ĐÁNH GIÁ QUÁ TRÌNH ĂN MÒN CỐT THÉP TRONG BÊ TÔNG NHIỄM CLORUA: PHÂN TÍCH ẢNH HƯỞNG TỶ SỐ NƯỚC/CHẤT KẾT DÍNH VÀ TRO BAY THÔNG QUA CHỈ SỐ ĐIỆN THẾ ĂN MÒN

TRẦN VIỆT PHƯƠNG ĐÔNG

Khoa Kỹ thuật Xây dựng, Trường Đại học Công nghiệp Thành phố Hồ Chí Minh

Tác giả liên hệ: tranvietphuongdong@iuh.edu.vn

DOIs: https://www.doi.org/10.46242/jstiuh.v81i3.6013

Tóm tắt. Nghiên cứu này đánh giá định lượng ảnh hưởng của hàm lượng clorua, tỷ lệ nước trên chất kết dính (N/CKD), và thành phần chất kết dính đến sự thay đổi điện thế ăn mòn của cốt thép trong bê tông. Cơ chế ảnh hưởng quá trình khử thụ động và tiến triển ăn mòn sẽ được đánh giá thông qua đồng thời ba thông số vật liệu trong cùng mô hình thí nghiệm. Các mẫu bê tông được chuẩn bị với ba mức clorua (0 – 6 kg/m³), hai tỷ lệ N/CKD (0.4 và 0.6), và hai loại chất kết dính (OPC và OPC kết hợp 30% tro bay). Kết quả cho thấy hàm lượng clorua là yếu tố chi phối mạnh nhất, với điện thế giảm khoảng 0.30 – 0.45 V khi hàm lượng clorua tăng từ 0 lên 6 kg/m³, làm trạng thái của cốt thép dịch chuyển từ vùng thụ động sang vùng có xác suất ăn mòn cao. So với OPC, việc sử dụng tro bay trong bê tông cho phép duy trì điện thế cao hơn 0.40 – 0.12 V tại cùng điều kiện clorua và N/CKD, trong khi mẫu có N/CKD = 0.6 ghi nhận điện thế thấp hơn 0.20 – 0.50 V so với N/CKD = 0.4. Các xu hướng này cho thấy khả năng cải thiện cấu trúc vi mô và giảm hàm lượng clorua tự do của tro bay đã cải thiện khả năng chống ăn mòn cốt thép. Sự kết hợp giữa N/CKD thấp và hệ chất kết dính hỗn hợp giúp kéo dài trạng thái thụ động của thép trong môi trường xâm thực. Kết quả nghiên cứu hỗ trợ cho việc tối ưu hóa cấp phối bê tông trong môi trường chứa clorua. Tuy nhiên, cần bổ sung thêm các nghiên cứu về điện trở suất và mật độ dòng ăn mòn nhằm đưa ra các kết luận chính xác hơn về động học quá trình ăn mòn cốt thép.

Từ khóa. ăn mòn; bê tông cốt thép; điện thế ăn mòn; tro bay; clorua; độ bền.

1 TỔNG QUAN

Độ bền của kết cấu bê tông cốt thép phụ thuộc đáng kể vào khả năng duy trì trạng thái thụ động của cốt thép trong môi trường kiềm cao của bê tông. Trong điều kiện bình thường, dung dịch lỗ rỗng có pH ≥ 12 tạo thành một lớp màng oxit thụ động bền vững, đóng vai trò ngăn cản quá trình oxy hóa kim loại. Tuy nhiên, lớp màng này có thể bị suy giảm khi bê tông bị cacbonat hóa hoặc khi ion clorua (Cl^-) thâm nhập và tích tụ tại bề mặt thép vượt quá ngưỡng tới hạn. Trong các môi trường chịu tác động của nước biển hoặc khí hậu ven biển, ion Cl^- được xem là tác nhân xâm thực chủ đạo vì có khả năng gây phá hủy cục bộ lớp oxit, tạo thành các vùng anot – catot vi mô, đẩy nhanh quá trình hòa tan kim loại và dẫn đến nứt bê tông, bong lớp bảo vệ, giảm tiết diện chịu lực của cốt thép [1–4].

Ăn mòn do clorua mang tính cục bộ và phụ thuộc mạnh vào tính thấm của bê tông, mức độ ẩm, điện trở suất cũng như sự phân bố ion Cl^- trong lớp bê tông bảo vệ. Ion clorua được xác nhận là tác nhân chính gây phá hủy lớp màng thụ động trên bề mặt thép thông qua cạnh tranh với ion hydroxyl (OH^-), dẫn tới hòa tan màng oxit và khởi phát ăn mòn. Sự mất ổn định này liên quan chặt chẽ đến tỷ lệ mol Cl^-/OH^- trong dung dịch lỗ rỗng, với nhiều nghiên cứu ghi nhận ngưỡng khử thụ động khi tỷ lệ này vượt khoảng 0.6 [4–7]. Tỷ lệ nước/chất kết dính thấp được chứng minh là giúp cải thiện cấu trúc lỗ rỗng, giảm hệ số khuếch tán clorua và kéo dài thời gian khởi đầu ăn mòn [2, 8]. Đồng thời, các vật liệu khoáng hoạt tính như tro bay, xỉ lò cao, silica fume được biết là cải thiện cấu trúc vi mô và tăng khả năng liên kết clorua thông qua cơ chế pozzolanic và hấp phụ vật lý – hóa học [2, 7, 9, 10].

Mặc dù đã có nhiều nghiên cứu về cơ chế ăn mòn do clorua trong bê tông cốt thép, nhiều khía cạnh cốt lõi vẫn chưa được hiểu đầy đủ. Ngưỡng clorua tới hạn, thông số quan trọng trong dự đoán tuổi thọ kết cấu, nằm trong khoảng 0.04% – 8.34% theo khối lượng chất kết dính [4, 6, 11], dẫn tới khó khăn trong ứng dụng vào thực tiễn thiết kế. Ngưỡng clorua tới hạn phụ thuộc đáng kể vào điều kiện môi trường, với các nghiên cứu hiện trường thường cho giá trị thấp hơn đáng kể so với khi thực nghiệm trong điều kiện phòng thí nghiệm. Bản chất cục bộ và ngẫu nhiên của ăn mòn dạng điểm cùng với các khuyết tật cục bộ – như sự hình thành các lỗ rỗng khí ở bề mặt tiếp xúc giữa thép và bê tông – gây khó khăn trong việc dự đoán ngưỡng

© 2026 Trường Đại học Công nghiệp Thành phố Hồ Chí Minh

clorua tới hạn. Ảnh hưởng của các phụ gia khoáng hoạt tính, đặc biệt là tro bay, đối với ngưỡng clorua tới hạn cũng thiếu sự thống nhất. Một số nghiên cứu cho thấy tro bay làm giảm độ kiềm của dung dịch lỗ rỗng, từ đó giảm ngưỡng clorua tới hạn; trong khi các nghiên cứu khác lại chỉ ra rằng tro bay cải thiện cấu trúc mao quản và tăng khả năng liên kết clorua – hai yếu tố có xu hướng nâng ngưỡng clorua gây ăn mòn [4, 6]. Các tác động tương hỗ giữa các cơ chế vật lý và hóa học này dẫn đến việc khó đánh giá rõ ràng các ảnh hưởng của các vật liệu thành phần đến ngưỡng gây ăn mòn của clorua.

Bên cạnh các yếu tố chưa rõ ràng về cơ chế, phương pháp đánh giá ăn mòn cốt thép phổ biến dựa trên điện thế ăn mòn cũng tồn tại nhiều hạn chế. Điện thế ăn mòn chủ yếu phản ánh xác suất xảy ra ăn mòn chứ không biểu thị tốc độ ăn mòn. Ngoài ra, điện thế của cốt thép rất nhạy với độ ẩm, điện trở suất, nồng độ ion và hàm lượng oxy trong dung dịch lỗ rỗng. Các nghiên cứu cho thấy trong điều kiện bão hòa nước, điện thế của cốt thép sẽ trở nên rất âm, do sự giới hạn hàm lượng oxy làm chậm phản ứng catot [2, 5, 12]. Hiện tượng này có thể dẫn đến đánh giá sai mức độ nghiêm trọng nếu điện thế được diễn giải theo độ lớn của giá trị đo thay vì theo xu hướng điện hóa. Do đó, các diễn giải về điện thế ăn mòn hiện tại vẫn chưa đủ để mô tả chính xác cơ chế khử thụ động hoặc động học ăn mòn trong các hệ vật liệu khác nhau.

Ngoài ra, phần lớn các nghiên cứu khảo sát một yếu tố đơn lẻ, như tỷ lệ nước/chất kết dính, mức clorua hoặc phụ gia khoáng, thay vì đánh giá tác động tương tác giữa các yếu tố này. Bên cạnh đó, nhiều thí nghiệm dựa trên xâm nhập clorua từ các nguồn bên ngoài, dẫn đến phân bố clorua không đồng nhất và gây khó khăn khi diễn giải ngưỡng clorua tới hạn hoặc điện thế ăn mòn tại vùng có khả năng khởi phát ăn mòn. Trong khi đó, lượng clorua có sẵn và phân bố đều trong bê tông mô phỏng tình hướng thực tế như bê tông sử dụng nước biển, hay bê tông bị nhiễm clorua trong giai đoạn sản xuất. Tuy nhiên, các nghiên cứu đánh giá lượng clorua tồn tại sẵn trong vật liệu đầu vào đã hạn chế khả năng phân tích trực tiếp ảnh hưởng của các thông số vật liệu đến quá trình khử thụ động của cốt thép trong môi trường clorua phân bố đồng nhất.

Những kết quả hiện tại chưa đánh giá chính xác ứng xử điện hóa của cốt thép trong các hệ bê tông có sử dụng phụ gia khoáng hoạt tính và các tỷ lệ nước/chất kết dính khác nhau. Do đó, cần thiết phải có một nghiên cứu nhằm đánh giá tổng hợp tỷ lệ nước/chất kết dính, loại chất kết dính và hàm lượng clorua, đồng thời đánh giá định lượng sự thay đổi của điện thế theo thời gian. Theo đó, nghiên cứu này được thực hiện để đánh giá định lượng sự thay đổi của điện thế ăn mòn theo hàm lượng clorua trong các cấp phối bê tông khác nhau, và phân tích sự tương tác giữa tỷ lệ nước/chất kết dính và tro bay đối với trạng thái điện hóa của cốt thép trong bê tông nhiễm clorua. Bên cạnh đó, nghiên cứu hướng đến làm rõ chi phối quá trình khử thụ động và hoạt hóa điện hóa thông qua so sánh giữa hai hệ chất kết dính gồm xi măng Poóc-lăng (OPC) và hệ phối trộn OPC kết hợp tro bay. Cuối cùng, kết quả thực nghiệm sẽ góp phần giúp cải thiện khả năng dự báo tuổi thọ của kết cấu bê tông cốt thép trong môi trường nhiễm clorua, đáp ứng nhu cầu thiết kế và quản lý bền vững trong thực tiễn kỹ thuật.

2 QUI TRÌNH THỰC NGHIỆM

2.1 Vật liệu

Các vật liệu sử dụng trong nghiên cứu gồm xi măng Poóc-lăng thường (OPC) loại I [13], tro bay loại C [14], cốt liệu tự nhiên, nước máy và natri clorua (NaCl). Cát sông và đá dăm là cốt liệu tự nhiên đáp ứng ASTM C33 [15] về kích thước, độ sạch và thành phần hạt. NaCl được bổ sung nhằm tạo môi trường nhiễm ion clorua bên trong bê tông. Trong nghiên cứu này, các cấp phối bê tông được thiết kế theo hai loại chất kết dính – OPC và chất kết dính hỗn hợp, hai tỷ lệ nước trên chất kết dính (N/CKD), và ba mức hàm lượng clorua. Bảng 2 trình bày tóm tắt thông số của các cấp phối bê tông sử dụng trong nghiên cứu.

Tro bay được sử dụng với tỷ lệ thay thế 30% khối lượng xi măng trong chất kết dính hỗn hợp (OPC kết hợp tro bay). Việc sử dụng tro bay nhằm đảo bảo độ bền cho bê tông, cũng như cân bằng giữa cường độ, tính công tác và khả năng kháng xâm thực clorua. Hai tỷ lệ N/CKD là 0.4 và 0.6 được lựa chọn nhằm mô phỏng hai mức chất lượng bê tông phổ biến. Tỷ lệ N/CKD = 0.4 phù hợp với giá trị thường được khuyến nghị trong các tiêu chuẩn thiết kế bê tông chịu môi trường chứa ion clorua [2, 5], trong khi N/CKD = 0.6 đại diện cho bê tông có độ rỗng và độ thấm cao hơn, qua đó cho phép đánh giá giới hạn độ bền của kết cấu.

NaCl được hòa tan hoàn toàn trong nước trộn trước khi đưa vào máy trộn nhằm đảm bảo phân bố ion clorua đồng đều trong toàn bộ hỗn hợp. Ba mức hàm lượng clorua được khảo sát trong nghiên cứu là 0, 2

và 6 kg/m³, được lựa chọn để đại diện cho ba trạng thái môi trường điển hình: không nhiễm clo (mẫu đối chứng), nhiễm clo trung bình và nhiễm clo nặng [4, 16]. Các mức hàm lượng clorua này tạo ra sự khác biệt đủ lớn để quan sát rõ rệt ứng xử điện hóa mà không gây phá hủy quá nhanh cấu trúc bê tông.

2.2 Mẫu thực nghiệm

Mẫu thí nghiệm có dạng lập phương 100 × 100 × 100 mm. Một thanh thép đường kính 10 mm, dài 150 mm, được đặt theo phương ngang tại vị trí trung tâm mẫu. Phần thép nằm trong khối bê tông không được sơn phủ; hai đầu thanh thép được phủ sơn epoxy nhằm giới hạn vùng hoạt động điện hóa. Chiều dày lớp bê tông bảo vệ đến bề mặt thanh thép được cố định ở 60 mm. Việc sử dụng mẫu kích thước nhỏ nhằm rút ngắn chiều dài khuếch tán cần thiết để các yếu tố xâm thực đạt đến bề mặt thép trong thời gian ngắn, và tăng khả năng kiểm soát điều kiện ẩm – nhiệt trong buồng kín.

Sau khi đổ khuôn, mẫu được tháo khuôn sau 24 giờ và dưỡng hộ ẩm thêm 27 ngày theo điều kiện phòng thí nghiệm. Sau đó, mẫu được đưa vào buồng môi trường kín, duy trì độ ẩm hơn 90% và nhiệt độ khoảng 28°C. Điều kiện trong buồng kín được kiểm tra định kỳ bằng nhiệt ẩm kế. Các mẫu được giữ trong điều kiện ẩm cao liên tục, không áp dụng chu kỳ ướt – khô và không cấp dòng điện ngoài; do đó, quá trình ăn mòn diễn ra tự nhiên, được kích hoạt bởi clorua trộn trước và độ ẩm cao.

2.3 Phương pháp điện thế ăn mòn

Hoạt tính ăn mòn của cốt thép được đánh giá bằng phương pháp đo điện thế theo ASTM C876 [17], sử dụng điện cực tham chiếu đồng/đồng sunfat (Cu/$CuSO_4$ – CSE). Trước mỗi lần đo, bề mặt mẫu được làm sạch và làm ẩm nhẹ để bảo đảm tiếp xúc điện tốt giữa điện cực và bề mặt bê tông. Thanh thép được nối với cực còn lại của thiết bị đo bằng dây dẫn, bảo đảm tiếp xúc điện ổn định.

Điện thế ăn mòn của cốt thép được khảo sát tại hai thời điểm là 150 ngày và 365 ngày sau khi các nhóm mẫu bắt đầu được đặt vào môi trường thúc đẩy ăn mòn. Tại mỗi thời điểm khảo sát, các phép đo được thực hiện tập trung ở vùng phía trên thanh thép. Đối với mỗi tổ hợp cấp phối, có ít nhất 3 mẫu lặp. Giá trị điện thế được báo cáo là trung bình của các phép đo trên tất cả các mẫu và vị trí đo; độ phân tán được thể hiện bằng độ lệch chuẩn. Bảng 1 thể hiện tương quan giữa điện thế ăn mòn và xác suất ăn mòn được diễn giải theo các ngưỡng khuyến nghị của các nghiên cứu trước [17, 18], các ngưỡng này được sử dụng nhằm đánh giá xu hướng ăn mòn giữa các cấp phối.

Bảng 1. Tương quan giữa giá trị điện thế và xác suất xảy ra ăn mòn cốt thép [17, 18].

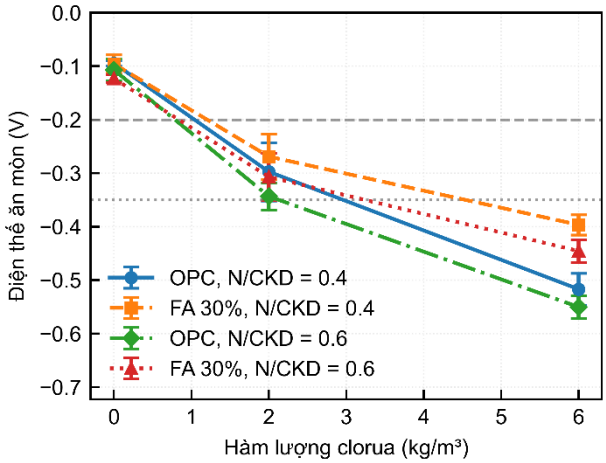
Điện thế (so với CSE)	Xác suất ăn mòn
> -0.20 V	< 10% (Khả năng ăn mòn thấp)
-0.20 V đến -0.35 V	Vùng không chắc chắn
< -0.35 V	> 90% (Khả năng ăn mòn cao)

3 KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

3.1 Ảnh hưởng của hàm lượng clo trong bê tông

Kết quả đo điện thế ăn mòn của mẫu bê tông có hàm lượng clorua khác nhau được trình bày trong Bảng 2. Các giá trị điện thế ăn mòn (E_{corr}) được trình bày là trung bình của 3 mẫu lặp, với độ lệch chuẩn thể hiện bằng thanh sai số trên các hình. Bảng 2 cho thấy điện thế ăn mòn giảm đáng kể khi hàm lượng clorua tăng từ 0 đến 6 kg/m³ trong tất cả tổ hợp chất kết dính và tỷ lệ N/CKD. Sau 150 ngày (Hình 1), các mẫu không nhiễm clorua có điện thế trong khoảng -0.09 đến -0.12 V, tương ứng vùng có khả năng ăn mòn thấp như thể hiện trong Bảng 1. Ngược lại, nhóm có hàm lượng clorua 6 kg/m³ dịch chuyển xuống mức -0.40 đến -0.55 V, tức giảm trung bình $\Delta E_{corr} \approx 0.32 – 0.45$ V. Mức chênh lệch này được duy trì đến 365 ngày, cho thấy tác động mạnh và liên tục theo thời gian của clorua đối với trạng thái điện hóa của cốt thép. Độ nhạy của điện thế ăn mòn đối với clorua có thể được mô tả qua độ dốc $\Delta E_{corr} / \Delta Cl^-$ dao động từ -0.55 đến -0.75 V trên mỗi đơn vị hàm lượng clorua, tùy loại chất kết dính. Bê tông chỉ sử dụng OPC có độ dốc

thấp hơn so với bê tông sử dụng tro bay kết hợp OPC (chất kết dính hỗn hợp), cho thấy OPC nhạy cảm hơn với sự gia tăng hàm lượng clorua. Sự suy giảm điện thế ăn mòn theo hàm lượng clorua phản ánh trực tiếp cơ chế điện hóa của quá trình ăn mòn cốt thép.



Hình 1. Quan hệ giữa điện thế ăn mòn và
hàm lượng clorua trong các cấp phối bê tông sau 150 ngày.

Sự suy giảm điện thế khi hàm lượng Cl^- tăng phản ánh quá trình suy giảm thụ động của màng oxit do sự tích tụ ion clorua tại bề mặt cốt thép. Ion clorua là tác nhân phá hủy màng thụ động khi tích tụ tại bề mặt thép và đạt đến giá trị ngưỡng – giá trị này được biểu thị ở dạng tỷ lệ mol Cl^-/OH^- trong dung dịch lỗ rỗng bê tông. Tỷ lệ Cl^-/OH^- biến thiên trong khoảng từ 0.3 đến 40, phụ thuộc vào nồng độ ion Cl^-, loại xi măng, hàm lượng phụ gia khoáng và điều kiện môi trường [2, 4, 5]. Các nghiên cứu trước chỉ ra rằng lớp thụ động mất ổn định khi tỷ lệ này vượt quá 0.6 [4]. Khi lợp thụ động bị phá vỡ, điện thế ăn mòn giảm nahnh do hình thành các anot cục bộ và tăng tốc độ hòa tan kim loại.

Ngoài ra, ion clorua có thể thay thế ion hydroxyl trong lớp oxit, thúc đẩy hình thành các phức clorua-sắt hòa tan như $FeCl_2$ và $FeCl_3$ [1, 2, 5]. Các phức chất này không ổn định và dễ hòa tan, ngăn cản quá trình tái thụ động, tạo điều kiện cho ăn mòn cốt thép phát triển. Kết quả của nghiên cứu này phù hợp với cơ chế này: khi hàm lượng clorua đạt 6 kg/m³, tất cả các cấp phối đều có điện thế thấp hơn -0.40 V ở hai mốc thời gian khảo sát, thể hiện rõ sự phá hủy lớp oxit và sự hoạt hóa quá trình ăn mòn. Xu hướng quan sát được trong nghiên cứu này tương đồng với nhiều kết quả thực nghiệm trước đây [2–4, 16], trong đó hàm lượng clorua được xác nhận là một trong những yếu tố chi phối mạnh nhất đến sự thay đổi của điện thế ăn mòn và sự khởi phát ăn mòn thép [4, 11]. Sự gia tăng Cl^- không chỉ thúc đẩy phá hủy màng thụ động mà còn làm giảm điện trở suất và gia tăng mức phân cực giữa các vi điện cực, từ đó tăng cường tốc độ ăn mòn.

Bảng 2. Tổng hợp giá trị điện thế của các cấp phối bê tông.

Chất kết dính	**N/CKD**	**Cl^- (kg/m³)**	**Điện thế sau 150 ngày (V)**	**Điện thế sau 365 ngày (V)**	**Xác xuất ăn mòn theo ASTM C 876** [17]
OPC	0.4	0	-0.09	-0.05	<10% (Thụ động)
OPC	0.4	2	-0.3	-0.27	50% (Không chắc)
OPC	0.4	6	-0.52	-0.53	>90% (Ăn mòn)
Tro bay+OPC	0.4	0	-0.1	-0.03	Thụ động
Tro bay+OPC	0.4	2	-0.27	-0.24	Không chắc
Tro bay+OPC	0.4	6	-0.4	-0.43	Ăn mòn

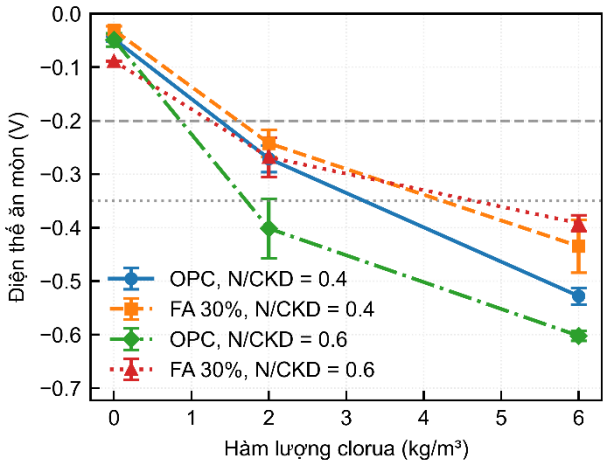
OPC	0.6	0	-0.11	-0.05	Thụ động
OPC	0.6	2	-0.34	-0.4	Ăn mòn
OPC	0.6	6	-0.55	-0.6	Ăn mòn
Tro bay+OPC	0.6	0	-0.12	-0.09	Thụ động
Tro bay+OPC	0.6	2	-0.31	-0.27	Không chắc
Tro bay+OPC	0.6	6	-0.45	-0.39	Ăn mòn

3.2 Ảnh hưởng của tỷ lệ nước trên chất kết dính (N/CKD)

Tỷ lệ N/CKD cho thấy ảnh hưởng rõ rệt đến giá trị điện thế ăn mòn trong toàn bộ các tổ hợp chất kết dính và hàm lượng clorua. Ở mọi điều kiện, mẫu có N/CKD = 0.6 luôn cho điện thế thấp hơn so với mẫu có N/CKD = 0.4, với mức chênh lệch trung bình 20 – 50 mV tại 150 ngày và 25 – 70 mV tại 365 ngày, như được thể hiện lần lượt trong Hình 1 và Hình 2. Điều này phản ánh sự khác biệt đáng kể về vi cấu trúc và khả năng vận chuyển ion do sự thay đổi lượng nước trộn. Tại nồng độ clorua cao (Cl^- = 6 kg/m³), xu hướng này được thể hiện rõ nhất. Sau 365 ngày, bê tông OPC với N/CKD = 0.6 có E_{corr} = -0.60 V, thấp hơn 70 mV so với mẫu OPC N/CKD = 0.4 (-0.53 V). Độ nhạy gia tăng đối với N/CKD trong điều kiện nhiễm clorua cao cho thấy ảnh hưởng đáng kể của đặc tính vận chuyển clorua và oxy trong vùng bê tông có độ rỗng lớn hơn.

Sự chênh lệch này thể hiện dấu hiệu điện hóa rõ ràng về ảnh hưởng của cấu trúc lỗ rỗng đến giai đoạn khởi phát ăn mòn [2, 3, 5, 6, 19]. Khi tăng tỷ lệ N/CKD, độ rỗng mao quản và mức độ kết nối giữa các lỗ rỗng đều tăng, làm tăng hệ số thấm và tạo điều kiện thuận lợi cho sự xâm nhập của ion clorua và oxy [6, 20]. Chính việc tăng độ rỗng của lớp bê tông bảo vệ đã tăng tốc độ thâm nhập của ion clorua vào vùng cốt thép, làm phát sinh quá trình ăn mòn cốt thép. Điều này phù hợp với dữ liệu thực nghiệm, sự chênh lệch điện thế giữa N/CKD = 0.4 và 0.6 lớn nhất tại các hàm lượng clorua 2 và 6 kg/m³, phản ánh rõ tác động của khả năng thâm nhập của ion Cl^- vào vùng cốt thép.

Tỷ lệ N/CKD không chỉ ảnh hưởng đến giai đoạn khởi đầu ăn mòn mà còn ảnh hưởng đến mức độ phát triển của sau khi cốt thép mất tính thụ động. Tỷ lệ N/CKD cao làm giảm điện trở suất của bê tông do hàm lượng nước cao trong dung dịch lỗ rỗng và nồng độ ion hòa tan tăng. Điện trở suất thấp dẫn đến mật độ dòng ăn mòn lớn khi hình thành các vùng anode và cathode, từ đó đẩy nhanh tốc độ hòa tan kim loại. Điều này lý giải vì sao ở mức Cl^- cao (6 kg/m³), mẫu N/CKD = 0.6 tại 365 ngày có điện thế thấp hơn khoảng 0.07 V so với mẫu N/CKD = 0.4, phản ánh sự gia tăng hoạt động điện hóa trong giai đoạn phát triển ăn mòn.



Hình 2. Quan hệ giữa điện thế ăn mòn và
hàm lượng clorua trong các cấp phối bê tông sau 365 ngày.

3.3 Ảnh hưởng của thành phần chất kết dính

Ảnh hưởng của tro bay được thể hiện rõ thông qua sự khác biệt ổn định giữa hai hệ chất kết dính, như thể hiện trong Hình 1 và Hình 2. Trong toàn bộ các điều kiện khảo sát, bê tông sử dụng tro bay kết hợp OPC luôn duy trì điện thế thấp hơn bê tông OPC, với mức chênh lệch trung bình 0.40 – 0.12 V, phụ thuộc hàm lượng clorua và thời điểm khảo sát. Cụ thể, tại 150 ngày với Cl^- = 6 kg/m³, E_{corr} của bê tông OPC đạt -0.52 V, trong khi bê tông tro bay kết hợp OPC đạt -0.40 V (chênh lệch 0.12 V). Tại 365 ngày, với N/CKD = 0.6 và Cl^- = 6 kg/m³, E_{corr} của OPC giảm xuống -0.60 V, trong khi bê tông tro bay kết hợp OPC vẫn duy trì ở mức -0.39 V. Khoảng cách giữa hai hệ tại nồng độ ion xâm thực cao cho thấy việc ứng dụng tro bay có khả năng duy trì trạng thái thụ động ổn định hơn trong môi trường clorua cao.

Xu hướng này phù hợp với các nghiên cứu trước, trong đó việc thay thế một phần xi măng bằng các phụ gia khoáng như tro bay hoặc xỉ lò cao làm giảm tốc độ ăn mòn và kéo dài thời gian duy trì trạng thái thụ động của thép [19–23]. Sự chênh lệch điện thế trên là do phản ứng pozzolanic tạo thêm các sản phẩm C-S-H và C-A-S-H thứ cấp, từ đó cải thiện cấu trúc vi mô của bê tông [2, 10, 19]. Các sản phẩm này lấp đầy lỗ rỗng mao quản và vùng chuyển tiếp, làm giảm sự kết nối mao quản và hệ số khuếch tán clorua, từ đó kéo dài giai đoạn khởi đầu ăn mòn. Nhờ cấu trúc vi mô đặc chắc hơn nên bê tông tro bay có điện trở suất cao hơn so với bê tông OPC. Điện trở suất cao làm giảm mật độ dòng ăn mòn, đặc biệt là giai đoạn sau khi cốt thép mất tính thụ động. Hơn nữa, việc sử dụng tro bay trong bê tông có thể làm tăng khả năng liên kết clorua. Nhiều nghiên cứu trước đã chỉ ra bê tông chưa tro bay có hàm lượng clorua tự do thấp hơn OPC do các ion Cl^- bị hấp thụ vật lý hoặc liên kết hóa học với aluminates và sản phẩm hydrat hóa [6, 7, 10, 19]. Việc giảm Cl^- tự do làm tăng hiệu quả bảo vệ lớp thụ động trên bề mặt thép và làm tăng ngưỡng clorua gây phát sinh ăn mòn.

4 KẾT LUẬN

Nghiên cứu đã đánh giá ảnh hưởng của hàm lượng clorua, tỷ lệ nước/chất kết dính và thành phần chất kết dính đến giá trị điện thế ăn mòn của cốt thép trong bê tông. Mặc dù điện thế ăn mòn không phản ánh trực tiếp tốc độ ăn mòn theo ASTM C876, các kết quả cho thấy sự dịch chuyển có hệ thống về mặt điện hóa, qua đó cung cấp chỉ dấu quan trọng về trạng thái thụ động và mức độ dễ hoạt hóa ăn mòn của cốt thép trong môi trường chứa clorua. Kết quả khảo sát sự thay đổi điện thế ăn mòn chỉ ra sự thay đổi ứng xử điện hóa của cốt thép, qua đó cho thấy trạng thái thụ động và sự nhạy cảm với ăn mòn của cốt thép khi làm việc trong môi trường chứa clorua.

Trước hết, điện thế giảm trung bình 0.18 – 0.25 V khi hàm lượng clorua tăng từ 0 lên 6 kg/m³ trong các điều kiện khảo sát. Tại mức hàm lượng clorua 6 kg/m³, các nhóm mẫu chỉ sử dụng OPC cho điện thế từ -0.52 đến -0.60 V, tương ứng với khả năng ăn mòn cao. Trong khi đó, các nhóm mẫu có kết hợp thêm tro bay duy trì giá trị cao hơn 0.70 – 0.12 V, khả năng xảy ra ăn mòn dịch chuyển về vùng không chắc chắn xảy ra ăn mòn. Điều này cho thấy bê tông tro bay kết hợp OPC có khả năng giữ trạng thái thụ động tốt hơn trong môi trường xâm thực mạnh. Thứ hai, ảnh hưởng của N/CKD thể hiện rõ rệt khi mẫu có N/CKD = 0.6 cho điện thế thấp hơn 0.20 – 0.50 V so với mẫu N/CKD = 0.4 tại mọi mức clorua. Điều này nhấn mạnh vai trò của N/CKD thấp trong việc hạn chế khả năng hoạt hóa ăn mòn, phù hợp với các cơ chế về vận chuyển ion và điện trở suất được ghi nhận trong các nghiên cứu trước.

Nghiên cứu cũng tồn tại một số hạn chế, bao gồm việc không đo điện trở suất, mật độ dòng ăn mòn, hàm lượng clorua tự do/liên kết và các chỉ tiêu vi cấu trúc. Do vậy, các cơ chế được thảo luận mang tính suy luận từ xu hướng điện thế ăn mòn. Trong các nghiên cứu tiếp theo, việc kết hợp đo điện trở suất của bê tông và mật độ dòng ăn mòn cùng phân tích dạng clorua trong bê tông sẽ giúp liên hệ điện thế ăn mòn với động học ăn mòn, qua đó nâng cao độ tin cậy trong dự báo tuổi thọ công trình bê tông cốt thép trong môi trường nhiễm clorua.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] P. R. Roberge, *Handbook of corrosion engineering*. New York: McGraw-Hill, 2000.

[2] L. Bertolini, B. Elsener, P. Pedeferri, and R. Polder, *Corrosion of Steel in Concrete: Prevention, Diagnosis, Repair*. Weinheim: John Wiley & Sons, 2004.

[3] M. Raupach, “Patch repairs on reinforced concrete structures - Model investigation on the required size and practical consequences,” *Cem. Concr. Compos.*, vol. 28, pp. 679–684, 2006.
[4] K. Y. Ann and H.-W. Song, “Chloride threshold level for corrosion of steel in concrete,” *Corros. Sci.*, vol. 49, pp. 4113–4133, 2007.
[5] P. K. Mehta and P. J. M. Monteiro, *Concrete: microstructure, properties, and materials*, 3rd ed. New York: McGraw-Hill, 2006.
[6] G. R. Meira, C. Andrade, E. O. Vilar, and K. D. Nery, “Analysis of chloride threshold from laboratory and field experiments in marine atmosphere zone,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 55, pp. 289–298, Mar. 2014, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2014.01.052.
[7] T. Sumranwanich and S. Tangtermsirikul, “A model for predicting time-dependent chloride binding capacity of cement-fly ash cementitious system,” *Mater. Struct.*, vol. 37, pp. 387–396, 2004.
[8] B. J. Addis and M. G. Alexander, “Cement-saturation and its effects on the compressive strength and stiffness of concrete,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 24, no. 5, pp. 975–986, Jan. 1994, doi: 10.1016/0008-8846(94)90018-3.
[9] K. E. Hassan, J. G. Cabrera, and R. S. Maliehe, “The effect of mineral admixtures on the properties of high-performance concrete,” *Cem. Concr. Compos.*, vol. 22, no. 4, pp. 267–271, Jan. 2000, doi: 10.1016/S0958-9465(00)00031-7.
[10] M. Torres-Luque, E. Bastidas-Arteaga, F. Schoefs, M. Sanchez-Silva, and J. F. Osma, “Non-destructive methods for measuring chloride ingress into concrete: State-of-the-art and future challenges,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 68, pp. 68–81, 2014.
[11] S. Mundra, M. Criado, S. A. Bernal, and J. L. Provis, “Chloride-induced corrosion of steel rebars in simulated pore solutions of alkali-activated concretes,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 100, pp. 385–397, Oct. 2017, doi: 10.1016/j.cemconres.2017.08.006.
[12] V. M. Malhotra and N. J. Carino, *Handbook on Nondestructive Testing of Concrete*, Second. Florida: CRC Press LLC, 2004.
[13] ASTM International, “Standard Test Methods for Chemical Analysis of Hydraulic Cement,” ASTM International, West Conshohocken, PA, ASTM C 114, 2007.
[14] ASTM International, “Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete.” ASTM International, West Conshohocken, PA, 2019.
[15] ASTM International, “Standard Specification for Concrete Aggregates.” ASTM International, West Conshohocken, PA, 2010.
[16] P. M. Chess, *Cathodic protection of steel in concrete*. London UK: E & FN Spon, 1998.
[17] ASTM International, “Standard Test Method for Corrosion Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete.” ASTM International, West Conshohocken, PA, 2015.
[18] J. P. Broomfield, *Corrosion of Steel in Concrete: Understanding, Investigation and Repair*. London, UK: E & FN Spon, 1997.
[19] U. M. Angst, B. Elsener, C. K. Larsen, and Ø. Vennesland, “Chloride induced reinforcement corrosion: Electrochemical monitoring of initiation stage and chloride threshold values,” *Corros. Sci.*, vol. 53, no. 4, pp. 1451–1464, Apr. 2011, doi: 10.1016/j.corsci.2011.01.025.
[20] M. Otieno, H.-D. Beushausen, and M. Alexander, “Chloride-induced corrosion of steel in cracked cocnrete - Part I: Experimental studies under accelerated and natural marine enivironments,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 79, pp. 373–385, 2016.
[21] D. V. P. Tran, P. Sancharoen, P. Klomjit, S. Tangtermsirikul, and T. H. Y. Nguyen, “Prediction equations for corrosion rate of reinforcing steel in cement-fly ash concrete,” *J. Struct. Integr. Maint.*, vol. 8, no. 2, pp. 91–99, Apr. 2023, doi: 10.1080/24705314.2023.2165749.
[22] V. M. Tran, L. T. Nguyen, and T. H. Y. Nguyen, “Enhancing the effectiveness of steam curing for cement paste incorporating fly ash based on long-term compressive strength and reaction degree of fly ash,” *Case Stud. Constr. Mater.*, vol. 16, p. e01146, June 2022, doi: 10.1016/j.cscm.2022.e01146.
[23] T. H. Y. Nguyen, V. M. Tran, W. Pansuk, N. T. Cao, and V. H. L. Bui, “Electrochemical chloride extraction on reinforced concrete contaminated external chloride: Efficiencies of intermittent applications and impacts on hydration products,” *Cem. Concr. Compos.*, vol. 121, p. 104076, Aug. 2021, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2021.104076.

ASSESSMENT OF STEEL CORROSION IN CHLORIDE-CONTAMINATED CONCRETE: INFLUENCE OF WATER–BINDER RATIO AND FLY ASH USING CORROSION POTENTIAL

TRAN VIET PHUONG DONG

Faculty of Civil Engineering, Industrial University of Ho Chi Minh City, Ho Chi Minh City, Viet Nam

Corresponding Author: tranvietphuongdong@iuh.edu.vn

Abstract. This study quantitatively evaluates the effects of chloride content, water/binder ratio (w/b), and binder composition on the corrosion potential of reinforcing steel in concrete. The depassivation and corrosion activation mechanisms were assessed by simultaneously examining these three material parameters. Concrete mixtures were prepared with three chloride levels (0 – 6 kg/m³), two water/binder ratios (0.4 and 0.6), and two types of binder (OPC and OPC blended with 30% fly ash). Results confirm that chloride content is the dominant factor affecting corrosion potential, with a reduction of approximately 0.30 – 0.45 V as chloride increases from 0 to 6 kg/m³, shifting the steel condition from the passive region to a high probability of corrosion. Compared with OPC, mixtures incorporating fly ash exhibited corrosion potential values 0.40 – 0.12 V higher under identical chloride and w/b conditions, while mixtures with w/b = 0.6 consistently recorded potential values 0.20 – 0.50 V lower than those with w/b = 0.4. The experimental results highlight the contribution of fly ash in reducing concrete porosity and lowering free chloride content, thereby improving corrosion resistance. The combination of a low w/b ratio and a blended binder system was shown to extend the steel passive state in chloride-contaminated concrete. The findings provide a useful basis for optimizing concrete mixture designs for durability in chloride-exposed conditions. Nevertheless, further investigations incorporating resistivity and corrosion current density measurements are required to draw more definitive conclusions on corrosion kinetics.

Keywords. steel corrosion; reinforced concrete; corrosion potential; fly ash; chloride; durability.

Ngày gửi bài: 07/12/2025
Ngày chấp nhận đăng:02/02/2026