

Ảnh hưởng của ăn mòn đến bê tông cốt thép trong môi trường Clorua: Hiệu ứng thanh top-bar, cốt sợi thép và vết nứt

Nguyễn Thị Thu Trang^{1*}, Lưu Văn Thực¹, Cao Duy Hưng¹, Lê Thị Phương Loan¹

¹Bộ môn Công nghệ và Quản lý xây dựng, Khoa Xây dựng dân dụng và công nghiệp, Trường Đại học Xây dựng Hà Nội

TỪ KHOÁ

Bê tông cốt thép
Ăn mòn
Môi trường Clorua
Nứt
Cốt sợi thép

TÓM TẮT

Bê tông cốt thép (BTCT) là một trong những vật liệu được sử dụng rộng rãi nhất trong xây dựng nhờ độ bền và khả năng chịu lực cao. Tuy nhiên, sau một thời gian khai thác, BTCT có thể bị suy giảm chất lượng và tuổi thọ do hiện tượng ăn mòn cốt thép. Nghiên cứu này nhằm đánh giá ảnh hưởng của quá trình ăn mòn trong môi trường chứa ion Cl^- , có xét đến hiệu ứng thanh top-bar, ảnh hưởng của cốt sợi thép và sự tồn tại của vết nứt nhân tạo. Các mẫu BTCT được tiếp xúc chu kỳ với dung dịch NaCl 35 g/L, đồng thời theo dõi quá trình ăn mòn thông qua đo dòng điện ăn mòn, quan sát trực quan, đo giảm khối lượng cốt thép và vẽ bản đồ phân bố vết nứt ăn mòn. Kết quả nghiên cứu cho thấy, trong bê tông có bổ sung cốt sợi thép, thời điểm xuất hiện vết nứt do ăn mòn bị kéo dài đáng kể so với bê tông thông thường. Tuy nhiên, việc bổ sung cốt sợi thép không làm thay đổi đáng kể động học ăn mòn tại cực anode. Đặc biệt, khi lớp bê tông bảo vệ mỏng, hiệu ứng thanh top-bar trở thành yếu tố chi phối, đóng vai trò quan trọng hơn so với sự tồn tại của vết nứt nhân tạo trong cơ chế khởi phát và lan truyền ăn mòn.

KEYWORDS

Reinforced concrete
Corrosion
Chloride induced corrosion
Cracks
Fiber

ABSTRACT

Reinforced concrete (RC) is one of the most widely used construction materials due to its strength and durability. However, with time, RC structures may experience deterioration in quality and reduction in service life due to the corrosion of reinforcing steel. This study investigates the influence of corrosion behavior in chloride environments, considering the top-bar effect, the presence of steel fibers in concrete, and the existence of artificial cracks. RC specimens were cyclically exposed to a 35 g/L NaCl solution, while corrosion activity was monitored through galvanic current measurements, mass loss evaluations, and visual inspections of crack map and corrosion distribution. The results indicate that in steel-fiber-reinforced concrete, the initiation of corrosion-induced cracking occurs significantly later than in plain concrete. However, the addition of fibers does not allow to give an anodic control of corrosion. Notably, when the concrete cover is thin, the top-bar effect becomes the dominant factor, introducing micro-defects and weak interfaces at the steel-concrete boundary that facilitate chloride ingress. Consequently, the top-bar effect plays a more critical role than the presence of artificial cracks in controlling the initiation and propagation of corrosion. The results show that corrosion-induced cracks in steel fiber-reinforced concrete develop more slowly than in conventional concrete. The addition of fibers does not allow to give an anodic control of corrosion. Top-bar effect is more important than artificial crack in case of weak cover thickness.

1. Giới thiệu

Bê tông cốt thép (BTCT) là một trong những vật liệu chủ đạo và được sử dụng rộng rãi nhất trong xây dựng nhờ khả năng chịu lực cao và tính kinh tế. Tuy nhiên, trong quá trình khai thác và sử dụng, vật liệu này dễ bị suy giảm tính năng cơ học do hiện tượng ăn mòn cốt thép, đặc biệt khi chịu tác động của các yếu tố môi trường xâm thực. Trong số các tác nhân gây hại, môi trường chứa ion Cl^- được xem là một trong những điều kiện bất lợi nhất đối với BTCT [1–3]. Sự xâm nhập của ion Cl^- có thể phá hủy lớp màng thụ động bảo vệ trên bề mặt thép, kích hoạt quá trình ăn mòn điện hóa, dẫn đến sự hình thành vết

nứt và suy giảm độ bền cũng như tuổi thọ của kết cấu.

Trong quá trình đổ và đầm bê tông, tại vùng tiếp xúc giữa cốt thép và bê tông có thể hình thành các khuyết tật vi mô do sự phân tầng hoặc hiện tượng tách nước. Các khuyết tật này làm suy giảm đáng kể khả năng liên kết cơ học cũng như tính năng bảo vệ của lớp bê tông bao bọc đối với cốt thép [4], từ đó làm tăng nguy cơ khởi phát và lan truyền ăn mòn cục bộ trong môi trường chứa ion Cl^- . Đối với các kết cấu có nhiều lớp cốt thép, các thanh thép bố trí ở lớp trên (theo hướng đổ bê tông) thường chịu ảnh hưởng bất lợi hơn, với mật độ khuyết tật tại vùng tiếp xúc cao hơn so với các thanh ở lớp dưới. Hiện tượng này được gọi là hiệu ứng top-bar, thường quan sát thấy rõ rệt khi chiều dày

*Liên hệ tác giả: trangntt@huce.edu.vn

Nhận ngày 15/09/2025, sửa xong ngày 21/10/2025, chấp nhận đăng ngày 22/10/2025

Link DOI: <https://doi.org/10.54772/jomc.05.2025.1161>

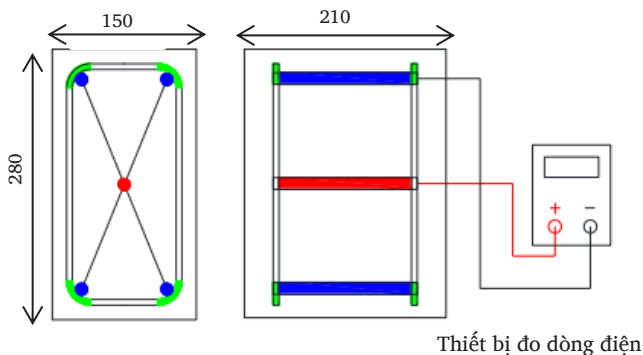
lớp bê tông vượt quá 15 cm [5]. Trong nghiên cứu [6], Zhang và cộng sự đã đề cập đến hiệu ứng top-bar và vai trò của giao diện thép-bê tông trong cơ chế ăn mòn của BTCT thông thường chịu tác động của môi trường chứa ion Cl^- . Tuy nhiên, trong thực tế, việc bổ sung sợi thép vào cấp phối bê tông ngày càng được quan tâm như một giải pháp nhằm cải thiện khả năng chịu kéo và hạn chế sự hình thành, phát triển của các vết nứt do ăn mòn cốt thép [7, 8]. Liên quan đến cơ chế ăn mòn, François [9] đã đề xuất một mô hình tổng quát mô tả quá trình ăn mòn của BTCT trong cả hai trường hợp có và không có vết nứt, bên cạnh mô hình cổ điển trước đó của Tuutti [10]. Tuy nhiên, câu hỏi đặt ra là: liệu khi bổ sung sợi thép vào bê tông, mô hình này có sự thay đổi đáng kể về cơ chế hoặc động học ăn mòn hay không?

Trong bài báo này, các tác giả tập trung nghiên cứu một số yếu tố ảnh hưởng đến quá trình ăn mòn của bê tông cốt thép có bổ sung sợi thép trong môi trường chứa ion Cl^- , bao gồm hiệu ứng thanh top-bar và sự xuất hiện của vết nứt trong kết cấu bê tông.

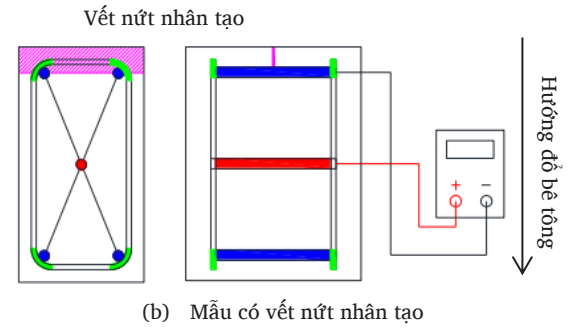
2. Vật liệu và phương pháp nghiên cứu

2.1. Mẫu thí nghiệm

Các mẫu bê tông cốt thép (BTCT) sử dụng trong thí nghiệm có kích thước 280 x 210 x 150 mm. Mỗi mẫu bao gồm năm thanh cốt thép có đường kính 12 mm, chiều dài 160 mm, cùng một thanh thép đai có đường kính 6 mm. Trong đó, hai thanh cốt thép được bố trí ở lớp trên và hai thanh còn lại ở lớp dưới, thanh cốt thép thứ năm được đặt tại vị trí trung tâm khối mẫu, như được đánh dấu màu đỏ trong Hình 1. Các thanh thép ở lớp trên và lớp dưới được ký hiệu tương ứng là TB (thanh lớp trên, vị trí mặt trước mẫu) và TF (thanh lớp trên, vị trí mặt sau mẫu). Các thanh được đánh số theo thứ tự mẫu tương ứng (ví dụ như TB1, TB2, TF1, TF2, ...). Một đầu của các thanh thép lớp trên hoặc lớp dưới và thanh trung tâm được hàn với dây dẫn điện nhằm phục vụ cho việc đo cường độ dòng ăn mòn trong quá trình thí nghiệm. Tại các vị trí góc, phần tiếp xúc của thép đai và thép chính được phủ vật liệu cách điện (đánh dấu màu xanh lá trong Hình 1) để loại trừ ảnh hưởng của thép đai đối với quá trình ăn mòn của các thanh cốt thép chính. Toàn bộ quá trình đổ bê tông được thực hiện theo hướng từ trên xuống.



(a) Mẫu không có vết nứt nhân tạo



(b) Mẫu có vết nứt nhân tạo

Hình 1. Hình ảnh cấu tạo mẫu dùng trong thí nghiệm.

Các mẫu thí nghiệm được đánh số thứ tự và chia thành hai nhóm bao gồm nhóm A và nhóm B. Các mẫu thuộc nhóm A được tạo một vết nứt nhân tạo có chiều rộng 1 mm và chiều sâu 27 mm tại bề mặt phía trên cùng của mẫu. Việc tạo vết nứt nhân tạo với kích thước này nhằm mục đích nghiên cứu ảnh hưởng trực tiếp của vết nứt đến quá trình ăn mòn cốt thép, đồng thời loại trừ tác động của các vết nứt do tải trọng gây ra đối với vùng tiếp xúc giữa bê tông và cốt thép, theo các kết luận của những nghiên cứu trước đó [11–13]. Ngược lại, các mẫu thuộc nhóm B được giữ nguyên, không có vết nứt nhân tạo.

2.2. Vật liệu chế tạo mẫu

Bê tông dùng trong các thí nghiệm được chế tạo theo thành phần vật liệu và cấp phối được trình bày trong Bảng 1 và Bảng 2.

Bảng 1. Tỷ lệ vật liệu xi măng

Thành phần	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	Na_2O
Tỷ lệ %	21,4	6,0	2,3	63,0	1,4	3,0	0,5

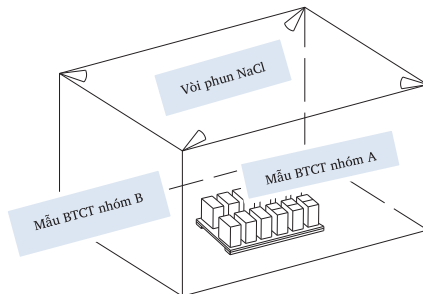
Bảng 2. Thành phần cấp phối

Thành phần cấp phối	Trọng lượng riêng (kg/m^3)
Xi măng Portland	435
Nước	217,5
Đá	726,19
Cát	895,28
Sợi Dramix 63-65	58,5

2.3. Quá trình tạo môi trường ăn mòn Clorua

Quá trình tạo môi trường ăn mòn Clorua được tiến hành trong một nhà gỗ ngoài trời (Hình 2). Các mẫu thí nghiệm được đặt trong điều kiện chu kỳ ẩm – khô luân phiên. Mỗi chu kỳ ăn mòn bao gồm hai ngày phun dung dịch NaCl liên tục và năm ngày để khô tự nhiên. Trong giai đoạn phun ẩm, dung dịch NaCl có nồng độ 35 g/l được phun đều từ trên xuống thông qua hệ thống vòi phun bố trí tại bốn góc tường nhằm đảm bảo toàn bộ bề mặt mẫu tiếp xúc đồng đều với dung dịch muối. Giai đoạn khô được thực hiện trong điều kiện tự nhiên, không che phủ, để quá trình bay hơi và tái kết tinh muối xảy ra tự nhiên trên bề mặt bê tông.

Cách thức luân phiên giữa hai giai đoạn ẩm và khô giúp tăng tốc độ xâm nhập ion Cl^- và thúc đẩy cơ chế oxy hóa – khử tại vùng giao diện thép - bê tông, từ đó rút ngắn thời gian khảo sát nhưng vẫn đảm bảo tính đại diện cho quá trình ăn mòn tự nhiên dài hạn của BTCT trong môi trường Clorua.



Hình 2. Minh họa quá trình tạo môi trường ăn mòn Clorua cho mẫu BTCT.

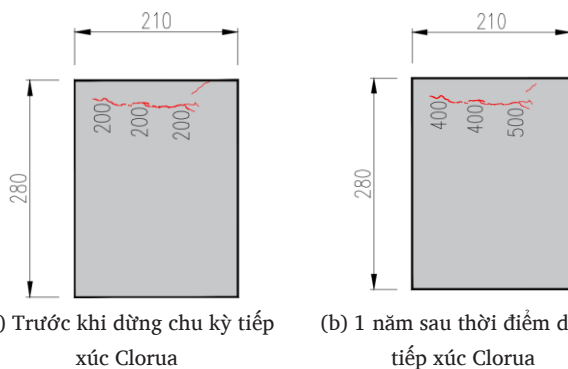
2.4. Đo dòng ăn mòn

Dòng điện ăn mòn được đo định kỳ mỗi tuần một lần, tại thời điểm 48 giờ sau khi kết thúc giai đoạn phun dung dịch NaCl. Việc đo được thực hiện bằng điện kế có độ chính xác $0,01 \mu\text{A}$. Các phép đo được tiến hành thông qua hệ thống dây dẫn điện đã được hàn sẵn tại đầu các thanh cốt thép lớp trên, lớp dưới và thanh thép trung tâm trong quá trình chế tạo mẫu.

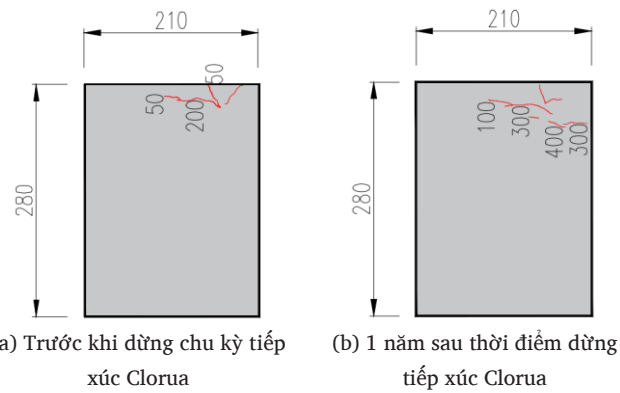
3. Kết quả và thảo luận

3.1. Quan sát và đo sự phát triển của vết nứt ăn mòn

Các vết nứt do ăn mòn hình thành chủ yếu phân bố song song với chiều rộng của mẫu, phản ánh hướng ứng suất do sự giãn nở thể tích của sản phẩm ăn mòn. Quá trình xuất hiện và phát triển của vết nứt được theo dõi định kỳ trong suốt thời gian thí nghiệm, sử dụng kính lúp đo chuyên dụng có độ chính xác $0,01 \text{ mm}$. Dữ liệu đo được ghi nhận và biểu diễn lại dưới dạng hình ảnh minh họa bản đồ vết nứt nhằm phân tích mối tương quan giữa sự hình thành vết nứt và quá trình ăn mòn cốt thép (Hình 3 và Hình 4).



Hình 3. Ví dụ minh họa quá trình theo dõi sự hình thành và phát triển vết nứt ăn mòn trên mẫu bê tông cốt thép không có vết nứt nhân tạo.



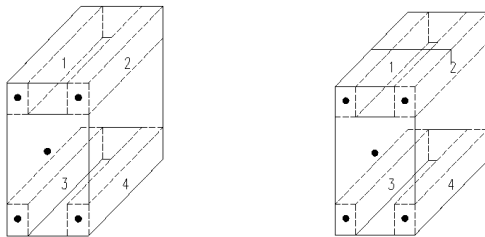
Hình 4. Ví dụ minh họa quá trình theo dõi sự hình thành và phát triển vết nứt ăn mòn trên mẫu bê tông cốt thép có vết nứt nhân tạo.

Kết quả theo dõi trong quá trình tiếp xúc với môi trường Clorua cho thấy các vết nứt do ăn mòn bắt đầu xuất hiện trên cả bề mặt trước và bề mặt sau của mẫu sau khoảng chu kỳ thứ 64. Đến thời điểm kết thúc thí nghiệm (tương ứng 85 chu kỳ đối với các mẫu có vết nứt nhân tạo và 94 chu kỳ đối với các mẫu không có vết nứt nhân tạo), phần lớn các mẫu đều đã xuất hiện và phát triển vết nứt do ăn mòn với mức độ khác nhau. Tuy nhiên, một số mẫu vẫn chưa ghi nhận sự xuất hiện của vết nứt tại thời điểm này. Cụ thể, khi tiến hành thí nghiệm phá hủy mẫu, bốn mẫu được xác định không xuất hiện vết nứt ăn mòn, trong đó ba mẫu thuộc nhóm A (mẫu có vết nứt nhân tạo). Kết quả này cho thấy sự không đồng nhất trong quá trình khởi phát ăn mòn và hình thành vết nứt.

Trong cùng điều kiện thí nghiệm tương tự, Zhang và cộng sự [6] khi nghiên cứu trên bê tông cốt thép không bổ sung sợi thép đã ghi nhận sự xuất hiện của vết nứt ăn mòn sau 16 chu kỳ phun ẩm - chờ khô, và tất cả các mẫu đều xuất hiện vết nứt sau khoảng 45 tuần. So với kết quả của nghiên cứu này, thời điểm khởi phát vết nứt do ăn mòn trong mẫu BTCT có cốt sợi thép diễn ra muộn hơn đáng kể. Điểm khác biệt chính giữa hai trường hợp là thành phần vật liệu bê tông, cụ thể là sự có mặt của sợi thép trong hỗn hợp bê tông. Do đó, có thể nhận định rằng cốt sợi thép đã góp phần làm chậm quá trình hình thành vết nứt do ăn mòn, nhờ tăng cường khả năng chịu kéo và phân tán ứng suất cục bộ tại vùng bê tông bao quanh thanh cốt thép, qua đó nâng cao khả năng kháng nứt và kéo dài giai đoạn cảm ứng ăn mòn. Ngoài ra, các vết nứt do ăn mòn chỉ xuất hiện tại vị trí cốt thép phía trên. Hiện tượng này có thể được lý giải bởi hiệu ứng thanh top-bar, vốn thường làm xuất hiện các khuyết tật như lỗ rỗng và sự tách dính tại vùng tiếp xúc thép-bê tông. Mặc dù việc tạo vết nứt nhân tạo nhằm loại trừ ảnh hưởng của chất lượng tiếp xúc thép-bê tông, song các vết nứt này vẫn đóng vai trò như đường dẫn ưu tiên cho sự xâm nhập của các tác nhân ăn mòn. Khi lớp sản phẩm gỉ hình thành cục bộ trên bề mặt cốt thép đạt đến thể tích đủ lớn, nó sẽ gây ứng suất nội sinh, dẫn đến sự hình thành vết nứt ăn mòn. Tuy nhiên, trong thí nghiệm này, các vết nứt ăn mòn vẫn chưa xuất hiện ngay cả trên những mẫu có vết nứt nhân tạo. Điều đó cho thấy rằng hiệu ứng thanh top-bar có tác động chi phối mạnh hơn đến sự khởi phát vết nứt so với ảnh hưởng của vết nứt nhân tạo.

3.2. Kết quả sau thí nghiệm phá hoại mẫu

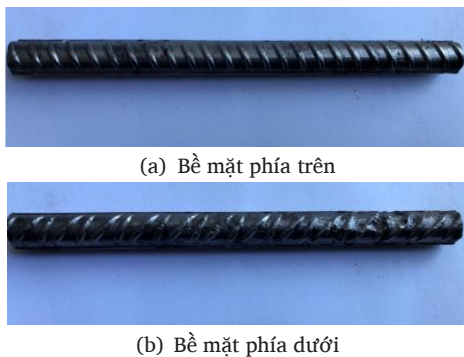
Sau khi kết thúc giai đoạn ăn mòn trong môi trường Clorua, các mẫu được cắt thành các phần bê tông cốt thép nhỏ hơn, ký hiệu là 1, 2, 3 và 4 (Hình 5). Mỗi phần có dạng hình hộp chữ nhật, sau đó tiến hành nén dọc theo trục của thanh cốt thép nhằm tách riêng cốt thép và bê tông bao quanh. Kích thước tiết diện nhỏ nhất của mỗi phần 5 cm × 5 cm để đảm bảo thu được bề mặt tiếp xúc thép-bê tông đủ rộng phục vụ cho quan sát và đánh giá mức độ khuyết tật về mặt định tính. Các mẫu sẽ được chia thành các phần BTCT nhỏ hơn (số 1,2,3 và 4 trong Hình 5). Tiếp theo, các mẫu hình hộp chữ nhật này được nén dọc theo chiều dài thanh cốt thép bên trong để tách riêng cốt thép và bê tông. Mỗi phần có tiết diện mặt cắt nhìn từ cạnh 5cmx5cm để đảm bảo có thể thu được bề mặt tiếp xúc thép-bê tông đủ lớn sau khi nén tách. Bề mặt thép-bê tông được quan sát và đánh giá mức độ khuyết tật.



(a) Mẫu không có vết nứt nhân tạo (b) Mẫu có vết nứt nhân tạo

Hình 5. Vị trí các phần bê tông cốt thép được chia tách từ một mẫu thí nghiệm.

Sau khi tách khỏi các khối bê tông nhỏ, các thanh cốt thép được làm sạch cẩn thận nhằm loại bỏ hoàn toàn lớp sản phẩm ăn mòn bám trên bề mặt đồng thời vẫn đảm bảo không gây ảnh hưởng đến hình thái ban đầu của thép. Kết quả quan sát định tính sau khi làm sạch cho thấy tất cả các thanh cốt thép lớp trên đều chịu ảnh hưởng ăn mòn rõ rệt hơn so với các thanh cốt thép lớp dưới. Ngoài ra, đối với cùng một thanh thép, mức độ ăn mòn tại bề mặt phía dưới thường nghiêm trọng hơn so với bề mặt phía trên. Một ví dụ minh họa cho sự khác biệt về mức độ ăn mòn trên các mặt của thanh cốt thép trong một mẫu BTCT có thể được quan sát trong Hình 6 và Hình 7 dưới đây.



Hình 6. Mức độ ăn mòn quan sát được trên một thanh cốt thép lớp trên.



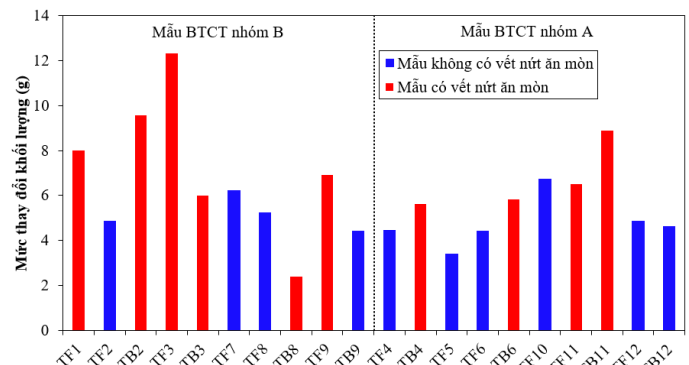
(a) Bề mặt phía trên



(b) Bề mặt phía dưới

Hình 7. Mức độ ăn mòn quan sát được trên một thanh cốt thép lớp dưới.

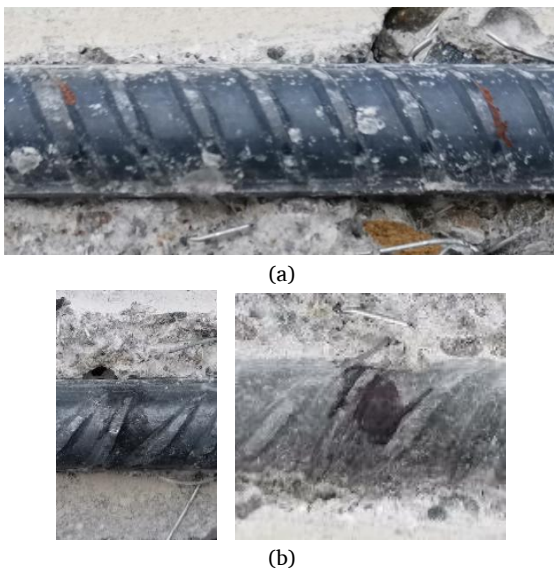
Sau khi loại bỏ hoàn toàn lớp sản phẩm ăn mòn, các thanh cốt thép được cân bằng cân điện tử có độ chính xác 0,01 g nhằm xác định mức giảm khối lượng do quá trình ăn mòn gây ra. Việc tẩy sạch rỉ sắt làm cho khối lượng thực đo của thanh thép giảm so với giá trị ban đầu trước khi thí nghiệm. Kết quả thay đổi khối lượng của các thanh cốt thép lớp trên được tổng hợp và thể hiện trên Hình 8. Các thanh cốt thép lớp trên được lựa chọn để phân tích chi tiết do biểu hiện ăn mòn rõ rệt hơn đáng kể so với các thanh ở lớp dưới, phản ánh ảnh hưởng đặc trưng của hiệu ứng top-bar trong môi trường ăn mòn Clorua.



Hình 8. Biểu đồ thể hiện sự thay đổi khối lượng của các thanh cốt thép sau quá trình ăn mòn trong môi trường Clorua.

Rõ ràng, biểu đồ Hình 8 cho thấy sự chênh lệch khối lượng do ăn mòn xuất hiện ở tất cả các thanh cốt thép lớp trên, và không thể hiện sự phụ thuộc vào việc mẫu có hay không có vết nứt nhân tạo. Đáng chú ý, thanh thép có mức giảm khối lượng lớn nhất (TF3) lại thuộc nhóm BTCT không có vết nứt tạo trước, cho thấy rằng sự tồn tại của vết nứt nhân tạo không phải là yếu tố chi phối chính đối với mức độ ăn mòn. Sự khác biệt này có thể được giải thích bởi hiệu ứng top-bar, theo đó các khuyết tật dạng lỗ rỗng hoặc vùng tiếp xúc không hoàn hảo giữa thép và bê tông được hình thành trong quá trình đổ và đầm bê tông. Những khuyết tật này tạo điều kiện thuận lợi cho sự xâm nhập của ion Cl⁻, làm tăng tốc độ khởi phát và lan truyền ăn mòn cục bộ trên bề mặt

thanh thép. Đáng lưu ý, chiều dày lớp bê tông bảo vệ trong các mẫu thí nghiệm tương đối nhỏ (≈ 21 mm), góp phần làm giảm khả năng bảo vệ của bê tông đối với cốt thép. Kết quả này phù hợp với các nghiên cứu trước đó của François và cộng sự [14] và Yu và cộng sự [15], khi ăn mòn có xu hướng phát triển dọc theo chiều dài thanh thép (Hình 6a), thay vì tập trung tại vùng gần vết nứt tạo trước, và thậm chí mạnh hơn ở bề mặt dưới thanh thép - vị trí tiếp xúc xa hơn với tác nhân ăn mòn (Hình 6b). Tương tự như kết luận của Zhang và cộng sự [6], vị trí khởi phát ăn mòn được quan sát thấy chủ yếu tại chân của các gờ nổi trên bề mặt thanh thép, hơn là tại các lỗ rỗng trong lớp bê tông bao quanh (Hình 9).



Hình 9. Vị trí ăn mòn quan sát được trên bề mặt thanh cốt thép (a) và bề mặt tiếp xúc thép - bê tông (b).

3.3. Kết quả đo dòng ăn mòn

Từ kết quả đo dòng điện theo thời gian, điện tích tích lũy được xác định theo công thức sau :

$$C = \sum_{i=0}^{i=j} I \times (t_i - t_{i-1}) \text{ (Coulomb)} \quad (1)$$

Trong đó :

- I : cường độ dòng điện ăn mòn đo được tại thời điểm t_i (μA);
- t_i và t_{i-1} : hai mốc thời điểm liên tiếp ghi nhận dòng điện
- j : số lần đo trong toàn bộ quá trình thí nghiệm;
- C : điện tích ăn mòn tích lũy, biểu thị tổng lượng điện tử truyền qua trong giai đoạn khảo sát (Coulomb).

Trong nghiên cứu của François và cộng sự [9], tác giả đã đề xuất mô hình mô tả sự phát triển của quá trình ăn mòn cốt thép trong hai trường hợp có vết nứt và không có vết nứt trên bề mặt bê tông như minh họa trong Hình 10. Theo mô hình bốn pha của François, quá trình ăn mòn cốt thép trong BTCT được mô tả qua các giai đoạn sau:

(1) Giai đoạn tiềm ẩn (Incubation phase)

Ở giai đoạn này, các tác nhân xâm thực bắt đầu thâm nhập vào lớp bê tông bảo vệ và tác động dần đến màng thụ động trên bề mặt cốt

thép. Quá trình phá vỡ màng bảo vệ diễn ra chậm, nhưng đóng vai trò quyết định cho sự khởi đầu của ăn mòn. Do thời gian của pha này thường ngắn so với vòng đời kết cấu, nên có thể được xem là không đáng kể khi phân tích tuổi thọ tổng thể của BTCT.

(2) Giai đoạn khởi đầu (Initiation phase)

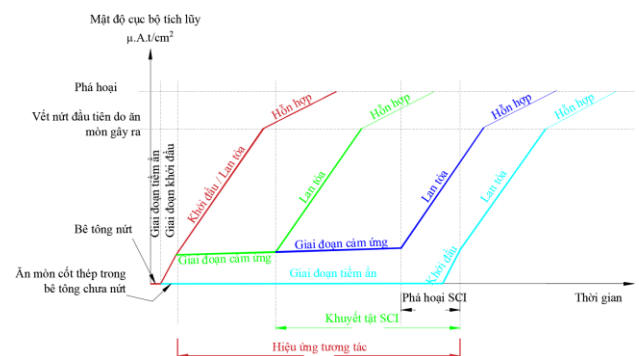
Đây là giai đoạn hình thành các sản phẩm ăn mòn đầu tiên. Một phần sản phẩm này có thể lấp đầy các khe rỗng hoặc vết nứt vi mô trong bê tông, tạo nên hiện tượng tự bít kín (self-healing) tạm thời, từ đó làm chậm quá trình lan truyền ăn mòn. Tương tự như giai đoạn tiềm ẩn, thời gian tồn tại của pha này tương đối ngắn so với tổng vòng đời kết cấu.

(3) Giai đoạn cảm ứng ăn mòn (Induction phase)

Trong giai đoạn này, quá trình ăn mòn tiếp tục phát triển với tốc độ chậm và chưa gây ra sự hình thành vết nứt trên bề mặt bê tông. Thời gian kéo dài của pha cảm ứng phụ thuộc chủ yếu vào khả năng thâm nhập của các tác nhân ăn mòn qua lớp bê tông bảo vệ, đồng thời chịu ảnh hưởng mạnh mẽ từ các điều kiện môi trường như độ ẩm, nhiệt độ, hay chu kỳ ẩm - khô, ...

(4) Giai đoạn lan truyền ăn mòn (Propagation phase)

Đối với ăn mòn do ion Cl^- , giai đoạn lan truyền được xác định bắt đầu khi nồng độ Cl^- tại bề mặt thép vượt ngưỡng tới hạn, dẫn đến phá hủy hoàn toàn màng thụ động. Từ thời điểm này, vết nứt do ăn mòn bắt đầu hình thành và mở rộng, quá trình ăn mòn diễn ra mạnh mẽ cho đến khi kết cấu BTCT mất khả năng chịu lực hoặc không còn đảm bảo điều kiện an toàn sử dụng.



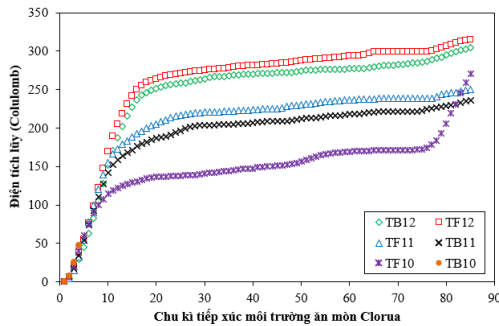
Hình 10. Mô hình sự phát triển của quá trình ăn mòn cốt thép trong bê tông theo François và cộng sự [9] trong trường hợp bê tông không nứt (uncracked concrete) và trong trường hợp bê tông có vết nứt (cracked concrete).

3.3.1. Trường hợp mẫu có vết nứt

Kết quả biểu đồ điện tích tích lũy theo thời gian (Hình 11) cho thấy sự tương quan chặt chẽ với mô hình phát triển ăn mòn của François. Tất cả các thanh cốt thép quan sát đều nằm trong giai đoạn 4 của mô hình ăn mòn bốn pha, ngoại trừ mẫu TF10, trong đó giai đoạn lan truyền ăn mòn được ghi nhận bắt đầu sớm hơn, sau khoảng 10–20 chu kỳ tiếp xúc với môi trường chứa ion Cl^- . Sự xuất hiện của vết nứt bề mặt được quan sát rõ ràng từ chu kỳ thứ 64 đối với mẫu BTCT11,

trong khi đối với mẫu BTCT12, hiện tượng này chưa được ghi nhận.

Dựa trên đặc trưng hình thái của đường cong tích lũy điện tích có thể nhận thấy rằng sự hình thành vết nứt do ăn mòn không gây ra sự thay đổi đáng kể trong cơ chế hoặc tốc độ ăn mòn của cốt thép. Điều này cho thấy quá trình lan truyền ăn mòn chủ yếu diễn ra dọc theo bề mặt thép, thay vì bị chi phối bởi sự mở rộng của các vết nứt trong bê tông.

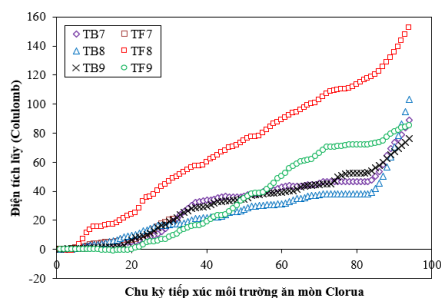


Hình 11. Điện tích tích lũy theo thời gian (trường hợp thanh thép lớp trên, nhóm A).

3.3.2. Trường hợp mẫu không có vết nứt

Dựa trên mô hình ăn mòn bốn pha được François và cộng sự đề xuất [9], các thanh cốt thép trong nghiên cứu này được xác định đang nằm trong giai đoạn lan truyền ăn mòn (propagation phase), tương ứng với khoảng chu kỳ thứ 20 của quá trình phun ẩm – khô luân phiên trong môi trường Clorua (Hình 12). Kết quả này nhất quán với xu hướng được quan sát trên các mẫu bê tông cốt thép có xuất hiện vết nứt bề mặt. Đáng chú ý, tốc độ ăn mòn trong giai đoạn 4, được biểu thị thông qua giá trị điện tích tích lũy (Coulomb/ngày), không cho thấy sự khác biệt đáng kể giữa các mẫu có và không có vết nứt nhân tạo.

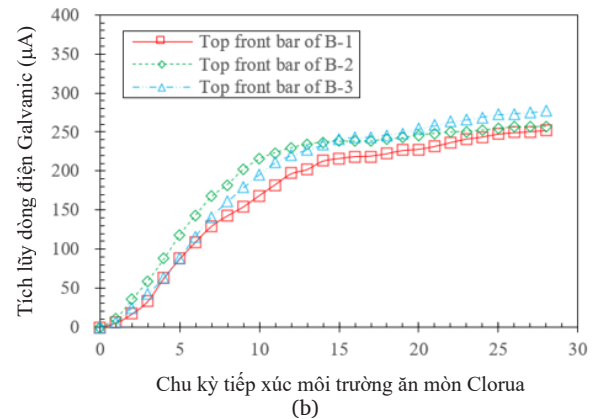
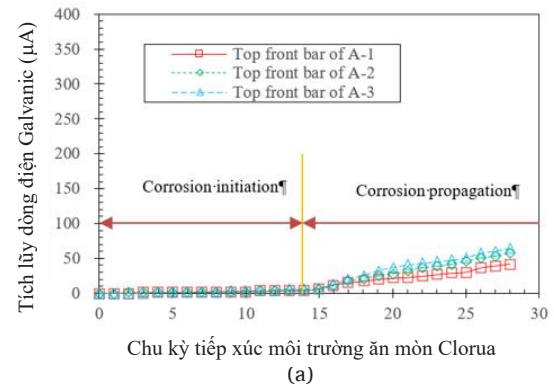
Điều này cho thấy sự tồn tại của vết nứt nhân tạo không tác động đáng kể đến động học của quá trình ăn mòn trong giai đoạn lan truyền dài hạn. Sự giảm tốc độ ăn mòn quan sát được ở các mẫu có vết nứt nhân tạo – sau giai đoạn đầu đặc trưng bởi tốc độ ăn mòn cao – có xu hướng tiệm cận với tốc độ ăn mòn của các mẫu không nứt. Quan sát này gợi ý rằng cơ chế ăn mòn có thể chuyển sang dạng lan truyền dọc theo thanh cốt thép, thay vì phát triển cục bộ tại vùng nứt, dưới ảnh hưởng của các khuyết tật vi mô tại vùng giao diện thép – bê tông.



Hình 12. Điện tích tích lũy theo thời gian (trường hợp thanh thép lớp trên, nhóm B).

3.4. So sánh ảnh hưởng của cốt sợi thép

Trong [6], Zhang sử dụng bê tông cốt thép (BTCT) không bổ sung cốt sợi thép để nghiên cứu quá trình ăn mòn trong môi trường chứa ion Cl⁻. Kết quả trong Hình 13 cho thấy giai đoạn lan truyền ăn mòn xuất hiện sau khoảng 15 chu kỳ tiếp xúc với môi trường Clorua.



Hình 13. So sánh điện tích tích lũy trong trường hợp mẫu không có vết nứt (a) và mẫu có vết nứt (b) [6].

So sánh với kết quả của Zhang [6], có thể nhận thấy rằng cả hai nghiên cứu đều không ghi nhận sự khác biệt đáng kể về quá trình phát triển ăn mòn cũng như trị số điện tích tích lũy giữa mẫu có vết nứt và mẫu không có vết nứt. Kết quả này là hoàn toàn hợp lý, bởi cả hai nghiên cứu đều sử dụng mẫu có kích thước và điều kiện môi trường thí nghiệm tương đồng, trong đó các yếu tố ảnh hưởng trực tiếp đến cơ chế hình thành và phát triển ăn mòn, như sự hiện diện của vết nứt và đặc tính vùng tiếp xúc thép – bê tông, đều được kiểm soát tương tự. Điểm khác biệt đáng chú ý nhất giữa hai nghiên cứu nằm ở loại vật liệu bê tông được sử dụng. Trong khi Zhang [6] sử dụng bê tông thường, nghiên cứu này sử dụng bê tông có bổ sung cốt sợi thép. Sự khác biệt này có thể ảnh hưởng đến khả năng kiểm soát vết nứt và phân bố ứng suất cục bộ trong giai đoạn đầu của quá trình ăn mòn. Ngoài ra, thời điểm xuất hiện vết nứt do ăn mòn trong thí nghiệm của Zhang được ghi nhận sau khoảng 17 chu kỳ, trong khi trong nghiên cứu này, hiện tượng tương tự chỉ xuất hiện sau khoảng 64 chu kỳ, cho thấy ảnh hưởng tích cực của cốt sợi thép trong việc làm chậm sự hình thành vết nứt do ăn mòn.

Như vậy, có thể thấy rằng việc bổ sung cốt sợi thép trong bê tông có tác dụng kéo dài thời gian hình thành vết nứt do ăn mòn so với bê tông thông thường. Hiệu quả này xuất phát từ sự gia tăng cường độ và khả năng chịu kéo của bê tông cốt sợi, giúp hạn chế ứng suất cục bộ và giảm tốc độ phát triển của vết nứt dưới tác động của sản phẩm ăn mòn. Tuy nhiên, kết quả theo dõi quá trình ăn mòn lại cho thấy không có sự khác biệt rõ rệt giữa các mẫu có và không có sợi thép về động học lan truyền ăn mòn. Điều này cho thấy rằng, mặc dù cốt sợi thép cải thiện được đặc tính cơ học và khả năng kiểm soát nứt, nhưng không làm thay đổi bản chất cơ chế lan truyền ăn mòn trong giai đoạn dài hạn. Nhân tố ảnh hưởng đáng kể hơn đến sự phát triển của ăn mòn có thể là hiệu ứng “top-bar”, vốn gây ra các khuyết tật vi mô tại vùng giao diện thép – bê tông, tạo điều kiện cho sự lan truyền của ion Cl^- và phản ứng điện hóa dọc theo thanh cốt thép, từ đó chi phối kết quả ăn mòn quan sát được.

4. Kết luận

Từ các kết quả thí nghiệm và phân tích, có thể rút ra một số kết luận chính như sau:

(1) Sự ăn mòn của cốt thép lớp trên xảy ra rõ rệt hơn so với lớp dưới, không phụ thuộc vào việc mẫu có hay không có vết nứt nhân tạo. Điều này được giải thích bởi hiệu ứng thanh top-bar, dẫn đến sự tồn tại của các lỗ rỗng và khuyết tật tại vùng giao diện thép – bê tông, tạo điều kiện thuận lợi cho quá trình xâm nhập ion Cl^- và phát triển ăn mòn.

(2) Vết nứt nhân tạo không ảnh hưởng đáng kể đến động học ăn mòn trong giai đoạn lan truyền dài hạn. Sau giai đoạn đầu có tốc độ ăn mòn cao, các mẫu có vết nứt nhân tạo cho thấy xu hướng giảm tốc độ ăn mòn, tiệm cận với các mẫu không có nứt, cho thấy cơ chế ăn mòn đã chuyển từ dạng cục bộ sang dạng lan truyền dọc theo thanh cốt thép.

(3) Sự bổ sung cốt sợi thép giúp kéo dài thời gian hình thành vết nứt ăn mòn so với bê tông thường. Tuy nhiên, ảnh hưởng này không làm thay đổi đáng kể tổng lượng điện tích tích lũy và mức độ ăn mòn của cốt thép.

(4) Yếu tố quyết định đến mức độ ăn mòn không chỉ là sự hiện diện của vết nứt, mà chủ yếu phụ thuộc vào chất lượng liên kết tại bề mặt tiếp xúc thép-bê tông và chiều dày lớp bảo vệ bê tông.

Tài liệu tham khảo

- [1]. U. M. Angst, O. B. Isgor, C. M. Hansson, A. Sagiés, and M. R. Geiker, "Beyond the Chloride threshold concept for predicting corrosion of steel in concrete," *Applied Physics Reviews*, vol. 9, p. 011321, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1063/5.0076320>
- [2]. J. Smith and Y. P. Virmani, "Materials and methods for corrosion control of reinforced and prestressed concrete structures in new construction," *United States. Federal Highway Administration* 2000.
- [3]. G. Glass and N. Buenfeld, "Chloride-induced corrosion of steel in concrete," *Progress in Structural Engineering and Materials*, vol. 2, pp. 448-458, 2000. DOI: <https://doi.org/10.1002/pse.54>
- [4]. U. M. Angst, M. R. Geiker, A. Michel, C. Gehlen, H. Wong, O. B. Isgor, et al., "The steel-concrete interface," *Materials and Structures*, vol. 50, pp. 1-24, 2017.
- [5]. T. U. Mohammed, N. Otsuki, H. Hamada, and T. Yamaji, "Chloride-induced corrosion of steel bars in concrete with presence of gap at steel-concrete interface," *Materials Journal*, vol. 99, pp. 149-156, 2002.
- [6]. W. Zhang, L. Yu, and R. Francois, "Influence of top-casting-induced defects on the corrosion of the compressive reinforcement of naturally corroded beams under sustained loading," *Construction and Building Materials*, vol. 229, p. 116912, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.116912>
- [7]. A. S. El-Dieb, "Mechanical, durability and microstructural characteristics of ultra-high-strength self-compacting concrete incorporating steel fibers," *Materials & Design*, vol. 30, pp. 4286-4292, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2009.04.024>
- [8]. G. Naidu Gopu and S. A. Joseph, "Corrosion Behavior of Fiber-Reinforced Concrete—A Review," *Fibers*, vol. 10, p. 38, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/fib10050038>
- [9]. R. François, S. Laurens, and F. Deby, *Corrosion and its consequences for reinforced concrete structures*: Elsevier, 2018.
- [10]. K. Tuutti, *Corrosion of steel in concrete: Cement-och betonginst.*, 1982. DOI: 10.14359/4471
- [11]. L. Yu, R. François, V. H. Dang, V. l'Hostis, and R. Gagné, "Development of chloride-induced corrosion in pre-cracked RC beams under sustained loading: Effect of load-induced cracks, concrete cover, and exposure conditions," *Cement and Concrete Research*, vol. 67, pp. 246-258, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2014.10.007>
- [12]. R. François and G. Arliguie, "Influence of service cracking on reinforcement steel corrosion," *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 10, pp. 14-20, 1998. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(1998\)10:1\(14\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(1998)10:1(14))
- [13]. W. Zhang, R. François, and L. Yu, "Influence of load-induced cracks coupled or not with top-casting-induced defects on the corrosion of the longitudinal tensile reinforcement of naturally corroded beams exposed to chloride environment under sustained loading," *Cement and Concrete Research*, vol. 129, p. 105972, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2020.105972>
- [14]. R. François and G. Arliguie, "Influence of service cracking on reinforcement steel corrosion," *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 10, pp. 14-20, 1998. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(1998\)10:1\(14\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(1998)10:1(14))
- [15]. L. Yu, R. François, V. H. Dang, V. l'Hostis, and R. Gagné, "Development of chloride-induced corrosion in pre-cracked RC beams under sustained loading: Effect of load-induced cracks, concrete cover, and exposure conditions," *Cement and Concrete Research*, vol. 67, pp. 246-258, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2014.10.007>