

Phân tích ảnh hưởng ăn mòn và giải pháp bảo vệ an toàn cho các tấm phù điêu đồng tại Việt Nam

Analysis of the Impact of Corrosion and Safety Protection Solutions for Copper Relief Panels in Vietnam

Nguyễn Thị Nam Hải^{a,c}, Nguyễn Đăng Nam^{a,c}, Phạm Phú Anh Huy^{b,c*}
Nguyen Thi Nam Hai^{a,c}, Nguyen Dang Nam^{a,c}, Pham Phu Anh Huy^{b,c*}

^aPhòng thí nghiệm Vật liệu và Linh kiện Tương lai, Viện Khoa học Cơ bản và Ứng dụng, Đại học Duy Tân, Thành phố Hồ Chí Minh, Việt Nam

^aFuture Materials and Devices Laboratory – FM&D Lab., Institute of Fundamental and Applied Sciences, Duy Tan University, Ho Chi Minh city, 700000, Vietnam

^bViện Nghiên cứu và Phát triển Công nghệ cao, Đại học Duy Tân, Đà Nẵng, Việt Nam

^bInstitute of Research and Development, Duy Tan University, Danang, 550000, Vietnam

^cKhoa Xây dựng, Trường Công nghệ và Kỹ thuật, Đại học Duy Tân, Đà Nẵng, Việt Nam

^cFaculty of Civil Engineering, School of Engineering and Technology, Duy Tan University, Danang, 550000, Vietnam

(Ngày nhận bài: 06/06/2025, ngày phản biện xong: 16/12/2025, ngày chấp nhận đăng: 17/01/2026)

Tóm tắt

Bài báo trình bày nghiên cứu về sự suy giảm cơ học dài hạn của các tấm phù điêu đồng được liên kết vào tường bê tông cốt thép bằng chốt liên kết được sử dụng phổ biến tại Việt Nam, với trọng tâm là ảnh hưởng của ăn mòn và vai trò bảo vệ của praseodymium chloride (PrCl_3). Dữ liệu điện hóa phục vụ mô hình hóa tốc độ ăn mòn được thu thập từ công bố trước đây của cùng nhóm tác giả, trong đó PrCl_3 cho thấy khả năng giảm đáng kể tốc độ ăn mòn của đồng trong dung dịch NaCl 0,6M. Các tốc độ ăn mòn này được tích hợp vào mô hình phân tử hữu hạn 3D để mô phỏng sự phát triển ứng suất, hình thành vết nứt và suy giảm tuổi thọ mỏi trong giai đoạn khai thác 50 năm. Kết quả mô phỏng cho thấy trong trường hợp không sử dụng PrCl_3 , sự giảm tiết diện kết hợp với ứng suất tập trung tại vùng tiếp giáp giữa chốt và tấm phù điêu làm vết nứt phát triển nhanh, dẫn đến hư hỏng nghiêm trọng. Ngược lại, PrCl_3 giúp làm chậm quá trình suy giảm tiết diện, giảm mức ứng suất, hạn chế sự phát triển vết nứt và kéo dài đáng kể tuổi thọ dự báo. Phân tích tham số cũng chỉ ra rằng việc tăng số lượng hoặc đường kính chốt inox góp phần phân bố tải trọng đồng đều hơn và nâng cao độ an toàn của hệ kết cấu. Những kết quả này nhấn mạnh tầm quan trọng của việc kết hợp biện pháp bảo vệ hóa học với thiết kế kết cấu tối ưu nhằm bảo tồn lâu dài các tác phẩm phù điêu đồng ngoài trời.

Từ khóa: Ăn mòn đồng, tính toán ứng suất, khí hậu nhiệt đới, tấm phù điêu đồng, an toàn kết cấu, bảo vệ kim loại

Abstract

This paper investigates the long-term mechanical degradation of copper relief sculptures anchored to reinforced concrete walls using stainless-steel pins, a configuration widely used in Vietnam for outdoor architectural artworks. Special emphasis is placed on the influence of corrosion and the protective effectiveness of praseodymium chloride (PrCl_3). Electrochemical data employed for corrosion-rate modeling were obtained from the authors' previous publication, in which PrCl_3 was shown to significantly reduce the corrosion rate of copper in a 0.6M NaCl solution. These corrosion

*Tác giả liên hệ: Phạm Phú Anh Huy
Email: phamphanhuy@duytan.edu.vn

rates were incorporated into a three-dimensional finite element model to simulate stress evolution, crack initiation, and fatigue life reduction over a 50-year service period. The results reveal that, in the absence of PrCl_3 , cross-sectional loss combined with stress concentration at the pin–panel interface accelerates crack propagation and leads to severe structural deterioration of the copper relief sculpture. In contrast, the presence of PrCl_3 significantly delays section loss, reduces stress levels, suppresses crack growth, and markedly extends the predicted service life. Parametric studies also show that increasing the number or diameter of stainless-steel pins enhances load distribution efficiency and improves the structural safety of the system. These findings highlight the importance of integrating chemical corrosion protection with optimized structural design to ensure the long-term preservation of outdoor copper relief sculptures in aggressive environments.

Keywords: Copper corrosion, stress calculations, tropical climate, copper relief panels, structural safety, metal protection

1. Giới thiệu chung

Kim loại đồng (Cu) từ lâu đã được công nhận là vật liệu quan trọng trong nghệ thuật và kiến trúc nhờ các đặc tính cơ học ưu việt, gồm độ bền cao, tính dẻo tốt và khả năng tạo hình tinh xảo. Những đặc tính này cho phép đồng được ứng dụng rộng rãi trong chế tác các chi tiết mỹ thuật có độ chính xác cao và tính biểu cảm mạnh. Tại Việt Nam, đồng là vật liệu truyền thống trong chế tác các tấm phù điêu – những tác phẩm không chỉ có chức năng trang trí mà còn mang giá trị văn hóa, lịch sử và tâm linh sâu sắc. Các phù điêu đồng được lắp đặt tại các công trình quan trọng như đền, chùa, tượng đài tưởng niệm, cổng thành, lăng mộ, hay các di tích thuộc danh mục di sản văn hóa thế giới như Cố đô Huế và Hoàng thành Thăng Long, cũng như trong các không gian công cộng hiện đại [1–3].

Tuy nhiên, song song với giá trị thẩm mỹ và văn hóa, đồng cũng là vật liệu dễ bị ăn mòn khi tiếp xúc với môi trường tự nhiên. Khí hậu nhiệt đới gió mùa đặc trưng tại Việt Nam (với độ ẩm cao, nhiệt độ thay đổi lớn và sự hiện diện thường xuyên của các tác nhân ăn mòn như CO_2 , SO_2 , Cl^- và hơi muối biển) tạo điều kiện thuận lợi cho sự hình thành các phản ứng điện hóa gây phá hủy bề mặt đồng. Bề mặt đồng thường phát triển lớp gỉ đồng (patina), vốn có thể cung cấp sự bảo vệ tạm thời. Tuy vậy, dưới tác động kéo dài của môi trường, lớp patina trở nên không ổn định và dễ bong tróc, làm lộ bề mặt kim loại và thúc đẩy ăn mòn sâu hơn [4]. Tình trạng này gây mất giá trị thẩm mỹ, suy giảm độ bền cơ học và tiềm ẩn nguy cơ mất an toàn đối với các công trình đặt ngoài trời. Thực tế cho thấy nhiều phù điêu đồng

tại các di tích Việt Nam vẫn chưa được bảo quản đúng mức, dẫn đến xuống cấp nhanh và khó phục hồi [3,4].

Trong những năm gần đây, nhiều nghiên cứu đã tập trung phân tích cơ chế ăn mòn của đồng trong các điều kiện môi trường khác nhau và đề xuất các phương pháp kiểm soát hiện tượng này. Các công trình của Petrović Mihajlović và cộng sự [5] tổng hợp các hợp chất hữu cơ ức chế ăn mòn như azole, purin, axit amin và các chiết xuất thực vật. El-Asri và cộng sự [6] chứng minh hiệu quả ức chế ăn mòn thông qua cơ chế hấp phụ vật lý–hóa học. Benachour và cộng sự [7] làm rõ vai trò của hợp chất DMPTS trong việc hình thành lớp bảo vệ ổn định trên bề mặt đồng trong môi trường axit. Ngoài chất ức chế, nhiều nghiên cứu đã khảo sát ăn mòn trong các môi trường đặc thù như nước không chứa oxy [5,7], môi trường lưu trữ chất thải hạt nhân [9], hay môi trường vi điện tử yêu cầu kiểm soát nghiêm ngặt [10]. Các kỹ thuật hiện đại như mô hình hóa toán học [8], lý thuyết DFT [6] và các phương pháp phân tích bề mặt tiên tiến [9] đã mở rộng hiểu biết về cơ chế ăn mòn ở cấp độ vi mô và nguyên tử. Song song với đó, các nghiên cứu bảo tồn di sản như của Talat [10], Fateh [11] và các cộng sự đã nhấn mạnh vai trò của kiểm soát môi trường và áp dụng vật liệu bảo vệ phù hợp đối với hiện vật kim loại quý.

Mặc dù các nghiên cứu trên cung cấp nền tảng quan trọng về cơ chế ăn mòn và biện pháp bảo vệ đồng, các mô hình mô phỏng số bằng phương pháp phần tử hữu hạn (FEM) cho quá trình ăn mòn, đặc biệt trong điều kiện khí hậu nhiệt đới gió mùa như Việt Nam, vẫn chưa được khai thác

đầy đủ. Một số mô hình tiên tiến đã được phát triển, chẳng hạn mô hình biên tự do kép cho quá trình oxy hóa đồng của Clarelli và cộng sự [12], mô hình dự đoán ăn mòn đồng trong môi trường chứa Cl_2 của Zhang và cộng sự [13], hay mô hình FEM–CZM mô phỏng nứt do ăn mòn ứng suất trong dung dịch ammonia của Wang và cộng sự [14]. Gần đây hơn, Wang-Xinyue và cộng sự [15] sử dụng FEM để mô phỏng ăn mòn galvanic trong hệ Cu–Ag, cho thấy FEM có khả năng dự đoán tốt giai đoạn đầu của ăn mòn điện hóa.

Tuy nhiên, phần lớn các mô hình ăn mòn và suy giảm cơ học hiện có chủ yếu được phát triển cho các điều kiện công nghiệp, phòng thí nghiệm hoặc các môi trường đặc thù. Đặc biệt, số lượng nghiên cứu ứng dụng mô phỏng số để đánh giá định lượng quá trình ăn mòn, sự tiến triển hư hỏng và tác động của ăn mòn lên ứng suất – biến dạng – độ bền của các tấm phủ điều đồng kích thước lớn còn rất hạn chế. Điều này tạo ra một khoảng trống nghiên cứu quan trọng liên quan đến việc thiếu các mô hình FEM có khả năng mô phỏng tích hợp tương tác giữa ăn mòn – cơ học – môi trường trong bối cảnh thực tế tại Việt Nam. Từ khoảng trống đó, nghiên cứu này được thực hiện với ba mục tiêu chính: (1) phân tích cơ chế và mức độ ăn mòn của đồng trong điều kiện khí hậu nhiệt đới gió mùa đặc trưng của Việt Nam; (2) đánh giá ảnh hưởng của ăn mòn đến đặc tính cơ học, tuổi thọ và độ an toàn của hệ phủ điều đồng và chốt liên kết; và (3) phát triển mô hình mô phỏng số 3D dựa trên FEM nhằm dự đoán sự suy giảm tiết diện, ứng suất tập trung và hư hỏng theo thời gian, từ đó đề xuất các giải pháp bảo vệ hiệu quả và bền vững cho các công trình kỹ thuật bằng đồng ngoài trời. Nghiên cứu góp phần bổ sung một hướng tiếp cận liên ngành, kết hợp giữa vật liệu, cơ học kết cấu, môi trường và mô phỏng số, nhằm hỗ trợ công tác bảo tồn di sản văn hóa trong bối cảnh Việt Nam đang chịu tác động ngày càng mạnh mẽ của biến đổi khí hậu và quá trình đô thị hóa.

2. Các yếu tố ảnh hưởng đến quá trình ăn mòn của đồng

2.1. Cơ chế ăn mòn

Ăn mòn đồng (Cu) là quá trình suy giảm tính chất cơ lý do tác động của môi trường, đặc biệt rõ rệt trong điều kiện khí hậu nhiệt đới gió mùa như Việt Nam. Mặc dù đồng có tính ổn định hóa học cao, nó vẫn dễ bị ăn mòn dưới ảnh hưởng của các yếu tố môi trường. Có thể phân loại cơ chế ăn mòn đồng thành các dạng chính như sau: (i) Ăn mòn hóa học xảy ra khi đồng phản ứng với các khí oxy hóa trong điều kiện khô như O_2 , SO_2 và CO_2 , hình thành các lớp oxit hoặc hợp chất bề mặt như CuO , CuSO_4 và patina $\text{Cu}_2(\text{OH})_2\text{CO}_3$. Tuy nhiên, trong môi trường ẩm hoặc có mặt ion Cl^- , các lớp này mất ổn định, thúc đẩy ăn mòn tiếp diễn. (ii) Ăn mòn điện hóa diễn ra khi đồng tiếp xúc với dung dịch điện ly (nước mưa, nước biển), hình thành các tế bào điện hóa, trong đó đồng bị oxy hóa tại cực dương, sinh ra các sản phẩm ăn mòn như CuCl_2 , CuSO_4 hoặc $\text{Cu}_2(\text{OH})_2\text{CO}_3$. (iii) Ăn mòn trong môi trường biển, với sự hiện diện liên tục của ion Cl^- , gây phá vỡ lớp bảo vệ tự nhiên (patina), dẫn đến ăn mòn cục bộ và hình thành muối đồng clorua, sau đó tiếp tục chuyển hóa thành $\text{Cu}(\text{OH})_2$ theo cơ chế tự xúc tác, làm quá trình ăn mòn diễn tiến liên tục và khó kiểm soát. (iv) Các yếu tố môi trường như độ ẩm cao, nhiệt độ tăng, khí thải công nghiệp (SO_2 , CO_2) và ion Cl^- là những tác nhân quan trọng thúc đẩy cả ăn mòn hóa học lẫn điện hóa. Đặc biệt, trong điều kiện khí hậu nóng ẩm của Việt Nam, các quá trình này trở nên phức tạp và gia tốc mạnh, đòi hỏi sự hiểu biết sâu sắc về cơ chế ăn mòn để thiết lập các biện pháp bảo vệ hiệu quả cho các công trình sử dụng vật liệu đồng ngoài trời.

2.2. Các yếu tố ảnh hưởng đến ăn mòn đồng

Quá trình ăn mòn của đồng tại Việt Nam chịu tác động mạnh từ các yếu tố môi trường đặc thù của khí hậu nhiệt đới gió mùa. (i) Độ ẩm cao (75–90%) góp phần hình thành lớp dung dịch

điện ly mỏng trên bề mặt, thúc đẩy cả ăn mòn hóa học lẫn điện hóa, đồng thời tạo điều kiện cho sự hình thành các tế bào điện hóa cục bộ gây rỗ bề mặt. (ii) Nhiệt độ cao, đặc biệt vào mùa hè, làm gia tăng tốc độ phản ứng oxy hóa-khử và khả năng hòa tan các khí ăn mòn như O_2 và CO_2 , đẩy nhanh quá trình ăn mòn. (iii) Ion clorua (Cl^-), phổ biến trong môi trường biển, xuyên qua lớp patina tự nhiên, gây ăn mòn cục bộ theo cơ chế tự xúc tác, đặc biệt nguy hiểm tại các khu vực ven biển. (iv) Ô nhiễm không khí, chủ yếu do khí SO_2 , NO_x và CO_2 từ hoạt động công nghiệp và giao thông, góp phần hình thành các axit mạnh trong môi trường ẩm, làm tăng tốc độ ăn mòn bề mặt đồng. (v) Các tác nhân sinh học như vi khuẩn khử lưu huỳnh, nấm mốc và tảo cũng xúc tiến ăn mòn thông qua các sản phẩm chuyển hóa như H_2S hoặc axit hữu cơ, đặc biệt trong điều kiện ẩm ướt và không được bảo dưỡng định kỳ. (vi) Mưa axit tạo ra các dung dịch ăn mòn mạnh chứa H_2SO_4 và HNO_3 , phá hủy lớp bảo vệ và gây tổn hại sâu rộng đến bề mặt đồng. (vii) Các yếu tố vật lý như gió mang bụi và muối, bức xạ mặt trời, cũng góp phần vào mài mòn cơ học và làm tăng tích tụ các tác nhân ăn mòn tại bề mặt. (viii) Sự tương tác giữa các yếu tố như độ ẩm, nhiệt độ, Cl^- , SO_2 và tác nhân sinh học thường xảy ra đồng thời và có tính cộng hưởng, tạo ra điều kiện ăn mòn mạnh mẽ, liên tục và khó kiểm soát. Trong bối cảnh này, việc nhận diện đầy đủ các yếu tố và cơ chế tương tác là tiền đề quan trọng để xây dựng các chiến lược bảo vệ toàn diện cho công trình đồng ngoài trời tại Việt Nam.

2.3. Ảnh hưởng của ăn mòn đến an toàn của các tấm phù điêu đồng

Ăn mòn không chỉ làm suy giảm giá trị thẩm mỹ của các tấm phù điêu bằng đồng mà còn ảnh hưởng nghiêm trọng đến độ bền, kết cấu và mức độ an toàn tổng thể. (i) Về mặt cơ học, quá trình ăn mòn làm mỏng lớp kim loại và gây suy yếu cấu trúc, đặc biệt là ở các khu vực chịu tác động

của ăn mòn cục bộ do ion Cl^- và mưa axit, dẫn đến nguy cơ hình thành vết nứt và phá hủy cơ học trong điều kiện có tải trọng động hoặc rung lắc. (ii) Về kết cấu liên kết, ăn mòn ảnh hưởng đến các mối hàn, bu lông, khung đỡ và giá treo, gây mất ổn định hệ thống gắn kết, làm tăng nguy cơ rơi đổ phù điêu, đặc biệt tại các không gian công cộng hoặc khu vực đông người. (iii) Về mặt nghệ thuật, ăn mòn gây mất chi tiết hoa văn, biến dạng hình học và làm biến đổi màu sắc bề mặt, ảnh hưởng đến giá trị văn hóa – thẩm mỹ và ý nghĩa biểu tượng của tác phẩm, nhất là tại các công trình tôn giáo hoặc di tích lịch sử. (iv) Về tuổi thọ và chi phí, ăn mòn làm rút ngắn vòng đời sử dụng, yêu cầu can thiệp phục hồi tốn kém và đòi hỏi kỹ thuật cao, trong khi việc bảo trì định kỳ có thể tối ưu hóa chi phí dài hạn. (v) Về an toàn cộng đồng, sự suy giảm kết cấu có thể dẫn đến tai nạn do đổ vỡ, bong tróc hoặc vỡ vụn, gây nguy hiểm cho người dân tại các khu vực công cộng.

Từ đó, có thể thấy rằng, ăn mòn không chỉ là một hiện tượng vật lý – hóa học, mà còn là thách thức về bảo tồn, an toàn và quản lý di sản. Việc xác định đầy đủ các tác động này là cơ sở để xây dựng chiến lược bảo vệ hiệu quả cho các công trình phù điêu bằng đồng trong điều kiện khí hậu và môi trường đô thị phức tạp tại Việt Nam.

3. Bài toán nghiên cứu và thảo luận

Nhóm tác giả tiếp tục sử dụng kết quả nghiên cứu của nhóm trong bài báo [16] để phân tích chi tiết các tác động của quá trình ăn mòn đến an toàn của các tấm phù điêu (như Hình 1) dựa trên các khía cạnh vật lý, cơ học và thẩm mỹ. Kết quả nghiên cứu của [16] cho thấy việc bổ sung praseodymi clorua ($PrCl_3$) vào dung dịch $NaCl$ 0,6M cho thấy đây là một phương pháp hiệu quả nhằm giảm thiểu các phản ứng ăn mòn trên bề mặt hợp kim đồng. Bề mặt đồng đã được ức chế thể hiện khả năng chống ăn mòn cao, chủ yếu nhờ vào sự hình thành của một lớp màng bảo vệ phức hợp trên bề mặt đồng tiếp xúc với dung

dịch NaCl 0,6M có chứa PrCl_3 với nồng độ dao động từ 0,04 đến 4,1mM. Lớp màng bảo vệ này nhiều khả năng bao gồm các sản phẩm và phức hợp oxide/hydroxide của praseodymi và đồng, được xác nhận thông qua các phân tích nguyên tố sử dụng kính hiển vi điện tử quét (SEM), phổ tán xạ tia X năng lượng (EDS) và phổ kế ảnh điện tử tia X (XPS). Ngoài ra, ảnh hưởng của các nồng độ PSC đến các đặc tính bề mặt của đồng cũng được phân tích thông qua các kỹ thuật điện hóa như phổ trở kháng điện hóa (EIS), EIS động (DEIS), phân cực thể động (PD) và điện cực dạng bó dây (WBE). Các kết quả điện hóa thu được xác nhận PrCl_3 có thể bảo vệ bề mặt đồng

khỏi ăn mòn bằng cách hình thành một lớp phủ oxide/hydroxide chắc và màng phức hợp đa lớp ổn định với độ phủ cao. Đặc biệt, hiện tượng ăn mòn cục bộ tại các vị trí hoạt động trên bề mặt hợp kim đồng có thể được ngăn chặn nhờ sự phân bố ngẫu nhiên của các vùng anod và cathod dưới tác động của PrCl_3 , được thể hiện qua phân tích WBE. Từ các phân tích bề mặt và điện hóa, có thể kết luận PrCl_3 ở nồng độ 1,21mM mang lại khả năng chống ăn mòn vượt trội, với hiệu suất cao nhất đạt 90,7%. Do đó, nghiên cứu này đề xuất một phương pháp hiệu quả để cải thiện bề mặt hợp kim đồng, nâng cao hiệu năng vật liệu trong nhiều ứng dụng công nghiệp khác nhau.



(a) Mặt đứng tổng thể phù điêu



(b) Cận cảnh tấm phù điêu



(c) Chi tiết phù điêu

Hình 1. Tấm phù điêu bằng đồng tại Việt Nam

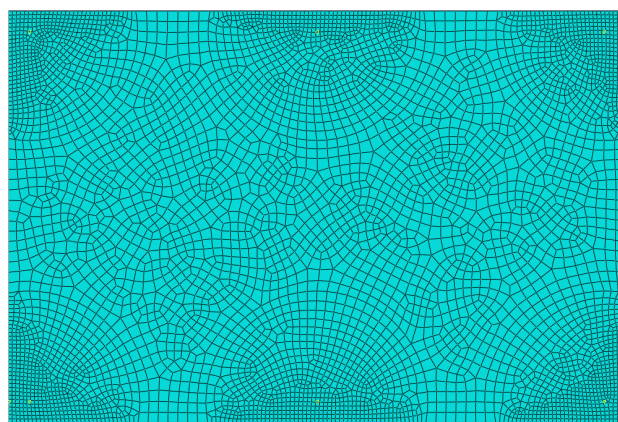
Từ đó, sử dụng kết quả nghiên cứu [16] để phân tích ứng suất và đánh giá độ bền của các chốt inox cũng như tấm đồng dưới tác dụng đồng thời của tải trọng tĩnh và động trong điều kiện lắp đặt thực tế ngoài trời (như Hình 1). Các thông số đầu vào bao gồm kích thước của tấm đồng nghiên cứu là $(2 \times 3 \times 0,02) \text{ m}$, với 4-20 chốt liên kết có đường kính từ 10-40 mm và chiều dài 150mm được sử dụng để gắn kết tấm đồng vào tường bê tông cốt thép (BTCT). Vật liệu chốt liên kết là inox 304 với mô đun đàn hồi $E = 200 \times 10^9 \text{ Pa}$ và ứng suất cho phép là 205 MPa , trong khi tấm là đồng có ứng suất cho phép là 200 MPa .

Hệ kết cấu gồm tấm đồng, các chốt liên kết và tường BTCT được mô hình hóa bằng tổ hợp ba loại phần tử khác nhau nhằm phản ánh đúng đặc trưng làm việc của từng bộ phận. Tấm đồng được rời rạc hóa bằng phần tử khối 3D tám nút

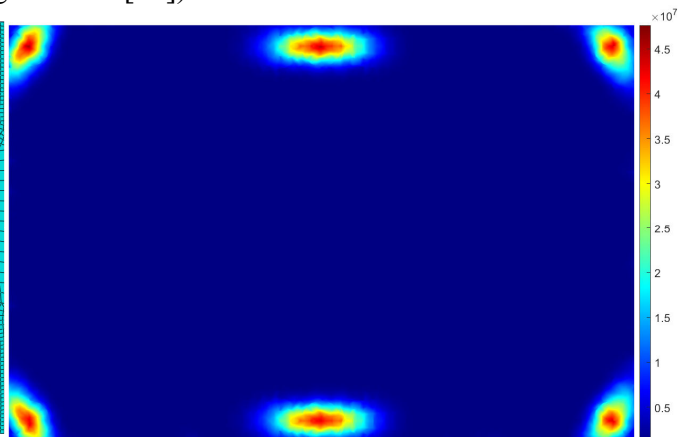
(hexahedral solid element), cho phép mô tả đầy đủ trạng thái ứng suất - biến dạng không gian và sự thay đổi chiều dày do ăn mòn trong quá trình khai thác. Các chốt liên kết được mô phỏng bằng phần tử dầm Timoshenko hai nút, phù hợp cho việc mô tả đồng thời biến dạng kéo - nén dọc trục, cắt và uốn là các cơ chế truyền lực chủ yếu tại chi tiết neo. Để đảm bảo độ chính xác hình học, chốt được chia theo chiều dài với kích thước phần tử 7,5–10 mm (tương ứng 15–20 phần tử trên toàn thân chốt), trong khi tấm đồng được tinh chỉnh lưới cục bộ xung quanh vùng gắn chốt với kích thước phần tử giảm xuống 10mm và tăng dần đến 50mm ở các vùng xa hơn. Liên kết giữa chốt và tấm đồng được thiết lập bằng ràng buộc phù hợp bậc tự do (tie constraint) nhằm đảm bảo truyền đầy đủ lực kéo - nén, lực cắt và mômen uốn qua vùng tiếp xúc. Đầu còn lại của chốt được liên kết với tường BTCT thông qua

điều kiện biên cố định (encastre), đại diện cho trạng thái neo cứng của chốt trong tường. Tường BTCT được mô phỏng như một miền nền cứng bằng phần tử khối 3D với kích thước phần tử 50 mm và được gán điều kiện biên cố định tại toàn bộ mặt sau, phản ánh đúng điều kiện liên kết thực tế của công trình. Các loại tải trọng được xét đến bao gồm: (1) tải trọng tĩnh từ trọng lượng

bản thân của tấm phù điêu; (2) tải trọng động do áp lực gió đứng, được tính với vận tốc gió cực đại 32 m/s. Tổng tải trọng này được phân phối đều lên các mặt tấm phù điêu. Tính toán được thực hiện thông qua mô phỏng FEM bằng phần mềm MATLAB [17] cho 2 trường hợp không có và có chất ức chế ăn mòn PrCl_3 (số liệu được lấy theo [16]).



(a) Lưới chia cho tấm đồng



(b) Ứng suất trong tấm đồng liên kết bởi 6 chốt inox tại thời điểm ban đầu ($t = 0$ năm) (đơn vị Pa)

Hình 2. Mô hình FEM và ứng suất trong tấm đồng nghiên cứu

Trong phân tích FEM, ăn mòn được giả định xảy ra đồng đều và dựa trên kết quả của [16]. Do đó, chiều dày tấm đồng tại thời điểm t được cập nhật theo biểu thức $\delta(t) = \delta_0 - CR_{Cu} \cdot t$ (với δ_0 là chiều dày ban đầu của tấm đồng, CR_{Cu} là tốc độ ăn mòn của đồng theo năm, $CR_{Cu} = 0,3 \text{ mm/năm}$ lấy trong điều kiện xâm thực mạnh). Với chốt inox, bán kính giảm theo quy luật $R(t) = R_0 - CR_{inox} \cdot t$ (R_0 là bán kính ban đầu của chốt inox, CR_{inox} là tốc độ ăn mòn của chốt inox theo năm, $CR_{inox} = 0,1 \text{ mm/năm}$ lấy theo điều kiện xâm thực mạnh [18]), từ đó xác định lại tiết diện chịu lực của chốt. Tại mỗi bước thời gian, kích thước hình học được cập nhật và mô hình được giải lại trong quy trình FEM tuần tự theo năm. Mô đun đàn hồi của vật liệu được giữ không đổi, vì mức độ ăn mòn trong CR đo được chủ yếu làm giảm tiết diện mà không ảnh hưởng đáng kể đến đặc tính đàn hồi. Cách mô hình hóa này bảo đảm sự liên kết trực tiếp giữa dữ liệu điện hóa thực nghiệm và mô phỏng cơ

học, qua đó phản ánh chính xác sự suy giảm khả năng chịu lực của hệ phù điêu trong cả hai kịch bản có và không có PrCl_3 .

3.1. Kiểm tra bền của chốt inox và tấm phù điêu dưới tác dụng của tải trọng tĩnh và động

Kiểm tra độ bền của chốt inox và tấm đồng dưới tác động của tải trọng tĩnh và động là bước phân tích quan trọng nhằm đánh giá khả năng chịu lực và độ an toàn kết cấu trong các điều kiện khai thác thực tế. Bài toán này đặc biệt cần thiết trong bối cảnh các tấm phù điêu được gắn vào công trình bằng các cơ cấu như chốt inox, vốn chịu ảnh hưởng trực tiếp từ trọng lượng bản thân và các yếu tố môi trường như gió, rung động từ giao thông hoặc tác động địa chấn. Trong điều kiện tải trọng tĩnh, tải trọng của tấm đồng được giả định phân bố đều lên các chốt inox. Ứng suất trong chốt inox (σ) được tính theo công thức (1). Đối với tải trọng động, nghiên cứu đưa vào phân tích áp lực gió (P_w) tác động lên tấm đồng thông qua vận tốc gió như thể hiện trong biểu thức (2).

$$\sigma = P/A; A = \pi r^2 \quad (1)$$

$$P_w = 1/2 \rho v^2 \quad (2)$$

trong đó P là tải trọng tác dụng lên mỗi chốt, A là diện tích mặt cắt ngang, và r là bán kính chốt inox; ρ là khối lượng riêng của không khí; v là tốc độ gió cực đại theo điều kiện khí hậu địa phương.

Kết quả kiểm tra ứng suất điển hình của chốt inox và tấm đồng dưới tác dụng của tải trọng được thể hiện ở Hình 3. Trong đó, Hình 3(a) thể hiện sự biến đổi ứng suất trong tấm đồng theo thời gian dưới ảnh hưởng của ăn mòn, trong hai điều kiện có và không sử dụng chất ức chế PrCl_3 (trường hợp 6 chốt, đường kính 26 mm). Ở trường hợp không có PrCl_3 , ứng suất tăng dần theo thời gian, đến năm thứ 50, ứng suất đã gần tiệm cận giới hạn chịu lực cho phép của vật liệu đồng, cho thấy nguy cơ tiềm ẩn về an toàn của tấm phù điêu nếu không có biện pháp bảo vệ thích hợp. Ngược lại, trong trường hợp có PrCl_3 , ứng suất duy trì gần như ổn định trong suốt toàn bộ chu kỳ, với mức tăng không đáng kể và luôn nằm trong phạm vi an toàn. Kết quả này cho thấy mặc dù tấm đồng có mức độ chịu ăn mòn tốt hơn so với chốt inox, nó vẫn bị ảnh hưởng rõ rệt bởi điều kiện môi trường khi không có lớp bảo vệ. Việc sử dụng PrCl_3 giúp hạn chế đáng kể quá trình ăn mòn bề mặt, từ đó duy trì ứng suất ở mức thấp và ổn định, đảm bảo độ bền cơ học lâu dài cho các tấm phù điêu (đặc biệt trong các công trình ngoài trời tiếp xúc trực tiếp với môi trường khí hậu nhiệt đới ẩm).

Hình 3(b) cho thấy sự thay đổi ứng suất trong chốt inox (trường hợp 6 chốt, đường kính 26mm) theo thời gian dưới tác động của ăn mòn, với và không có sự bảo vệ từ chất ức chế PrCl_3 . Trong điều kiện không sử dụng PrCl_3 , ngay từ năm thứ 10 ứng suất trong chốt liên kết đã vượt quá giới hạn an toàn của vật liệu inox, tiềm ẩn nguy cơ mất ổn định và phá hủy. Sau đó, ứng suất tiếp tục tăng theo thời gian và bắt đầu gia tăng mạnh sau mốc 30 năm. Ngược lại, ở trường hợp có

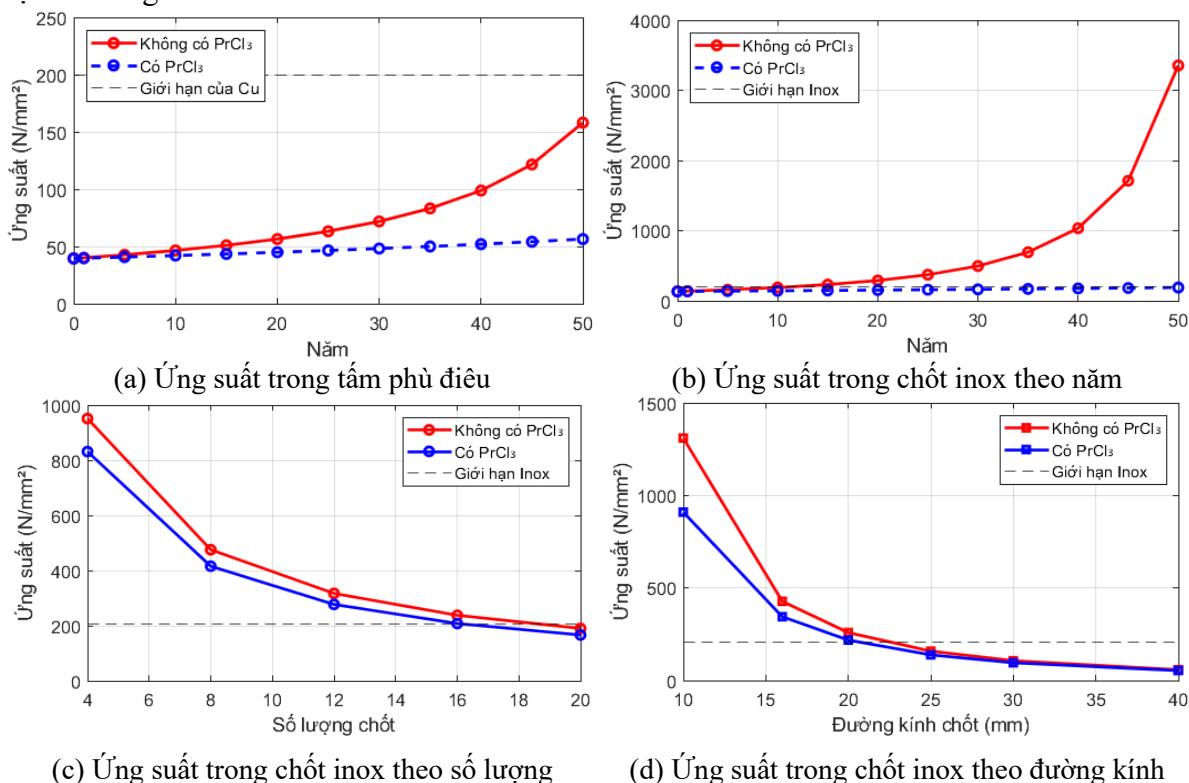
PrCl_3 , ứng suất duy trì ở mức thấp và ổn định trong suốt toàn bộ chu kỳ 50 năm, hoàn toàn nằm trong phạm vi an toàn cho phép. Kết quả này phản ánh rõ vai trò của PrCl_3 trong việc làm chậm quá trình ăn mòn, nhờ đó giữ nguyên tiết diện làm việc của chốt inox, tránh sự gia tăng ứng suất nội tại theo thời gian. Khi không có biện pháp bảo vệ, tiết diện chốt bị ăn mòn nhanh chóng, dẫn đến ứng suất tăng đột biến và làm giảm đáng kể tuổi thọ của hệ thống liên kết. Sự ổn định ứng suất trong trường hợp có PrCl_3 cho thấy hiệu quả rõ rệt của chất ức chế trong việc kéo dài tuổi thọ kết cấu và nâng cao độ an toàn vận hành trong các điều kiện môi trường khắc nghiệt.

Hình 3(c) chỉ rõ mối quan hệ giữa số lượng chốt inox và ứng suất phân bố trên mỗi chốt (trường hợp đường kính chốt 26mm tại năm 0) trong điều kiện có và không có chất ức chế ăn mòn PrCl_3 . Kết quả cho thấy, khi số lượng chốt tăng, ứng suất tác dụng lên từng chốt giảm rõ rệt ở cả hai trường hợp. Đặc biệt, khi hệ liên kết chỉ sử dụng 4 chốt, ứng suất trên mỗi chốt đạt mức rất cao (900–950MPa), vượt xa giới hạn chịu lực của inox, tạo ra rủi ro mất an toàn nghiêm trọng. Ngược lại, khi số lượng chốt tăng lên 10–12 chốt trở lên, ứng suất giảm xuống dưới mức nguy hiểm. Trường hợp có PrCl_3 cho thấy hiệu quả vượt trội khi ứng suất thấp hơn đáng kể so với trường hợp không có bảo vệ trong cùng điều kiện số lượng chốt. Kết quả này chỉ ra việc gia tăng số lượng chốt liên kết là một biện pháp hiệu quả nhằm phân bố tải trọng hợp lý hơn, giúp giảm ứng suất nội tại trên từng chốt, từ đó tăng độ ổn định cơ học của hệ thống liên kết. Khi kết hợp đồng thời với biện pháp bảo vệ hóa học bằng PrCl_3 , hiệu quả bảo vệ càng được nâng cao, giúp kéo dài tuổi thọ của chốt và toàn bộ cấu trúc phù điêu trong các điều kiện môi trường khắc nghiệt.

Hình 3(d) mô tả mối quan hệ giữa đường kính chốt inox và giá trị ứng suất phát sinh trên mỗi chốt (trường hợp 6 chốt tại năm 0) trong điều

kiện có và không có sử dụng chất ức chế ăn mòn PrCl_3 . Kết quả cho thấy, khi đường kính chốt tăng, ứng suất giảm rất mạnh, thể hiện rõ vai trò của tiết diện chịu lực trong việc phân tán ứng suất. Với các chốt có đường kính nhỏ (10–15mm), ứng suất đạt mức rất cao, tiệm cận hoặc vượt quá giới hạn bền của vật liệu inox, tiềm ẩn nguy cơ gây hỏng trong điều kiện tải trọng môi trường thực tế. Ngược lại, khi đường kính chốt đạt từ 20mm trở lên, ứng suất giảm xuống dưới mức nguy hiểm; đặc biệt, trong trường hợp có PrCl_3 , ứng suất duy trì ở mức rất thấp, đảm bảo an toàn kết cấu ngay cả khi tiết diện chốt bị ảnh hưởng một phần do ăn mòn. Những kết quả này chỉ ra ngoài việc kiểm soát môi trường ăn mòn bằng các biện pháp hóa học, việc lựa chọn kích thước hình học phù hợp, cụ thể là sử dụng chốt có đường kính $\geq 20\text{mm}$, đóng vai trò quan trọng trong việc đảm bảo độ bền và ổn định dài hạn của hệ thống liên kết. Khi được kết hợp với PrCl_3 , hiệu quả giảm ứng suất càng được nâng cao, đặc biệt hữu ích trong các thiết kế có giới hạn về kích thước hoặc phải sử dụng chốt nhỏ do điều kiện thi công.

Các kết quả mô phỏng và phân tích cho thấy việc sử dụng chất ức chế ăn mòn PrCl_3 có tác dụng rõ rệt trong việc làm giảm tốc độ ăn mòn, từ đó góp phần duy trì ứng suất ổn định trong cả chốt inox và tấm phủ điều đồng trong suốt chu kỳ vận hành. Ứng suất duy trì ở mức thấp và không vượt quá giới hạn bền của vật liệu trong suốt 50 năm, cho thấy hiệu quả của PrCl_3 trong việc kéo dài tuổi thọ và đảm bảo an toàn kết cấu cho các công trình sử dụng vật liệu đồng ngoài trời. Ngoài ra, các phân tích tham số cũng cho thấy việc tăng số lượng chốt liên kết hoặc tăng đường kính chốt đều dẫn đến sự phân bố tải trọng hợp lý hơn, từ đó giảm ứng suất tác dụng trên từng chốt. Cả hai biện pháp này đều góp phần nâng cao mức độ an toàn tổng thể của kết cấu phù điêu, đặc biệt trong điều kiện môi trường khắc nghiệt như khí hậu nhiệt đới ẩm. Sự kết hợp giữa thiết kế kết cấu hợp lý và giải pháp hóa học như PrCl_3 mang lại hiệu quả bảo vệ bền vững và đáng tin cậy cho công trình.



Hình 3. Ứng suất trong tấm đồng và chốt inox

3.2. Kiểm tra sự hình thành và phát triển vết nứt trên tấm phủ điều

Sự hình thành và phát triển vết nứt là một trong những nguy cơ chính ảnh hưởng đến độ bền và tính toàn vẹn kết cấu của các tấm phủ điều bằng đồng, đặc biệt trong điều kiện môi trường ngoài trời khắc nghiệt như tại Việt Nam. Bài toán này nhằm xác định nguy cơ xuất hiện các vết nứt và cơ chế lan rộng của chúng dưới tác động kết hợp của tải trọng tĩnh, tải trọng động và môi trường ăn mòn, tập trung đặc biệt vào các khu vực chịu ứng suất tập trung như vùng tiếp xúc với chốt inox hoặc các điểm yếu hình học trên phủ điều. Giả thiết về sự tồn tại của một vết nứt ban đầu tại mép chốt inox hoặc các điểm giao tiếp vật liệu sẽ được sử dụng làm cơ sở để phân tích quá trình phát triển nứt gãy. Phương pháp tính toán dựa trên lý thuyết tập trung ứng suất (stress concentration theory), trong đó hệ số tập trung ứng suất tại vết nứt được xác định theo công thức (3).

$$K_t = 1 + 2/\sqrt{a/r} \quad (3)$$

với K_t là hệ số tập trung ứng suất; a là chiều dài vết nứt; r là bán kính cong tại đáy vết nứt hoặc kích thước đặc trưng của chốt inox. Mô phỏng lan rộng vết nứt được thực hiện bằng phương pháp phần tử hữu hạn (FEM), cho phép đánh giá sự phát triển của vết nứt theo thời gian dưới tác động lặp lại của tải trọng và môi trường ăn mòn. Phân tích này giúp xác định các vị trí có nguy cơ cao và dự đoán thời gian tới khi xảy ra phá hủy cấu trúc.

Để kiểm tra sự hình thành và phát triển vết nứt trên tấm phủ điều, nghiên cứu này dựa trên các tiêu chuẩn kỹ thuật quốc tế về đánh giá nứt gãy trong kết cấu kim loại và vật liệu, như ASTM E647-24 [19] – phương pháp thử nghiệm lan truyền vết nứt mỏi, và ACI 224R [20] – tiêu chuẩn thử nghiệm đo tốc độ phát triển vết nứt mỏi, và hướng dẫn kiểm soát nứt trong kết cấu. Theo đó, một số giới hạn vết nứt được khuyến nghị nhằm phục vụ cho công tác giám sát và

đánh giá hư hỏng, bao gồm chiều dài vết nứt không vượt quá 5–10 mm và độ rộng vết nứt dưới 0,3 mm. Những giá trị giới hạn này được áp dụng như các tiêu chí can thiệp trong quá trình bảo trì định kỳ. Một đại lượng cơ bản trong cơ học nứt gãy là hệ số cường độ ứng suất K , đại diện cho khả năng vật liệu chống lại sự lan truyền vết nứt khi có ứng suất tập trung. Trong cơ học nứt gãy tuyến tính đàn hồi (Linear Elastic Fracture Mechanics – LEFM) [21], K được xác định theo công thức:

$$K = Y \cdot \sigma \cdot \sqrt{\pi \cdot a} \quad (4)$$

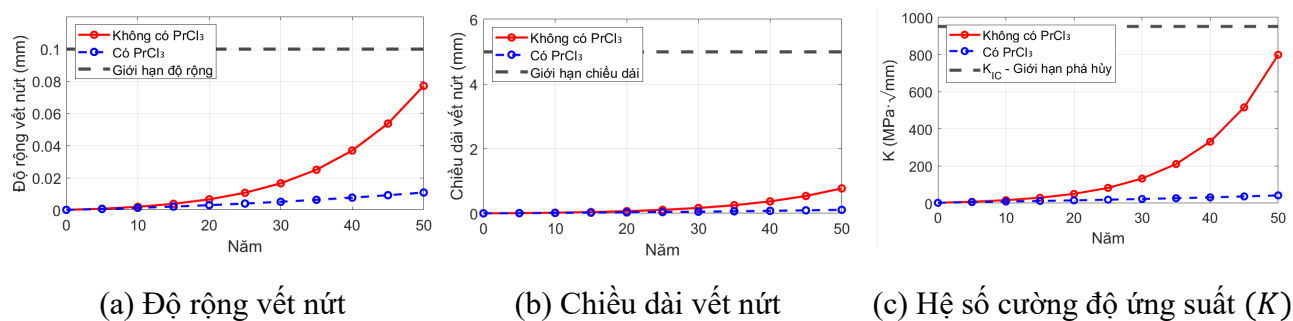
trong đó: K là hệ số cường độ ứng suất ($MPa\sqrt{m}$); Y là hệ số hình học (thường lấy $Y = 1$ trong các trường hợp hình học đơn giản); σ là ứng suất tác dụng (N/mm^2); a là chiều dài vết nứt (mm). Khi $K \geq K_{IC}$, với K_{IC} là độ bền gãy của vật liệu, hiện tượng lan truyền nứt không kiểm soát có thể xảy ra, dẫn đến phá hủy cấu kiện. Theo dữ liệu thực nghiệm, độ bền gãy K_{IC} của đồng được lấy với giá trị trung bình khoảng $30MPa\sqrt{m}$ được sử dụng trong nhiều nghiên cứu bảo tồn [22,23].

Để đánh giá khả năng phá hủy do nứt gãy trong quá trình sử dụng, nghiên cứu đề xuất một phương pháp mô phỏng theo chu kỳ thời gian, trong đó ứng suất và chiều dài vết nứt tại từng thời điểm sẽ được sử dụng để tính toán hệ số K . Nếu giá trị này vượt ngưỡng K_{IC} , cấu kiện được xem là có nguy cơ cao mất ổn định, và các biện pháp như gia cố, phục hồi hoặc thay thế cần được xem xét. Phương pháp này có ưu thế lớn trong các ứng dụng bảo tồn di sản văn hóa, nơi đòi hỏi phương pháp phân tích phi xâm lấn, có độ chính xác cao và tính dự báo hiệu quả.

Hình 4(a) thể hiện sự biến đổi độ rộng vết nứt theo thời gian trong hai trường hợp có và không sử dụng chất ức chế $PrCl_3$ (trường hợp dùng 6 chốt, đường kính 26mm). Kết quả cho thấy, đối với mẫu không có $PrCl_3$, độ rộng vết nứt tăng đáng kể theo thời gian, đặc biệt sau 20 năm, và đạt tới khoảng 0,08 mm sau 50 năm. Trong khi

đó, ở mẫu có PrCl_3 , sự gia tăng độ rộng vết nứt rất nhẹ, ổn định quanh mức từ 0,02mm đến 0,025 mm trong suốt quá trình khảo sát. Mặc dù cả hai trường hợp đều chưa vượt quá giới hạn an toàn 0,1 mm về độ rộng vết nứt, song mẫu không được bảo vệ bằng PrCl_3 đã tiến rất gần tới ngưỡng nguy hiểm vào cuối giai đoạn nghiên cứu. Ý nghĩa của kết quả này cho thấy, trong điều kiện không có PrCl_3 , vết nứt có xu hướng mở rộng nhanh chóng theo thời gian, dẫn đến nguy cơ cao gây mất an toàn và phá hủy kết cấu phù điêu đồng. Ngược lại, việc sử dụng PrCl_3 đã giúp kiểm soát hiệu quả quá trình phát triển vết nứt, duy trì độ rộng vết nứt trong giới hạn an toàn và đảm bảo tính ổn định lâu dài cho công trình. Hình 4(b) mô tả sự phát triển chiều dài vết nứt

trong suốt 50 năm đối với hai trường hợp có và không có PrCl_3 (trường hợp dùng 6 chốt, đường kính 26 mm). Đối với mẫu không sử dụng chất ức chế, chiều dài vết nứt tăng dần theo thời gian, đạt khoảng 1mm vào năm thứ 50. Trong khi đó, chiều dài vết nứt ở mẫu có PrCl_3 gần như không thay đổi, dao động nhẹ quanh mức 0,1–0,2 mm và giữ nguyên trong phần lớn thời gian khảo sát. Kết quả này cho thấy PrCl_3 có tác dụng rõ rệt trong việc hạn chế sự lan rộng của vết nứt theo chiều dài. Dù tốc độ tăng chiều dài là tương đối chậm so với độ rộng, sự khác biệt giữa hai trường hợp vẫn cho thấy tầm quan trọng của chất ức chế trong việc ổn định cấu trúc, giảm thiểu nguy cơ phá hủy do nứt lan.



Hình 4. Kiểm tra sự hình thành và phát triển vết nứt trên tấm đồng

Hình 4(c) mô tả sự biến thiên của hệ số cường độ ứng suất K tại đầu vết nứt theo thời gian đối với trường hợp tấm đồng được liên kết bằng 6 chốt đường kính 26 mm. Kết quả cho thấy, khi không sử dụng PrCl_3 , giá trị K tăng rất nhanh sau khoảng 30 năm do chiều dày tấm giảm và ứng suất tập trung tăng, và cuối giai đoạn khảo sát K đạt xấp xỉ $800 \text{ MPa}\sqrt{\text{mm}}$. Mức này tiệm cận ngưỡng bền gãy của đồng $K_{IC} \approx 30 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}} (\approx 950 \text{ MPa}\sqrt{\text{mm}})$, cho thấy nguy cơ lan truyền vết nứt và phá hủy kết cấu ở giai đoạn dài hạn là đáng kể. Ngược lại, mẫu có bổ sung PrCl_3 duy trì giá trị K gần như không đổi trong suốt thời gian nghiên cứu, luôn nhỏ hơn nhiều so với K_{IC} và không xuất hiện xu hướng tăng đột biến. Điều này khẳng định hiệu quả của PrCl_3 trong việc hạn chế quá trình suy giảm tiết diện và giữ mức

ứng suất tại đầu vết nứt trong vùng an toàn, qua đó ngăn ngừa nguy cơ phá hủy theo cơ chế nứt gãy hoặc lan truyền mỏi trong điều kiện làm việc dài hạn.

3.3. Dự đoán tuổi thọ và thời điểm cần thay thế, sửa chữa

Việc dự báo tuổi thọ của hệ phù điêu – chốt liên kết được thực hiện nhằm đánh giá mức độ suy giảm cơ học theo thời gian và xác định thời điểm cần bảo trì hoặc thay thế nhằm đảm bảo an toàn lâu dài của công trình. Trong mô hình này, sự xuống cấp của cấu kiện được xem là kết quả của quá trình ăn mòn liên tục dưới tác động của môi trường ngoài trời (nơi độ ẩm cao, ion Cl^- trong khí hậu biển và các khí ô nhiễm như CO_2 , SO_2) đóng vai trò gia tốc quá trình phá hủy vật liệu. Các yếu tố này gây mòn dần tiết diện của

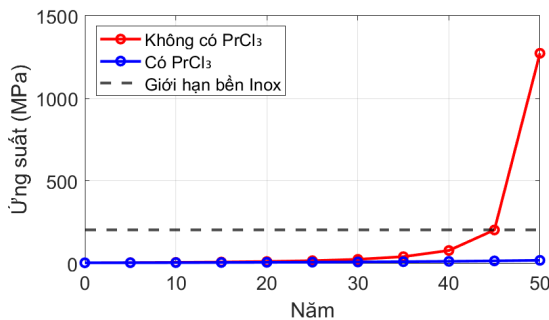
chốt inox và tấm đồng, làm giảm khả năng chịu tải và dẫn đến sự gia tăng ứng suất theo thời gian. Tốc độ ăn mòn được tích hợp vào mô phỏng được xác định thông qua biểu thức (5).

$$V_{mất} = v_{corr} \cdot t \cdot A \quad (5)$$

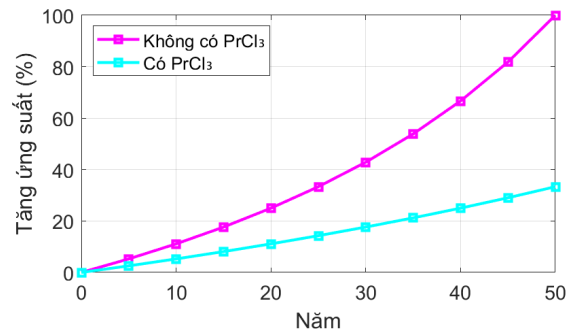
trong đó: $V_{mất}$ là thể tích bị mất do ăn mòn (có thứ nguyên là *chiều dài³*); v_{corr} là tốc độ ăn mòn (có thứ nguyên là *chiều dài/thời gian*); t là thời gian; A là diện tích bề mặt ban đầu chịu tác động ăn mòn (có thứ nguyên là *chiều dài²*). Công thức (5) được xây dựng trên giả thiết ăn mòn đồng đều và diện tích bề mặt chịu ăn mòn không thay đổi theo thời gian.

Sử dụng FEM để mô phỏng đánh giá sự biến đổi ứng suất, biến dạng và suy giảm độ bền của các cấu kiện như tấm phù điêu đồng và chốt inox dưới tác động tải trọng chu kỳ và thời gian. Khi ứng suất vượt ngưỡng hoặc cấu kiện không còn

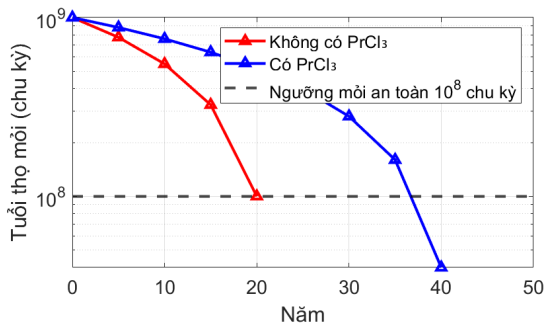
đáp ứng yêu cầu độ bền mỏi, thời điểm can thiệp kỹ thuật được xác lập. Đồng thời, hiệu quả của chất ức chế ăn mòn PrCl_3 được phân tích nhằm làm chậm quá trình suy giảm tiết diện và kéo dài tuổi thọ cấu kiện. So sánh hai kịch bản, có và không sử dụng PrCl_3 , cho phép đánh giá khả năng bảo vệ của chất ức chế. Kết quả hỗ trợ xác định thời điểm bảo trì tối ưu và đề xuất các giải pháp nâng cao độ bền tổng thể, góp phần bảo tồn giá trị kết cấu và văn hóa của công trình ngoài trời trong điều kiện khí hậu khắc nghiệt. Việc dự đoán tuổi thọ sử dụng và xác định thời điểm cần thay thế hoặc sửa chữa các bộ phận cấu trúc như tấm phù điêu đồng và chốt inox là bước quan trọng trong công tác bảo tồn các công trình nghệ thuật ngoài trời. Kết quả mô phỏng FEM cho bài toán nghiên cứu được thể hiện ở Hình 5 (sử dụng trường hợp 6 chốt, đường kính 26 mm).



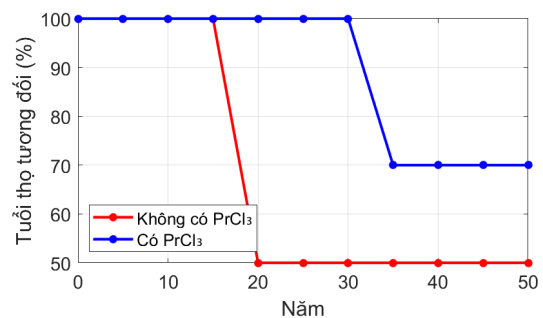
(a) Tuổi thọ mỏi.



(b) Tuổi thọ tương đối.



(c) Ứng suất.



(d) Tỷ lệ tăng ứng suất.

Hình 5. Dự đoán tuổi thọ và thời điểm cần thay thế sửa chữa

Hình 5(a) mô tả sự biến đổi ứng suất trong chốt inox theo thời gian trong hai điều kiện có và không có chất ức chế PrCl_3 (trường hợp dùng 6 chốt với đường kính 26 mm). Trong trường

hợp không có PrCl_3 , ứng suất ban đầu duy trì ở mức ổn định trong khoảng 30 năm đầu. Tuy nhiên, sau mốc 40 năm, ứng suất bắt đầu tăng đột ngột và vượt xa giới hạn chảy của vật liệu

inox (205MPa) vào năm thứ 50. Ngược lại, ở mẫu có PrCl_3 , ứng suất duy trì ở mức rất thấp và ổn định trong toàn bộ 50 năm nghiên cứu. Kết quả này cho thấy, khi không có biện pháp bảo vệ, ăn mòn làm giảm tiết diện chịu lực của chốt inox, dẫn đến sự gia tăng ứng suất nhanh chóng trong giai đoạn cuối của tuổi thọ, tiềm ẩn nguy cơ gãy chốt và phá hủy cấu trúc liên kết. Việc sử dụng PrCl_3 giúp kiểm soát hiệu quả quá trình ăn mòn, từ đó giữ ứng suất ở mức an toàn, góp phần đảm bảo sự ổn định cơ học và kéo dài tuổi thọ làm việc của hệ thống liên kết.

Hình 5(b) thể hiện sự suy giảm tuổi thọ tương đối của vật liệu theo thời gian trong điều kiện có và không sử dụng chất ức chế ăn mòn PrCl_3 (trường hợp dùng 6 chốt với đường kính 26mm). Theo đó, ở trường hợp không có PrCl_3 , tuổi thọ tương đối của vật liệu giảm mạnh từ 100 xuống chỉ còn 50% sau khoảng 15–20 năm. Ngược lại, khi sử dụng PrCl_3 , độ bền duy trì ở mức 100% trong gần 30 năm đầu, sau đó giảm chậm và vẫn còn khoảng 70% vào năm thứ 50. Những kết quả này cho thấy PrCl_3 có tác dụng đáng kể trong việc kéo dài thời gian làm việc hiệu quả của vật liệu, gần gấp đôi so với trường hợp không có biện pháp bảo vệ. Trong khi vật liệu không được bảo vệ xuống cấp nhanh chóng chỉ sau hai thập kỷ, việc sử dụng PrCl_3 giúp duy trì trạng thái ổn định lâu dài hơn, đặc biệt phù hợp với các công trình yêu cầu độ bền vững cao như phù điêu đồng trong môi trường khí hậu khắc nghiệt.

Hình 5(c) phân tích tuổi thọ mỏi của chốt inox bằng cách biểu diễn số chu kỳ chịu tải (theo thang logarit) trong 50 năm (trường hợp dùng 6 chốt với đường kính 26 mm). Kết quả cho thấy tuổi thọ mỏi giảm nhanh chóng trong trường hợp không sử dụng PrCl_3 , từ mức ban đầu $\sim 10^9$ chu kỳ xuống còn dưới 10^6 chu kỳ sau 50 năm (mức được xem là ngưỡng giới hạn mỏi nguy hiểm). Ngược lại, khi có PrCl_3 , tuổi thọ mỏi giảm rất chậm, duy trì ổn định trên 10^7 – 10^8 chu kỳ, đảm bảo hiệu suất sử dụng lâu dài. Phân tích này một

lần nữa khẳng định vai trò của PrCl_3 trong việc hạn chế tốc độ suy giảm tính năng cơ học do ăn mòn, từ đó kéo dài tuổi thọ sử dụng của các chi tiết liên kết như chốt inox trong điều kiện môi trường khắc nghiệt.

Hình 5(d) thể hiện mức độ tăng ứng suất tương đối (%) trong chốt inox theo thời gian, phản ánh ảnh hưởng gián tiếp của quá trình ăn mòn đến khả năng chịu tải của vật liệu. Trong điều kiện không có PrCl_3 , ứng suất tăng gần như gấp đôi sau 50 năm, với mức tăng xấp xỉ 100% so với thời điểm ban đầu. Ngược lại, ở mẫu có PrCl_3 , mức tăng ứng suất chỉ dao động quanh 30% sau cùng khoảng thời gian. Sự chênh lệch rõ rệt giữa hai trường hợp cho thấy vai trò then chốt của PrCl_3 trong việc kiểm soát quá trình suy giảm tiết diện chịu lực do ăn mòn. Khi không được bảo vệ, tiết diện chốt giảm dần kéo theo gia tăng ứng suất tác dụng, làm tăng nguy cơ vượt quá giới hạn bền vật liệu trong giai đoạn sau của vòng đời sử dụng. Trái lại, với sự hiện diện của PrCl_3 , tốc độ ăn mòn bị hạn chế, giúp duy trì tiết diện hiệu dụng, từ đó kiểm soát tốc độ tăng ứng suất và kéo dài thời gian làm việc an toàn của kết cấu phù điêu và liên kết cơ học.

4. Kết luận

Nghiên cứu này kết hợp thử nghiệm điện hóa và mô phỏng phần tử hữu hạn 3D nhằm đánh giá ảnh hưởng của Praseodymium chloride (PrCl_3) lên quá trình ăn mòn và sự suy giảm khả năng chịu lực của hệ kết cấu treo gồm tám phù điêu bằng đồng và các chốt inox liên kết. Dữ liệu điện hóa sử dụng trong mô phỏng được thực hiện bởi chính nhóm tác giả và công bố trong tài liệu [16] có xét đến ảnh hưởng xâm thực mạnh. Khi các giá trị tốc độ ăn mòn được cập nhật vào mô hình theo thời gian, các kết quả mô phỏng phần tử hữu hạn chỉ ra rằng việc sử dụng PrCl_3 giúp giảm mức độ suy giảm tiết diện, hạn chế sự gia tăng ứng suất tập trung, làm chậm quá trình hình thành và mở rộng vết nứt, qua đó cải thiện tuổi thọ cơ học của hệ trong giai đoạn khai thác 50

năm. Ngoài ra, phân tích tham số cho thấy tăng số lượng hoặc đường kính chốt inox giúp phân bố ứng suất đồng đều hơn và nâng cao mức độ an toàn của hệ kết cấu treo.

Mặc dù các kết quả thu được thể hiện xu hướng tích cực, nghiên cứu vẫn tồn tại một số hạn chế. Mô phỏng dưới giả thiết ăn mòn đồng đều theo thời gian, trong khi trong điều kiện ngoài trời thực tế, ăn mòn cục bộ, chu kỳ ẩm–khô và tác động của các tạp chất môi trường có thể dẫn đến tốc độ suy giảm không đồng nhất và nhanh hơn. Mô hình phần tử hữu hạn hiện tại cũng chưa xét đến sự thay đổi cơ tính vật liệu theo mức độ ăn mòn, chưa mô phỏng đầy đủ các dạng tải động phức tạp từ môi trường. Do đó, các hướng nghiên cứu tiếp theo cần tập trung vào: (i) kiểm chứng độ bền lâu dài của lớp ức chế PrCl_3 trong điều kiện môi trường thực tế thông qua các thí nghiệm phơi và chu kỳ gia tốc lão hóa; (ii) phát triển mô hình ăn mòn phi đồng đều và mô phỏng đa trường (hóa – cơ – nhiệt) nhằm phản ánh chính xác hơn cơ chế suy giảm tiết diện theo thời gian; (iii) áp dụng mô hình sub-modelling cho các vùng mối nối để đánh giá chi tiết ứng suất cục bộ; (iv) tích hợp mô hình Paris–Erdogan để dự báo định lượng quá trình lan truyền vết nứt dưới tác động đồng thời của ứng suất và ăn mòn; và (v) triển khai thí nghiệm thực địa dài hạn kết hợp cảm biến và hệ thống giám sát thời gian thực nhằm đánh giá hiệu quả bền vững của PrCl_3 và phát triển chiến lược bảo trì chủ động cho các công trình di sản trong điều kiện môi trường khắc nghiệt. Những hướng nghiên cứu này sẽ góp phần tăng độ tin cậy của dự báo tuổi thọ và hỗ trợ việc lựa chọn giải pháp bảo tồn tối ưu cho các công trình nghệ thuật bằng đồng.

Tài liệu tham khảo

- [1] Nam, N. K. (2021). "Bảo tồn di sản văn hóa trước tác động của biến đổi khí hậu: Nghiên cứu trường hợp Quần thể Di tích Cổ đô Huế". *Vietnam Journal of Social Science Humanity* (7), 670–683.
- [2] Hiên, N. T. (2008). *Điêu khắc*. Hà Nội: Nhà xuất bản Đại học Sư phạm Hà Nội.
- [3] Chung, P. L., Le, N. T. H. (2022). "Typical values of the Nguyen Dynasty's decorative art on bronze objects in Hue". *Journal La Sociale* 3(6), 225-233. <https://doi.org/10.37899/journal-la-sociale.v3i6.732>
- [4] Đức, P. X., Đạo, V. Q. (2020). "Ảnh hưởng của khí thải công nghiệp đến ăn mòn bề mặt đồng trong môi trường ven biển Việt Nam". *Nội san tổng hợp – Khoa Máy tàu biển, Trường Đại học Hàng hải Việt Nam* (11), 12-23.
- [5] Petrović-Mihajlović, M. B., Antonijević, M. M. "Copper corrosion inhibitors. Period 2008-2014. A Review". *International Journal of Electrochemical science* (10), 1027–53. [https://doi.org/10.1016/S1452-3981\(23\)05053-8](https://doi.org/10.1016/S1452-3981(23)05053-8).
- [6] El-Asri, A., Rguiti, M., Jmiai, A., Oukhrif, R., Bourzi, H., Lin, Y. "Carissa macrocarpa extract (ECM) as a new efficient and ecologically friendly corrosion inhibitor for copper in nitric acid: Experimental and theoretical approach". *Journal of the Taiwan institute of Chemical engineers* (142), 104633. <https://doi.org/10.1016/j.jtice.2022.104633>.
- [7] Benachour, N., Delimi, A., Allal, H., Boublia, A., Sedik, A., Ferkous, H. (2024). Dimethoxy phenyl thiosemicarbazone as an effective corrosion inhibitor of copper under acidic solution: comprehensive experimental, characterization and theoretical investigations. *RSC Advances* (14), 12533–55. <https://doi.org/10.1039/D3RA08629A>.
- [8] You, C., Chuai, Y., Briggs, S., Orazem, M. (2023). "Model for corrosion of copper in a nuclear waste repository". *Corrosion science journal* (226), 111658. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2023.111658>.
- [9] Brusic, V., Frisch, M. A., Eldridge, B. N., Novak, F. P., Kaufman, F. B., Rush, B. M. (1991). "Copper corrosion with and without inhibitors". *Journal of Electrochemical society* (138), 2253–9. <https://doi.org/10.1149/1.2085957>.
- [10] Talat H. A., Hatem G. M., Nagwa H. A. (2024). "Scientific methods for preserving archaeological metal artifacts in Egyptian museum environments". *Journal of Nuclear technology in Applied science* (12), 7–14. <https://doi.org/10.48165/jntas.2024.12.2>.
- [11] Fateh, A., Aliofkhazraei, M., Rezvanian, A. R. (2020). "Review of corrosive environments for copper and its corrosion inhibitors". *Arabian journal of Chemistry* (13), 481–544. <https://doi.org/10.1016/j.arabj.2017.05.021>.
- [12] Clarelli F, De Filippo B, Natalini R. (2014). "Mathematical model of copper corrosion". *Apply Math Model* (38), 4804–16. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2014.03.040>.
- [13] Zhang R, Zhang J, Schmidt R, Gilbert JL. (2024). "Mechanistic modeling of copper corrosions in data

- center environments". *Building simulation* (17), 483–92. <https://doi.org/10.1007/s12273-023-1088-z>.
- [14] Wang W, Luo J, Guo L, Guo Z, Su Y. (2015). "Finite element analysis of stress corrosion cracking for copper in an ammoniacal solution". *Rare Metal* (34), 426–30. <https://doi.org/10.1007/s12598-015-0497-2>.
- [15] Wang X, Yang Z, Zhang G, Zhang J, Liu P. (2023). Simulation, Prediction, and Verification of the Corrosion Behavior of Cu-Ag Composite Sintered Paste for Power Semiconductor Die-attach Applications. *IEEE 73rd Electronic Components and Technology Conference (ECTC)* (p. 1982–8). USA: IEEE. <https://doi.org/10.1109/ECTC51909.2023.00341>.
- [16] Hai, N. T. N., Nhung, N. T., Long, D. N. K., Binh, D. H., Huy, P. P. A., Kim M., Prabhakar Vattikuti S. V., Nam, N. D. (2025). "Self-formation of naturally incorporated praseodymium and copper oxide/hydroxide layer on the copper surface in a saline solution". *Ceramic International* (51), 37398–37411. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2025.05.446>.
- [17] Bansal, R. K., Goel, A. K., Sharma, M. K. (2009). *MATLAB and its applications in engineering*. India: Pearson Education.
- [18] Gourav C., Gurpreet S. (2020). "Comparative analysis of corrosion behaviour of stainless steel grades 304 and 316l for different applications". *I-manager's Journal on Material Science* (7), 8-22. <https://doi.org/10.26634/jms.7.4.16094>.
- [19] ASTM. (2024). *Standard test method for measurement of fatigue crack growth rates*. USA: ASTM. <https://doi.org/10.1520/E0647-24>.
- [20] ACI Committee 224. (2002). *ACI PRC-224-01: Control of Cracking in Concrete Structures*. USA: ACI.
- [21] Ted L. A. (2005). *Linear Elastic Fracture Mechanics*. USA: CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781420058215-7>.
- [22] Hohnbaum, C. C. (2019). *Fracture toughness and fatigue crack growth rate characterization of in 718 formed by laser powder bed fusion*. Ohio, USA: Air Force Institute of Technology.
- [23] Liu, H., Yan, J., Li, A., He, Z., Xie, Y., Yan, H., Dawei, H. (2024). "A relationship between fracture toughness K_{IC} and energy release rate G_C according to fracture morphology analysis". *Crystals* (14), 740. <https://doi.org/10.3390/cryst1408074>.