quan, bao gồm tác động của các biến dạng cưỡng bức và tính đến biến cứng của cốt thép. Chỉ có biến dạng kéo gia tăng vượt quá biến dạng bằng không của BT được xem xét; ε_{cm} là biến dạng trung bình của BT giữa các vết nứt, mm.

Biến dạng kéo trung bình ($\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm}$) được xác định bởi phương trình sau:

$$(\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm}) = \frac{\sigma_s - k_t \frac{f_{ct,eff}}{\rho_{p,eff}} \left(1 + \alpha_e \rho_{p,eff} \right)}{E_s} \geq 0,6 \frac{\sigma_s}{E_s} \quad (8)$$

trong đó σ_s là ứng suất trong cốt thép chịu kéo với giả định tiết diện bị nứt, MPa. Đối với các cấu kiện ứng suất trước, σ_s được thay bằng $\Delta\sigma_p$ là ứng suất thay đổi trong các bó cáp căng trước từ trạng thái không biến dạng của bê tông ở cùng một cao độ; α_e là tỷ số E_s/E_{cm} ; k_t là hệ số phụ thuộc vào thời gian tác dụng của tải trọng ($k_t = 0,6$ đối với tải trọng ngắn hạn và $k_t = 0,4$ đối với tải trọng dài hạn); $f_{ct,eff}$ là giá trị trung bình của cường độ chịu kéo của BT có hiệu lực tại thời điểm vết nứt có thể xảy ra lần đầu tiên, $f_{ct,eff} = f_{ctm}$ hoặc $f_{ct,eff} = f_{ctm}(t)$ nếu vết nứt có thể xảy ra trước 28 ngày tuổi.

Bảng 7. Giá trị khuyến nghị CRVN cho phép theo EC2

Cấp phối lộ	BTCT thường và BTCT ứng lực trước không bám dính	BTCT ứng lực trước bám dính
	Tổ hợp tải trọng tựa - thường xuyên (Comb _{DH}) ¹	Tổ hợp tải trọng thường gặp ² (Comb _{TG}) ²
XO, XC1	0,4	0,2
XC2, XC3, XC4		0,2
XD1, XD2, XS1, XS2, XS3	0,3	Không có ứng suất kéo

$${}^1\text{Comb}_{\text{DH}} = \sum_{j \geq 1} G_{k,j} + P + \sum_{i \geq 1} \psi_{2,i} Q_{k,i}; \quad {}^2\text{Comb}_{\text{TG}} = \sum_{j \geq 1} G_{k,j} + \psi_{1,1} Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \psi_{2,i} Q_{k,i}$$

trong đó: $G_{k,j}$ là giá trị đặc trưng của tác động thường xuyên j ; P là giá trị đại diện thích hợp của tác động ứng lực trước; $Q_{k,i}$ là giá trị đặc trưng của tác động thay đổi i ; $\psi_{2,i}$ là hệ số của giá trị tựa - thường xuyên của tác động thay đổi i ; $\psi_{1,1}$ là hệ số của giá trị thường gặp của tác động thay đổi thứ nhất.

$$\rho_{p,eff} = \frac{A_s + \xi_1^2 A'_p}{A_{c,eff}} \quad (9)$$

trong đó $A_{c,eff}$ là diện tích hiệu dụng của BT chịu kéo xung quanh cốt thép, mm²; A'_p là diện tích của các bó thép căng trước hoặc căng sau trong vùng $A_{c,eff}$, mm²; ξ_1 là hệ số điều chỉnh lực dính có kể đến các đường kính khác nhau của thép ứng suất trước và cốt thép thường.

$$S_{r,max} = 3,4c + 0,425k_1k_2\phi/\rho_{p,eff} \quad (10)$$

trong đó c là chiều dày lớp BT bảo vệ của cốt thép dọc, mm; k_1 là hệ số tính đến lực dính của cốt thép ($k_1 = 0,8$ đối với thanh có lực dính lớn (thép có gờ) và $k_1 = 1,6$ đối với thanh có bề mặt gần như phẳng (thép tròn trơn)); k_2 là hệ số tính đến sự phân bố biến dạng ($k_2 = 0,5$ đối với uốn và $k_2 = 1,0$ đối với kéo thuần túy); ϕ là đường kính thanh, mm.

CRVN giới hạn được tính toán, w_{max} , có tính đến công năng và đặc trưng kiểu cấu và chi phí hạn chế vết nứt được khuyến nghị cho các cấp phối lộ có liên quan được đưa ra trong Bảng 7.

4.3. Tiêu chuẩn Việt Nam

Theo TCVN 5574-2018, CRVN thẳng góc a_{crc} được tính toán dự báo như sau:

$$a_{crc} = \varphi_1 \varphi_2 \varphi_3 \psi_s \frac{\sigma_s}{E_s} L_s \quad (11)$$

$$\psi_s = 1 - 0,8 \frac{\sigma_{s,crc}}{\sigma_s} \quad (12)$$

$$\max(10d_s; 100 \text{ mm}) \leq L_s = 0,5 \frac{A_{bt}}{A_s} d_s \leq \min(40d_s; 400 \text{ mm}) \quad (13)$$

trong đó φ_1 là hệ số lấy bằng 1,0 với tác dụng ngắn hạn của tải trọng, lấy bằng 1,4 khi có tác dụng dài hạn của tải trọng; φ_2 là hệ số bằng 0,5 với thép có gờ và cáp, lấy bằng 0,8 với thép tròn trơn; φ_3 là hệ số lấy bằng 1,0 với cấu kiện chịu uốn và nén lệch tâm, lấy bằng 1,2 với cấu kiện chịu kéo; ψ_s là hệ số kể đến sự phân bố không đều biến dạng tương đối của cốt thép chịu kéo giữa các vết nứt; σ_s ứng suất trong cốt thép dọc chịu kéo tại tiết diện thẳng góc có vết nứt do ngoại lực tương ứng, MPa; $\sigma_{s,crc}$ là ứng suất trong cốt thép dọc chịu kéo trong tiết diện có vết nứt ngay sau khi hình thành các vết nứt

thẳng góc; L_s là khoảng cách cơ sở giữa các vết nứt thẳng góc kề nhau; d_s là đường kính danh nghĩa của cốt thép; A_{bt} là diện tích tiết diện BT chịu kéo được xác định theo chiều cao vùng kéo của BT dựa trên nguyên tắc tính toán mô men hình thành khe nứt; A_s là diện tích tiết diện cốt thép chịu kéo.

Với công trình BTCT ven biển thì ngoài áp dụng quy định về CRVN giới hạn của TCVN 5574:2018 thì cần phải áp dụng thêm quy định của tiêu chuẩn TCVN 9346:2012, TCVN 12041:2017, và TCVN 12251:2020. Bảng 8 thể hiện yêu cầu về CRVN cho phép theo TCVN 12041:2017.

Trong phân cấp môi trường XO và XC1, các tiêu chuẩn TCVN 5574:2018, TCVN 12041:2017, ACI 318 [15, 18], và EC2 đưa ra quy định về CRVN cho phép khá tương đồng. Tuy nhiên, đối với các cấu kiện trong nhà (như dầm, sàn ở các tầng trung gian), thường được phân loại vào cấp XC1 theo TCVN 12041:2017 và EC2, yêu cầu về CRVN sẽ là 0,4 mm theo EC2 và 0,3 mm theo TCVN 5574:2018 khi xét đến tác dụng dài hạn của tải trọng. Trong khi đó, TCVN 9346:2012 vẫn yêu cầu CRVN không vượt quá 0,15 mm đối với các cấu kiện trong nhà này. Sự khác biệt và mâu thuẫn giữa TCVN 12041:2017 và TCVN 9346:2012 cần được xem xét và điều chỉnh để đạt được sự thống nhất trong việc áp dụng.

TCVN 12041:2017 quy định giới hạn CRVN cho phép rất nghiêm ngặt, không vượt quá 0,1 mm đối với các phân cấp môi trường XC2, XC3, XC4, XD1, XD2, XD3, XS1, XS2, XS3. Trong khi đó, các tiêu chuẩn TCVN 5574:2018, ACI 318 [15, 18], và EC2 cho phép giá trị CRVN cao hơn nhiều. Sự khác biệt này được Nghị và Bá [9] chỉ ra, với sự chênh lệch giữa các tiêu chuẩn Việt Nam và các tiêu chuẩn quốc tế của Singapore, Pháp và Anh. Cần lưu ý rằng, TCVN 12041:2017 cũng như TCVN 9346:2012 quy định tổ hợp nội lực dùng để xác định CRVN là toàn bộ tải trọng sử dụng, bao gồm cả ngắn hạn và dài hạn. Đối với kết cấu BTCT ứng suất trước không cho phép xuất hiện vết nứt.

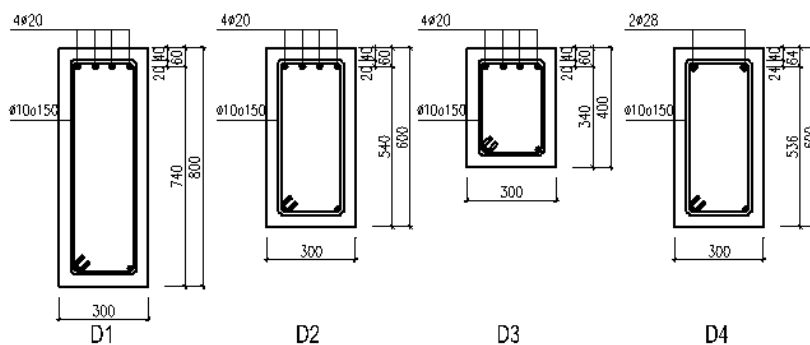
Bảng 8. Yêu cầu về CRVN cho phép theo TCVN 12041:2017

Loại môi trường và mức độ xâm thực	Kết cấu BTCT thường	Kết cấu BTCT ứng lực trước
	Tác dụng của toàn bộ tải trọng kể cả dài hạn và ngắn hạn	
XO, XC1	Áp dụng theo TCVN 5574:2018	
XC2, XC3, XC4, XD1, XD2, XD3, XS1, XS2, XS3	$\leq 0,1$ mm	Không cho phép nứt

4.4. Ví dụ tính toán so sánh giữa các tiêu chuẩn thiết kế

Trong mục này, công thức từ các tiêu chuẩn thiết kế được áp dụng cho 04 mặt cắt dầm BTCT thường ở tầng mái phơi lộ ra môi trường trên mặt nước, gần bờ theo phân loại của TCVN 9346:2012, là môi trường XS1 theo phân loại của TCVN 12041:2017 (cũng tương ứng với cấp XS1 của EC2 và cấp C2 theo ACI 318-19) có hàm lượng cốt thép khác nhau, bố trí cốt thép khác nhau. Chiều dày lớp BT bảo vệ với cốt thép dọc là 50mm đáp ứng được các yêu cầu của các tiêu chuẩn đã đề cập.

Hình 1 thể hiện mặt cắt ngang và bố trí cốt thép của 04 dầm khảo sát, ký hiệu từ D1 đến D4. Các dầm được bố trí cốt thép lớp dưới để tạo khung cốt thép và không kể đến khả năng chịu nén trong tính toán dự báo. Dầm D1, D2, D3 có cốt thép như nhau (chủng loại cốt thép CB500-V với $f_y = 500$ MPa, số lượng, và đường kính thanh), bề rộng dầm như nhau ($b = 300$ mm), cường độ chịu nén (mẫu trụ 150×300 mm) của BT là 30 MPa, quy đổi sang mẫu lập phương ($150 \times 150 \times 150$ mm) có cường độ 37 MPa. Các mô hình khác nhau về chiều cao dầm (h), và hàm lượng cốt thép (μ). Hàm lượng cốt thép dầm (μ) với các dầm D1, D2, D3, và D4 lần lượt là 0,57%, 0,78%, 1,23%, và 0,77%. Dầm D2 và D4 có cùng kích thước mặt cắt ngang, hàm lượng cốt thép gần như bằng nhau nhưng khác nhau về số lượng thanh và đường kính cốt thép. Giá trị CRVN được tính toán và so sánh giữa các tiêu chuẩn với cùng ứng suất cốt thép f_s là 240 MPa do tác dụng của toàn bộ tải trọng tiêu chuẩn gồm tải trọng



Bảng 9. Giá trị CRVN dự báo của các tiêu chuẩn

Tiêu chuẩn	Chiều rộng vết nứt, mm			
	Dầm D1 ($\mu = 0,57\%$)	Dầm D2 ($\mu = 0,78\%$)	Dầm D3 ($\mu = 1,23\%$)	Dầm D4 ($\mu = 0,77\%$)
ACI 318-95	0,238 (11,2%)	0,249 (4,2%)	0,274 (3,8%)	0,330 (34,1%)
EC2	0,291 (36,0%)	0,291 (21,8%)	0,266 (0,8%)	0,344 (39,8%)
ACI 224.1R-07	0,179 (-16,4%)	0,186 (-22,2)	0,205 (-22,3%)	0,310 (26,0%)
TCVN 5574:2018	0,214	0,239	0,264	0,246
ACI 318-19	Khoảng cách cốt thép dọc trong các dầm nhỏ hơn yêu cầu bởi biểu thức (5) nên CRVN nhỏ hơn 0,4 mm.			

Bảng 9 so sánh CRVN được dự báo giữa các tiêu chuẩn. Một số nhận xét được rút ra như sau:

- Giá trị CRVN dự báo theo các tiêu chuẩn có sự biến động rõ rệt. TCVN 5574:2018 dự báo CRVN thấp hơn so với ACI 318-95 và EC2. ACI 224R.1R-07 dự báo CRVN thấp hơn TCVN 5574:2018 đối với dầm D1, D2, D3, nhưng lại cao hơn đối với dầm D4. Tiêu chuẩn ACI 318-19 không đưa ra giá trị CRVN cụ thể, nhưng với khoảng cách cốt thép dọc của dầm, CRVN nứt được dự báo nhỏ hơn 0,4 mm, phù hợp với các tiêu chuẩn khác. Điều này cho thấy phương pháp kiểm soát CRVN thông qua khoảng cách cốt thép đơn giản, dễ áp dụng và đảm bảo CRVN dưới 0,4 mm như các tiêu chuẩn đã dự báo.

- Khi hàm lượng cốt thép dọc tăng từ 0,57% lên 0,78% và 1,23%, giá trị CRVN tăng lên theo dự báo của các tiêu chuẩn ACI 318-95, TCVN 5574:2018, ACI 224.1R-07. Khi hàm lượng cốt thép dọc tăng thì sự đóng góp của BT cho từng cốt thép trong vùng kéo giảm và ứng suất trung bình của cốt thép tăng lên và do đó CRVN tăng lên. Tuy nhiên, với tiêu chuẩn EC2, sự thay đổi này có một xu hướng khác. Cụ thể, khi hàm lượng cốt thép dọc tăng từ 0,57% lên 0,78%, CRVN không có sự gia tăng, nhưng sau đó lại được dự báo giảm khi hàm lượng cốt thép tăng từ 0,78% lên 1,23%.

- Ảnh hưởng của CRVN đối với hàm lượng cốt thép giống nhau nhưng khác nhau về đường kính cốt thép được thể hiện rõ qua sự so sánh kết quả dự báo giữa dầm D2 và D4 theo các tiêu chuẩn. Hầu hết các tiêu chuẩn đều thống nhất rằng lựa chọn đường kính cốt thép có ảnh hưởng rõ rệt đến CRVN. Với cùng diện tích cốt thép, việc tăng số lượng thanh cốt thép và giảm đường kính sẽ cải thiện lực dính giữa BT và cốt thép, từ đó giảm CRVN. Khi thay đổi đường kính thanh thép từ d20 của dầm D2 lên d28 của dầm D4, sự tăng CRVN theo các tiêu chuẩn ACI 318-95, ACI 224R.1R-07, EC2, và TCVN 5574:2018 lần lượt là 32,5%, 18,2%, 66,7%, và 2,9%. Tuy nhiên, theo tiêu chuẩn ACI 318-19, đường

kính cốt thép không phải là yếu tố quyết định chính ảnh hưởng đến CRVN, như thể hiện trong biểu thức (5).

- Theo các dự báo về CRVN từ các tiêu chuẩn ACI 318-19, ACI 318-95, ACI 224.1R-07, TCVN 5574:2018 và đều nhỏ hơn mức giới hạn cho phép (dưới 0,4 mm) đối với dầm trong môi trường làm việc C2 (xem Bảng 2) theo ACI 318-19.

- Các dầm D1, D2, và D3 có CRVN nhỏ hơn 0,3 mm đảm bảo theo quy định của EC2, trong khi đó dầm D4 có CRVN lớn hơn 0,3 mm, không đảm bảo theo tiêu chuẩn này. Tuy nhiên, dầm D2 và D4 có cùng diện tích cốt thép, việc chọn lựa nhiều thanh cốt thép với đường kính nhỏ hơn như dầm D2 sẽ giúp hạn chế CRVN, từ đó đảm bảo tuân thủ yêu cầu của tiêu chuẩn EC2.

- CRVN dự báo bởi TCVN 5574:2018 trong tất cả các dầm là lớn hơn so với quy định của TCVN 12041:2017, trong đó yêu cầu CRVN phải nhỏ hơn 0,1 mm, do đó không đảm bảo với môi trường làm việc XS1. Để đảm bảo CRVN tuân thủ quy định của TCVN 12041:2017, cần phải tăng cốt thép chịu kéo thành 4d32 tức tăng diện tích lên 2,3 lần, tương tự như kết quả trong nghiên cứu của Tùng [10]. Việc này sẽ tác động đáng kể đến tính kinh tế của công trình.

5. Kết luận

Bài báo này so sánh về quy định bảo vệ chống ăn mòn cốt thép với công trình nhà BTCT ven biển theo một số tiêu chuẩn của Việt Nam, Mỹ, và Châu Âu. Một số kết luận được rút ra như sau:

- Các tiêu chuẩn kiểm soát hàm lượng clorua trong BT thông qua từng vật liệu đầu vào hoặc bằng tổng hàm lượng clorua sau khi BT được chế tạo. Như đã trình bày ở phần thảo luận, các tiêu chuẩn Việt Nam (TCVN 9346:2012, TCVN 12041:2017, và TCVN 12251:2020) cần được rà soát lại các quy định về hàm lượng tối đa clorua và phương pháp thí nghiệm clorua, nhằm đảm bảo tính thống nhất giữa các tiêu chuẩn và xem xét cập nhật những điểm phù hợp từ các tiêu chuẩn tiên tiến như ACI và EC2.

- Các tiêu chuẩn đều quy định về chiều dày lớp BT bảo vệ cốt thép và chất lượng của BT tùy thuộc vào điều kiện môi trường làm việc của các cấu kiện. TCVN 12041:2017 và TCVN 12251:2020 đã đưa ra các quy định gần với tiêu chuẩn châu Âu EC2, thậm chí còn khắt khe hơn ở một số điểm. Tuy nhiên, TCVN 9346:2012 đã khá cũ và một số điểm chưa thống nhất với các tiêu chuẩn 12041:2017 và TCVN 12251:2020. Vì vậy, cần rà soát và cập nhật để đảm bảo đồng bộ giữa các tiêu chuẩn.

- CRVN dự báo theo các tiêu chuẩn có sự biến động khác nhau. Cụ thể, giá trị CRVN dự báo bởi TCVN 5574:2018 là thấp hơn so với hai tiêu chuẩn ACI 318-95 và EC2. ACI 224R.1R-07 dự báo CRVN thấp hơn TCVN 5574:2018 với các dầm D1, D2, D3 nhưng lại cao hơn đối với dầm D4.

- ACI 318-19 không cho thấy có sự liên hệ rõ ràng giữa CRVN và mức độ ăn mòn cốt thép, đồng thời cho rằng CRVN trong kết cấu có biến động và khó dự báo bằng tính toán. ACI 318-19 khuyến nghị khoảng cách cốt thép dọc trong dầm để dự báo CRVN nứt dưới 0,4 mm, phù hợp với các giá trị dự báo của các tiêu chuẩn khác. Phương pháp này đơn giản và dễ áp dụng cho kỹ sư. Trong khi đó, EC2 quy định giới hạn CRVN từ 0,3 mm đến 0,4 mm tùy vào môi trường. Các dầm D1, D2, D3 khảo sát đều đáp ứng tiêu chuẩn EC2, với CRVN nhỏ hơn 0,3 mm cho môi trường XS1.

- Với cùng diện tích cốt thép dọc chịu kéo thì việc chọn lựa nhiều thanh cốt thép với đường kính nhỏ hơn sẽ giúp hạn chế CRVN.

- Giới hạn CRVN trong tiêu chuẩn Việt Nam, đặc biệt là TCVN 12041:2017, nhỏ hơn nhiều so với các tiêu chuẩn quốc tế như ACI 318 và EC2, dẫn đến phải tăng diện tích cốt thép dọc đến 2,3 lần để đảm bảo vết nứt dưới 0,1 mm, gây tăng đáng kể chi phí xây dựng. Do đó, cần xem xét điều chỉnh quy định về CRVN trong các tiêu chuẩn Việt Nam sao cho phù hợp và đồng bộ với các tiêu chuẩn quốc tế.

- Trong thiết kế xây dựng công trình BTCT ven biển, có thể xem xét áp dụng các tiêu chuẩn EC2 hoặc ACI 318 để đảm bảo tối ưu về mặt kinh tế và an toàn cho công trình.

Tài liệu tham khảo

- [1] Broomfield, J. P. (2007). *Corrosion of steel in concrete: understanding, investigation, and repair*. Taylor & Francis, New York, USA.
- [2] Nguyễn, Đ. N., Tân, N. N. (2019). Dự báo khả năng chịu lực còn lại của cột BTCT chịu nén lệch tâm phẳng có cốt thép dọc bị ăn mòn. *Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng (KHCN XD) - ĐHXD*, 13(2V): 53–62.
- [3] Tan, N. N., Nguyen, N. D. (2019). An experimental study on flexural behavior of corroded reinforced concrete beams using electrochemical accelerated corrosion method. *Journal of Science and Technology in Civil Engineering (STCE) - NUCE*, 13(1):1–11.
- [4] Bộ Xây Dựng (2016). *Tài liệu đào tạo, bồi dưỡng thí nghiệm ăn mòn bê tông và bê tông cốt thép*. Chương trình đào tạo thuộc đề án 1511.
- [5] TCVN 9346:2012. *Kết cấu bê tông và bê tông cốt thép - Yêu cầu bảo vệ chống ăn mòn trong môi trường biển*. Bộ Khoa học và Công nghệ, Việt Nam.
- [6] TCVN 12041:2017. *Kết cấu bê tông và bê tông cốt thép - Yêu cầu chung về thiết kế độ bền lâu và tuổi thọ trong môi trường xâm thực*. Bộ Khoa học và Công nghệ, Việt Nam.
- [7] TCVN 12251:2020. *Bảo vệ chống ăn mòn cho kết cấu xây dựng*. Bộ Khoa học và Công nghệ, Việt Nam.
- [8] TCVN 5574:2018. *Kết cấu bê tông và bê tông cốt thép-Tiêu chuẩn thiết kế*. Bộ Khoa học và Công nghệ, Việt Nam.
- [9] Nghi, N. V., Bá, N. N. (2017). Thiết kế kết cấu bê tông cốt thép theo yêu cầu về hình thành và mở rộng vết nứt theo TCVN5574:2012 và SP63.13330-2012. *Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng*, (3):50–56.
- [10] Tùng, V. M. (2021). Ảnh hưởng của chiều rộng khe nứt giới hạn trong thiết kế kết cấu bê tông cốt thép vùng ven biển. *Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng*, (3):3–9.
- [11] ACI Committee 222 (2010). *Protection of metals in concrete against corrosion*. ACI 222R-01 (Reapproved 2010), American Concrete Institute, Farmington Hills, MI.
- [12] ACI Committee 201 (2008). *Guide to durable concrete*. ACI 201R-08, American Concrete Institute, Farmington Hills, MI.
- [13] ACI SP308-16 (2016). *Chloride thresholds and limits for new construction*. American Concrete Institute, Farmington Hills, MI.
- [14] ACI Committee 301 (2010). *Specifications for structural concrete*. ACI 301-10, American Concrete Institute, Farmington Hills, MI.
- [15] ACI Committee 318 (2019). *Building code requirements for structural concrete and commentary*. ACI 318-19, American Concrete Institute, Farmington Hills, MI.
- [16] ASTM C1152, C1218, C1524, C1602 (2014). *Annual Book of ASTM Standards*. Volume 04.02, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- [17] ACI Committee 357 (1997). *Guide for design and construction of fixed off-shore concrete*. ACI 357 R-84 (Reapproved 1997), American Concrete Institute, Farmington Hills, MI.
- [18] ACI Committee 318 (1995). *Building code requirements for structural concrete and commentary*. ACI 318-95, American Concrete Institute, Farmington Hills, MI.
- [19] ACI Committee 224 (2001). *Control of cracking of concrete structures*. ACI 224R-01, American Concrete Institute, Farmington Hills, MI.
- [20] ACI Committee 224 (2007). *Causes, evaluation, and repair of cracks in concrete structures*. ACI 224.1R-07, American Concrete Institute, Farmington Hills, MI.
- [21] EC 2 (2014). *EN 1992-1-1:2004+A1:2014: Design of concrete structures - General rules and rules for buildings*. European Committee for Standardization.
- [22] EN 206 (2021). *EN 206:2013+A2:2021: Concrete - Specification, performance, production and conformity*. European Standard.
- [23] EN 197 (2011). *EN 197-1:2011: Cement – Part 1: Composition, specifications and conformity criteria for common cements*. European Standard.

- [24] EN 196 (1992). *EN 196-21:1992: Methods of testing cement — Part 21: Determination of the chloride, carbon dioxide and alkali content of cement*. European Standard.
- [25] EN 1008 (2002). *EN 1008:2002: Mixing water for concrete - Specification for sampling, testing and assessing the suitability of water, including water recovered from processes in the concrete industry, as mixing water for concrete*. European Standard.
- [26] TCVN 7572-15:2006 (2006). *Cốt liệu cho bê tông và vữa – Phương pháp thử - Phần 15: Xác định hàm lượng clorua*. Bộ Khoa học và Công nghệ, Việt Nam.
- [27] ACI Committee 222.1 (1996). *Provisional standard test method for water-soluble chloride available for corrosion of embedded steel in mortar*. American Concrete Institute, Farmington Hills, MI.
- [28] IS 456:2000 (2007). *Plain and reinforced concrete - Code of practice [CED 2: Cement and Concrete]*. Bureau of Indian Standards, New Delhi.
- [29] NZS 3109:1997 (2003). *Concrete Construction*. Standards New Zealand, Private Bag 2439 Wellington 6410.
- [30] Gergely, P., Lutz, L. A. (1968). Maximum crack width in RC flexural members, causes, mechanism and control of cracking in concrete. *SP-20*, Detroit, American Concrete Institute, 87–117.