ĐÁNH GIÁ HIỆN TRẠNG ĂN MÒN KẾT CẤU THÉP CÔNG TRÌNH VÙNG BIỂN VÀ ĐỀ XUẤT BIỆN PHÁP SƠN PHỦ ĐẢM BẢO ĐỘ BỀN TRÊN 15 NĂM

ASSESSMENT OF THE CORROSION CONDITION OF STEEL STRUCTURES IN COASTAL INDUSTRIAL FACILITIES AND PROPOSAL OF COATING MEASURES TO ENSURE A SERVICE LIFE EXCEEDING 15 YEARS

Lê Phú Thắng[1], Đào Duy Đức[2]

Viện Khoa học công nghệ xây dựng

Email: [1]thang.anmon@gmail.com, 0989 836 586; [2]duyduc062694@gmailcom, 0983 560 956

DOI: https://doi.org/10.59382/hnkh17-ibst.2025.ses1-17

TÓM TẮT: Các công trình công nghiệp ven biển chịu tác động ăn mòn mạnh do khí hậu nhiệt đới ẩm và hơi muối, làm giảm nhanh tuổi thọ kết cấu thép. Nghiên cứu này đánh giá thực trạng ăn mòn tại Kho than Nhà máy Nhiệt điện Duyên Hải 3 và đề xuất giải pháp kỹ thuật nhằm đảm bảo tuổi thọ bảo vệ trên 15 năm. Phương pháp gồm đo siêu âm chiều dày thép, kiểm tra chiều dày màng sơn, thử nghiệm độ bám dính nhổ giật và phân tích môi trường ăn mòn. Kết quả cho thấy nhiều vị trí giảm chiều dày > 60%, lớp sơn hiện hữu chỉ đạt 180 - 200 µm so với yêu cầu 350 µm và độ bám dính 2 - 3 MPa, dưới mức ≥ 5 MPa. Nguyên nhân chính là môi trường biển khắc nghiệt, bụi muối và chi tiết dễ ứ đọng nước. Giải pháp đề xuất gồm hệ sơn ba lớp dày 450 µm, xử lý bề mặt Sa 2.5, mạ kẽm, cải tiến thiết kế và bảo trì định kỳ. Ứng dụng thực tế tại Nhà máy Nhiệt điện Duyên Hải 1 cho kết quả tốt, khẳng định hiệu quả trong kéo dài tuổi thọ công trình ven biển.

TỪ KHÓA: ăn mòn, kết cấu thép, công trình ven biển, lớp phủ chống ăn mòn.

ABSTRACT: Coastal industrial facilities are subjected to severe corrosion due to the humid tropical climate and saline aerosols, which rapidly shorten the service life of steel structures. This study assesses the current corrosion condition at the Coal Yard of the Duyen Hai 3 Thermal Power Plant and proposes technical solutions to ensure a protective service life of more than 15 years. The methods include ultrasonic measurement of steel thickness, coating dry film thickness inspection, pull-off adhesion testing, and analysis of the corrosive environment. The results show that many locations exhibit thickness loss exceeding 60%; the existing coating achieves only 180 - 200 µm compared with the specified 350 µm; and adhesion values of 2 - 3 MPa are below the ≥ 5 MPa requirement. The primary causes are the harsh marine environment, salt-laden dust, and details prone to water retention. The proposed measures comprise a three-coat system with a total thickness of 450 µm, surface preparation to Sa 2.5, galvanizing, design improvements, and periodic maintenance. Practical application at the Duyen Hai 1 Thermal Power Plant yielded favorable outcomes, confirming the effectiveness of these measures in extending the service life of coastal structures.

KEYWORDS: corrosion, steel structures, coastal environment, protective coatings.

1. GIỚI THIỆU

Kết cấu thép đóng vai trò quan trọng trong nhiều công trình xây dựng và hạ tầng kỹ thuật tại Việt Nam, đặc biệt là các công trình ven biển và công nghiệp. Tuy nhiên, hiện tượng ăn mòn do tác động của môi trường biển, khí quyển ẩm ướt và hàm lượng muối cao đã gây ra nhiều hư hỏng nghiêm trọng, làm giảm tuổi thọ và độ an toàn của công trình. Theo Di Sarno chi phí toàn cầu do ăn mòn lên đến trung bình 2,5 nghìn tỷ USD (chiếm trung bình 3,4% GDP toàn cầu) [1], phần lớn do các kết cấu ngoài trời không được bảo vệ tốt. Trong đó, vùng ven biển là "thành phần điện phân cực tốt" (electrolyte) khiến ăn mòn diễn ra mạnh hơn, khi nước biển và sương muối chứa NaCl liên tục làm màng sơn mỏng ẩm ướt và cọ xát oxy. Theo nghiên

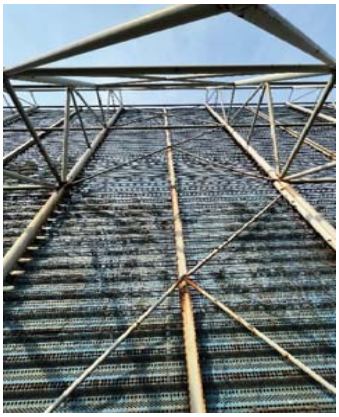
cứu của Viện Khoa học Công nghệ Xây dựng (IBST), chi phí sửa chữa do ăn mòn kết cấu thép trong môi trường biển có thể chiếm tới 30 - 70% tổng mức đầu tư xây dựng công trình [2]. Đặc biệt, các vùng như Trà Vinh, Bình Thuận và Vũng Áng ghi nhận nhiều trường hợp kết cấu thép bị gỉ sét, giảm khả năng chịu lực và mất an toàn. Ở Việt Nam, khảo sát của Lê Thị Hồng Liên (2017) cho thấy thời gian ẩm ướt cao (time of wetness) và nồng độ Cl^- trong không khí là yếu tố đẩy nhanh ăn mòn thép carbon [3]. Thực trạng này đặt ra nhu cầu đánh giá chính xác hiện trạng ăn mòn tại nhà máy nhiệt điện ven biển (điển hình tại Nhà máy Nhiệt điện Duyên Hải 3), Môi trường ven biển (độ ẩm cao, hơi muối chứa Cl^-, nhiệt độ lớn) thúc đẩy ăn mòn điện hóa nhanh làm giảm chiều dày và độ bền của thép. Tiêu chuẩn bảo vệ chống ăn mòn (ISO 12944) phân loại mức bền Cao là > 15 năm cho môi trường biển; thực tiễn cho thấy để đạt mức này cần hệ phủ chuyên dụng hoặc hệ duplex (mạ kẽm + sơn) với tổng NDFT thực tế khoảng 400 - 450 µm và xử lý bề mặt Sa2.5. Do đó, mục tiêu ≥ 15 năm là cần thiết về mặt kỹ thuật và kinh tế để giảm tần suất sửa chữa và đảm bảo an toàn khai thác trong điều kiện biển khắc nghiệt do đó bài báo đề xuất biện pháp công nghệ để đảm bảo tuổi thọ ≥ 15 năm. Nghiên cứu này tập trung khảo sát giảm chiều dày thép, độ dày và độ bám dính màng sơn ở Duyên Hải 3, phân tích nguyên nhân ăn mòn, và đề xuất hệ sơn/lớp phủ và quy trình bảo vệ phù hợp. Các nghiên cứu trước đây đã đề xuất nhiều giải pháp chống ăn mòn như sơn phủ bảo vệ, mạ kẽm nhúng nóng, bảo vệ catốt và sử dụng vật liệu chống ăn mòn [4]. Tuy nhiên, việc áp dụng các giải pháp này chưa đồng bộ và hiệu quả còn hạn chế, đặc biệt trong việc đảm bảo tuổi thọ chống ăn mòn trên 15 năm. Gần đây, một số nghiên cứu đã tập trung vào việc phát triển các loại sơn chống ăn mòn chất lượng cao, sử dụng phụ gia nano, nhằm nâng cao hiệu quả bảo vệ kết cấu thép trong môi trường khắc nghiệt [5]. Tuy nhiên, vẫn cần có những nghiên cứu thực nghiệm và đánh giá toàn diện để xác định hiệu quả lâu dài của các giải pháp này trong điều kiện thực tế tại Việt Nam. Để giải quyết thực trạng trên, nghiên cứu này triển khai phương pháp tiếp cận ba giai đoạn. Đầu tiên, công tác đánh giá hiện trạng ăn mòn được thực hiện tại Nhà máy Nhiệt điện Duyên Hải 3 thông qua khảo sát thực địa: đo chiều dày kết cấu thép bằng thiết bị siêu âm, kiểm tra độ dày màng sơn theo ISO 19840, và thử nghiệm độ bám dính sơn phủ bằng phương pháp nhổ giật (ASTM D4541). Sau đó, nguyên nhân ăn mòn được phân tích dựa trên tổ hợp yếu tố môi trường (độ ẩm, nồng độ Cl^-, thời gian ẩm ướt), đặc điểm thiết kế kết cấu dễ ứ đọng nước mặn và chất lượng lớp phủ hiện hữu. Cuối cùng, giải pháp đồng bộ được đề xuất bao gồm: ứng dụng hệ sơn chuyên dụng 3 lớp (lót/giữa/phủ) tổng dày 450µm, xử lý bề mặt bằng phun cát đạt chuẩn, mạ kẽm nhúng nóng bổ sung (TCVN 5408:2007) cho chi tiết phù hợp, cải tiến thiết kế giảm bẫy muối, và thiết lập quy trình bảo trì định kỳ 3 - 5 năm (ISO 12944-8) - nhằm đảm bảo tuổi thọ thiết kế ≥ 15 năm với hiệu quả kinh tế tối ưu.

2. ĐỐI TƯỢNG VÀ PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1. Đối tượng nghiên cứu

Đối tượng nghiên cứu bao gồm các kết cấu thép thuộc Kho than Nhà máy Nhiệt điện Duyên Hải 3 trong đó bao gồm:

Kết cấu thép khu vực tường chắn gió bị gỉ sét bao gồm các tấm chắn gió, kết cấu thép ống đỡ tường chắn gió, kết cấu thép hình như Hình 1a Kết cấu các cột thép ống giàn mái không gian bao gồm hệ giàn không gian và mái tôn như Hình 1b.



a) Kết cấu thép khu vực tường chắn gió

b) Kết cấu thép giàn mái không gian

Hình 1: Các dạng ăn mòn kết cấu tại Nhà máy Nhiệt điện Duyên Hải 3

2.2. Phương pháp kiểm tra chiều dày kim loại

Phương pháp siêu âm (Ultrasonic Thickness Measurement) là kỹ thuật kiểm tra không phá hủy sử dụng sóng siêu âm để đo chính xác chiều dày của các vật liệu kim loại, bao gồm kết cấu thép. Phương pháp này giúp xác định mức độ ăn mòn, mài mòn hoặc khuyết tật làm giảm độ dày thực tế của vật liệu thép mà không cần tháo rời hay làm hư hại kết cấu.

a. Thiết bị

Máy đo siêu âm Landtek TM-8818 đo chiều dày từ 0,75 đến 400 mm trên thép với độ chính xác cao (± 0.5% + 0,1 mm). Máy có khả năng điều chỉnh vận tốc âm (500 - 9000 m/s) để phù hợp với nhiều loại vật liệu như gang, nhôm, đồng, nhựa cứng. Thiết bị đi kèm đầu dò, gel tiếp âm (couplant) và khối chuẩn để hiệu chuẩn.

b. Phương pháp thực hiện

Quy trình đo chiều dày kim loại bằng máy siêu âm Landtek TM-8818 được thực hiện như sau: trước hết, chọn điểm đo đại diện trên bề mặt đã được làm sạch kỹ (loại bỏ gỉ sét, sơn và dầu mỡ) rồi bôi một lớp mỏng couplant để đảm bảo tiếp xúc sóng, sau đó khởi động máy và hiệu chuẩn bằng mẫu chuẩn có độ dày và vật liệu tương tự; khi màn hình hiển thị giá trị đúng, đặt đầu dò vuông góc, giữ cố định trên bề mặt, máy sẽ phát sóng siêu âm và thu lại tín hiệu phản hồi (echo), đo thời gian đi - về của sóng và tính chiều dày theo công thức:

$$d = \frac{c \times t}{2} \quad (1)$$

Trong đó:

c - vận tốc âm trong vật liệu;

t - thời gian truyền.

Cuối cùng, đọc và ghi lại giá trị đo cùng vị trí, lặp lại vài lần để kiểm chứng độ ổn định, so sánh với độ dày thiết kế để đánh giá mức ăn mòn và kết thúc bằng thao tác vệ sinh đầu dò, tắt máy và cất giữ thiết bị.

2.3. Phương pháp đo chiều dày màng sơn

a. Thiết bị

Máy đo chiều dày lớp phủ GTS820F (GUOOU) dạng cầm tay, sử dụng nguyên lý cảm ứng từ hoặc dòng điện xoáy để đo không phá hủy chiều dày màng sơn trên kim loại. Thiết bị gồm thân máy tích hợp mạch điện tử, pin sạc và màn hình LCD hiển thị kết quả; đầu dò gắn qua cáp mềm, có cảm biến nhạy để xác định khoảng cách từ lớp sơn đến nền thép; bộ miếng chuẩn độ dày (100 - 200 µm) phục vụ hiệu chuẩn với độ chính xác ± 1% hoặc ± 1 µm. Máy kèm hộp bảo vệ chắc chắn, có cấu trúc gọn nhẹ, dễ sử dụng, thích hợp cho kiểm tra hiện trường và bảo trì nhanh kết cấu thép đã sơn phủ.

b. Phương pháp thực hiện

Để đo độ dày màng sơn bằng GUOOU GTS820F, trước hết gắn đầu dò phù hợp (F, N hoặc FNF) vào thân máy và bật nguồn, rồi vào menu để chọn chế độ đo (Immediate, Batching hoặc Scan) tùy nhu cầu. Tiếp đó, thực hiện hiệu chuẩn: đặt đầu dò lên bề mặt kim loại trống để zero, rồi theo phương pháp hai điểm (2-point) sử dụng hai tấm mẫu chuẩn (foil) dày mỏng khác nhau, làm theo hướng dẫn trên màn hình để máy ghi nhận và tính toán hệ số hiệu chỉnh. Khi hiệu chuẩn hoàn tất, đặt đầu dò vuông góc, giữ ổn định và chạm nhẹ lên lớp sơn đã bôi couplant, máy sẽ hiển thị ngay giá trị độ dày trong tích tắc; với chế độ Batching, bạn có thể lưu nhóm readings vào bộ nhớ (lên đến 150 000 giá trị) và đặt tên batch để quản lý. Cuối cùng, đọc kết quả, xuất dữ liệu qua USB/Bluetooth hoặc Infra-red, rồi lau sạch đầu dò và tắt máy.

2.4. Phương pháp kiểm tra độ bám dính sơn bằng phương pháp nhổ giật (pull-off)

a. Thiết bị

Bộ thiết bị thử độ bám dính lớp phủ PosiTest ATM20 của DeFelsko, bao gồm máy đo kéo thủy lực tích hợp cảm biến áp suất, nguồn pin sạc NiMH cùng bộ sạc, giá đỡ tiêu chuẩn 20 mm và 20 dolly nhôm, kèm dao cắt tròn 20 mm để tạo vùng chuẩn bị trước khi dán keo. Để đảm bảo bề mặt sạch sẽ, bộ còn trang bị pad mài và bông tăm; keo epoxy ResinLab EP11HT cùng que trộn và khay pha giúp thi công đồng nhất. Sau khi đo, dữ liệu được quản lý qua phần mềm PosiSoft® và cáp USB đi kèm.

b. Phương pháp thực hiện

Để kiểm tra độ bám dính lớp phủ bằng máy PosiTest ATM20 của Defelsko, trước hết làm sạch bề mặt mẫu, đảm bảo không còn bụi bẩn hay dầu mỡ; sau đó chọn kích thước đầu dolly phù hợp, bôi keo chuyên dụng theo hướng dẫn của nhà sản xuất lên mặt đáy dolly và ép chặt lên lớp sơn ở vị trí thử, giữ cố định trong thời gian keo đạt cường độ (thường 30 - 60 phút). Khi keo đã đạt cường độ cần thiết, lắp dolly vào chỗ thử trên máy, căn chỉnh sao cho trục kéo vuông góc hoàn toàn với mặt sơn, rồi bật nguồn và chọn chế độ "Pull-Off" trên màn

hình. Máy sẽ tạo lực kéo tăng dần cho đến khi lớp phủ tách ra khỏi bề mặt, lúc này giá trị lực tối đa (MPa hoặc N/mm²) được hiển thị trên màn hình. Ghi lại kết quả cùng vị trí đo, tháo dolly làm sạch bề mặt, rồi tiến hành đo các điểm khác hoặc tắt máy. Đối với mỗi mẫu thử, nên thực hiện tối thiểu 3 lần đo để có giá trị trung bình đáng tin cậy.

3. KẾT QUẢ NGHIÊN CỨU VÀ GIẢI PHÁP XỬ LÝ

3.1. Kết quả nghiên cứu

a. Mức độ ăn mòn kết cấu

Kết quả kiểm tra chiều dày kim loại tại Nhà máy Nhiệt điện Duyên Hải 3 được trình bày trong Bảng 2-13 Kết quả kiểm tra chiều dày kim loại, Tập 2 - Báo cáo khảo sát hiện trạng thuộc Báo cáo khảo sát, đánh giá hiện trạng, kiểm định kết cấu, lập phương án kỹ thuật và dự toán sửa chữa kho than Nhà máy Nhiệt điện Duyên Hải 3 [6] cho thấy tình trạng ăn mòn nghiêm trọng, đặc biệt ở trụ đỡ giàn mái (thép ống): 37.5% vị trí (15/40 điểm đo) có chiều dày dưới 3 mm, trong đó các vị trí V15 (1.22 mm), V26 (1.16 mm) và V19 (1.72 mm) bị suy giảm trên 60% so với giá trị trung bình. Tại tường chắn gió (thép hình), 15% vị trí (3/20) có chiều dày < 3 mm (thấp nhất là V18: 2.62 mm), đồng thời xuất hiện các giá trị bất thường tại V5 (16.53 mm), V6 (16.90 mm) và V19 (15.97 mm), nguyên nhân vị trí trùng mối hàn hoặc lớp gỉ dày. Đối với kết cấu thép hình, 25% vị trí (5/20) có chiều dày thành (tw) chỉ đạt 6 mm (V7, V11-V14), dưới mức thiết kế tối thiểu (≥ 8 mm), làm tăng nguy cơ ăn mòn xuyên thủng.

Đo đạc cho thấy nhiều vị trí có suy giảm chiều dày đáng kể bị giảm từ 0,20 - 1,00 mm so với ban đầu. Kết quả này tương tự với nghiên cứu của Tsuchida [7] tại các công trình cảng biển cho thấy mức độ ăn mòn cực đại dưới mực thủy triều có thể tới > 0,93 mm/năm. Ở Nhiệt điện Duyên Hải 3, tính ra tốc độ ăn mòn trung bình khoảng 0,1 - 0,2 mm/năm (đặc biệt những vị trí luôn ẩm ướt). Hình ảnh kiểm tra như Hình 2a.

b. Chiều dày màng sơn

Kết quả kiểm tra chiều dày lớp sơn hiện trạng tại 450 vị trí bao gồm kết cấu khung giàn mái, kết cấu khung sườn tường chắn gió, kết cấu thép hình. Kết quả được thể hiện chi tiết tại Bảng 2-14: Kết quả kiểm tra chiều dày màng sơn hiện trạng trong Tập 2 - Báo cáo khảo sát hiện trạng thuộc Báo cáo khảo sát, đánh giá hiện trạng, kiểm định kết cấu, lập phương án kỹ thuật và dự toán sửa chữa kho than Nhà máy Nhiệt điện Duyên Hải 3 [6].

Khung giàn mái: phần lớn các điểm đo nằm trong khoảng 180 - 380 µm, trung bình khoảng 295 µm. Khoảng 20% mẫu chiều dày mỏng dưới 200 µm (ví dụ 173 µm, 194 µm, 197 µm), thấp hơn so với tiêu chuẩn (350 µm), dễ xảy ra chỗ bong tróc sớm; ngược lại một số vị trí dày tới 450 - 480 µm, có thể là do thi công phun sơn chồng lớp. Tổng số vị trí kiểm tra là 80, trong đó chỉ 19 vị trí (23,75%) đạt yêu cầu chiều dày tối thiểu ≥ 350 µm theo tiêu chuẩn ISO 12944-9 cho môi trường ăn mòn CX. Số vị trí không đạt chiếm tỷ lệ cao (76,25%), bao gồm 18 vị trí có chiều dày dưới 200 µm và một vị trí nghiêm trọng (Vị trí 57: 0 µm) cho thấy khả năng bong tróc hoàn toàn lớp sơn. Các vị trí như 72 (185 µm), 79 (192 µm) và 59 (210 µm) cần được ưu tiên sơn lại do nguy cơ ăn mòn cao, phản ánh sự phân bố không đồng đều và khả năng bảo vệ kém của hệ thống sơn hiện tại.

Khung sườn tường chắn gió: kết quả đo dao động rất rộng, từ 45 µm đến 494 µm, với trung bình chỉ khoảng 260 µm. Gần 30% mẫu dưới 150 µm - đặc biệt ở các vai nối và cạnh tấm - cho thấy lớp lót Epoxy bị bỏ sót hoặc keo đóng rắn không đầy đủ. Trong khi đó, một vài vị trí lên tới gần 500 µm cho thấy sơn quá dày cục bộ, có thể gây rạn nứt khi co ngót. Trong 280 vị trí kiểm tra, 74 vị trí (26,43%) đạt chuẩn chiều dày ≥ 350 µm. Tuy nhiên, có tới 206 vị trí (73,57%) không đạt yêu cầu, đặc biệt đáng báo động là 45 vị trí có chiều dày dưới 100 µm (ví dụ: Vị trí 47: 44,0 µm; Vị trí 93: 44,0 µm; Vị trí 6: 60,9 µm; Vị trí 225: 56,5 µm). Những vị trí này tập trung nhiều ở khu vực giữa và cuối bảng (Vị trí 191-277), cho thấy sự xuống cấp nghiêm trọng, có thể do quá trình thi công sơn không đảm bảo, bề mặt chưa được xử lý kỹ hoặc ảnh hưởng của môi trường.

Kết cấu thép hình: với độ dày sơn trung bình vào khoảng 280 µm. Khoảng 15 % mẫu dưới 150 µm, tập trung ở các chi tiết nhỏ và mép cắt; phần còn lại phân bố đều quanh 200 - 350 µm. Kết cấu này có tỷ lệ đạt thấp nhất với chỉ 17/94 vị trí (18,09%) đạt ≥ 350 µm. Đáng chú ý, 21 vị trí có chiều dày dưới 100 µm, trong đó 4 vị trí dưới 80 µm (Vị trí 6: 67,0 µm; Vị trí 7: 67,0 µm; Vị trí 76: 78,2 µm; Vị trí 77: 93,9 µm). Các vị trí như Vị trí 4 (93,9 µm), Vị trí 34 (89,0 µm) và Vị trí 43 (73,5 µm) thể hiện sự hư hỏng cục bộ nghiêm trọng, cần sơn lại khẩn cấp để tránh ăn mòn lan rộng.

a) Đo chiều dày kim loại của kết cấu thép

b) Thí nghiệm hiện trường đo chiều dày màng sơn

c) Kiểm tra bám dính màng sơn

Hình 2: Thí nghiệm hiện trường

Theo kết quả đo chiều dày màng sơn hiện trạng, ta có thể nhận thấy: Mặc dù giá trị trung bình gần đạt yêu cầu thiết kế (Bằng 80% so với chiều dày 350 µm), tỷ lệ mẫu có chiều dày nhỏ hơn 200 µm là quá lớn (khoảng 25 - 30%), đặc biệt ở khung sườn chắn gió. Để đảm bảo tuổi thọ lớp phủ ≥ 15 năm, cần khắc phục ngay các vị trí mỏng bằng cách phun bổ sung 1 - 2 lớp sơn, đồng thời áp dụng kiểm soát quy trình thi công chặt chẽ hơn (đảm bảo độ ẩm ≤ 80%, đo độ dày tức thời và hiệu chỉnh trước khi sơn lớp tiếp theo).

Nguyên nhân khách quan của việc chiều dày lớp sơn không đảm bảo yêu cầu là do ăn mòn muối biển: Kết cấu nằm trong vùng biển khiến muối (Cl^-) bám dày đặc trên bề mặt, thẩm thấu vào khe hở màng sơn, đẩy nhanh quá trình oxy hóa thép. Điều này giải thích sự xuống cấp nghiêm trọng tại các vị trí như Vị trí 47 (44.0 µm), Vị trí 93 (44.0 µm) ở khung sườn tường. Ngoài ra vấn đề nước đọng tại hốc kết cấu cũng làm gia tăng suy giảm màng sơn: Nước mưa/bắn sóng tích tụ tại góc khuất (mối hàn, mép tấm) tạo môi trường điện ly, gây ăn mòn cục bộ dưới lớp sơn (thể hiện qua các vị trí ≤ 50 µm như Vị trí 57, 191, 193). Các nguyên nhân chủ quan như chuẩn bị bề mặt không đạt chuẩn: Gỉ, dầu mỡ chưa được làm sạch triệt để (cấp độ Sa 2.5), dẫn đến sơn không bám dính. Thi công sơn trong điều kiện ẩm/gió mạnh: Làm giảm khả năng lan trải của sơn, tạo vết rỗ hoặc vùng mỏng cục bộ (ví dụ: chênh lệch lớn giữa STT 5: 365 µm và STT 6: 60.9 µm). Không xử lý hốc kết cấu: Các vị trí góc chết (gân tăng cứng, lỗ thoát nước) không được phun sơn kỹ, tạo điểm yếu cho ăn mòn xâm nhập. Việc sử dụng sơn không chuyên dụng cho môi trường biển: Thiếu thành phần chống muối (ví dụ: sơn epoxy kẽm silicat) dẫn đến nhanh lão hóa. Công tác giám sát không liên tục: không đo chiều dày sơn sau mỗi lớp phủ, bỏ sót khu vực khó tiếp cận. Hình ảnh thí nghiệm hiện trường như Hình 2b.

c. Độ bám dính lớp sơn

Các kết quả đo độ bám dính pull-off tại Bảng 2-15. Kết quả kiểm tra độ bám dính hệ sơn hiện trạng trong Tập 2 - Báo cáo khảo sát hiện trạng thuộc Báo cáo khảo sát, đánh giá hiện trạng, kiểm định kết cấu, lập phương án kỹ thuật và dự toán sửa chữa kho than Nhà máy Nhiệt điện Duyên Hải 3 [6] cho thấy sự phân hóa rõ rệt giữa các vị trí trong và ngoài nhà máy: những vị trí khuất gió, ít tiếp xúc trực tiếp với nước mặn như Khung sườn Trục W28/13 (Mẫu 2) và Khung giàn mái Trục A/10 (Mẫu 9) đạt lực nhổ giật cao nhất, 6,38 - 8,21 MPa, tương đương cấp 5B - 4B theo tiêu chuẩn ASTM D4541/TCVN 2098. Trong khi đó, một số vị trí ngoài trời chịu ướt đọng liên tục, ví dụ Khung giàn mái Trục D/5-6 (Mẫu 1) chỉ 1,52 MPa và Khung sườn chắn gió Trục E01/33 (Mẫu 18) chỉ 1,32 MPa - nằm dưới ngưỡng 3 MPa, chứng tỏ lớp sơn mất liên kết với mặt thép rất nhanh.

Nguyên nhân chủ yếu dẫn đến độ bám dính kém tập trung ở các vấn đề về xử lý bề mặt và điều kiện thi công. Trước hết, việc phun cát để làm sạch chỉ dừng ở mức Sa 2.0 - 2.5 (chưa đạt Sa 2.5 - 3.0 theo ISO 8501-1) khiến bề mặt còn sót gỉ mạt và dầu mỡ, giảm diện tích tiếp xúc giữa keo và thép. Thứ hai, nhiều vị trí thép nằm ở các góc nối, khe hở dễ đọng nước mặn và bụi muối, khiến bề mặt luôn trong trạng thái ẩm, ngăn cản keo đóng rắn hoàn chỉnh. Thứ ba, thi công sơn trong điều kiện không khí ẩm trên 85% cũng làm giảm hiệu năng của lớp lót Epoxy, dẫn đến liên kết keo - kim loại suy yếu.

Khi độ bám dính pull-off dưới 3 MPa, lớp sơn bắt đầu bong tróc chỉ sau 1 - 2 năm, để lộ bề mặt thép trực tiếp với không khí và muối biển, từ đó ăn mòn sâu dần và gây giảm chiều dày kim loại nhanh chóng. Ngược lại, ở những vị trí giữ được độ bám trên 6 MPa, màng sơn duy trì ổn định ít nhất 5 - 7 năm trước khi xuất hiện vết nứt hoặc bong tróc; điều này cho phép kéo dài chu kỳ bảo trì, giảm đáng kể chi phí sửa chữa và đảm bảo tuổi thọ kết cấu trên 15 năm. Hình ảnh kiểm tra như Hình 2c.

d. Đánh giá mức độ ăn mòn và khả năng chịu lực

Mục tiêu: xác định chính xác tiết diện còn lại và khả năng chịu lực cục bộ/toàn hệ trước khi tiến hành sơn phủ bảo vệ.

Quy trình kiểm tra và đánh giá (bước-bước):

Bước 1: Đo và lập bản đồ ăn mòn

Đo siêu âm chiều dày (UT) toàn diện các thanh/tấm quan trọng; mỗi vị trí đo ≥ 3 lần và trên mỗi thanh ≥ 5 - 10 điểm đo tùy kích thước; tạo bản đồ phân bố độ dày còn lại.

Ghi lại vị trí theo lưới/điểm đo trên bản vẽ để đối chiếu khi gia cường/thay thế.

Bước 2: Phân loại mức độ tổn hại

- Tính tỉ số còn lại $R = t_{hiện\ tại}/t_{thiết\ kế}$

- Phân loại đề xuất (nguyên tắc):

+ Nhóm A (thay thế): $R \leq 0.30$ hoặc có thủng xuyên; hoặc ứng suất tính toán vượt rõ ràng so với giới hạn cho phép.

+ Nhóm B (gia cường): $0.30 < R \leq 0.60$ hoặc xuất hiện giảm dày > 40% tại vị trí chịu lực/nút quan trọng.

+ Nhóm C (sửa chữa bề mặt và sơn): $R > 0.60$ và không có dấu hiệu mất ổn định cục bộ.

(Ngưỡng có thể điều chỉnh theo kết quả kiểm tra thực tế và yêu cầu thiết kế.)

Bước 3: Kiểm tra khả năng chịu lực cục bộ

- Với từng thanh/tấm thuộc Nhóm A & B, thực hiện tính toán kiểm tra tiết diện thực tế theo phương pháp đã dùng trong Tập 3 (áp dụng các tổ hợp tải trọng tiêu chuẩn).

- Yêu cầu: ứng suất tính toán σ_{calc} không vượt quá σ_{amd} theo TCVN/thiết kế (áp dụng hệ số an toàn/γc).

- Nếu $\sigma_{calc} > \sigma_{amd}$ → cần thay thế hoặc gia cường.

- Với số lượng lớn cấu kiện bị ảnh hưởng, khuyến nghị chạy lại phân tích toàn khung (FE/Etabs) với tiết diện thực tế để kiểm tra phân bố nội lực.

Bước 4: Biện pháp xử lý trước khi sơn

Ưu tiên xử lý kết cấu (nhóm A và B) trước: thay thế cấu kiện mất an toàn; gia cường bằng bản mã, ống bọc, hàn đắp hoặc gia cố liên kết theo thiết kế.

Trước tiến hành sơn toàn bộ: tất cả cấu kiện nhóm A/B phải được xử lý và đạt điều kiện kiểm tra kết cấu.

3.2. Nguyên nhân

Hệ sơn thiết kế tại kết cấu thép Kho than Nhà máy Nhiệt điện Duyên Hải 3 gồm ba lớp: (i) lớp sơn lót epoxy không chứa kẽm Jotun Jotamastic 80 với chiều dày danh định 145 µm; (ii) lớp sơn trung gian epoxy Jotun Jotamastic 80 dày 145 µm; và (iii) lớp sơn phủ polyurethane Jotun Hardtop XP 80 dày 60 µm. Tổng chiều dày danh định của hệ sơn là 350 µm. Tuy nhiên, theo ISO 12944-5:2019, để đạt được mức độ bền cao (H, > 15 năm) trong môi trường ăn mòn CX (coastal - rất khắc nghiệt), chiều dày màng khô danh nghĩa (NDFT) yêu cầu tối thiểu là 360 µm. Hơn nữa, theo ISO 19840:2012, để đảm bảo đạt được NDFT này trong thực tế thi công, tổng chiều dày trung bình của các lớp sơn phải đạt khoảng 450 µm. Như vậy, có thể thấy hệ sơn theo thiết kế ban đầu tại Duyên Hải 3 chưa đáp ứng yêu cầu của ISO 12944:2019 và do đó tiềm ẩn nguy cơ không đạt tuổi thọ bảo vệ > 15 năm trong môi trường biển khắc nghiệt.

Nguyên nhân ăn mòn kết cấu thép tại các công trình biển chủ yếu là do tác nhân môi trường biển kết hợp với các yếu tố thiết kế - thi công và vật liệu:

Muối biển (ion Na^+ và Cl^-): Tác nhân chính gây ăn mòn theo cơ chế điện hoá. Hơi muối từ biển bám lên bề mặt thép, tạo thành màng muối khi có độ ẩm, phá vỡ lớp sơn bảo vệ và tham gia phản ứng oxy hoá. Tác giả Mayuly Rodríguez (2023) [8] nhấn mạnh rằng độ mặn (salinity) cao làm gia tăng tốc độ oxy hoá bằng cách tạo ra các tế bào điện hoá cục bộ mạnh. Trong khí hậu Việt Nam nóng ẩm, các ion clorua đi sâu vào lớp sơn hoặc lỗ rỗng trên bề mặt, đẩy nhanh pitting và gỉ sét.

Độ ẩm và oxy: Môi trường ven biển có độ ẩm không khí cao và lượng mưa lớn. Độ ẩm cao tạo điều kiện dẫn điện tốt cho dòng điện ăn mòn, trong khi oxy trong không khí thúc đẩy phản ứng hình thành oxit sắt. Mayuly Rodríguez (2023) [8] phân tích rằng không khí ẩm, oxy và nhiệt độ cao làm tăng mạnh tốc độ ăn mòn kim loại. Ở Duyên Hải 3, lượng muối bám chặt trên bề mặt càng khiến độ ẩm đọng lâu, tạo môi trường ưu thích cho gỉ sét.

Nhiệt độ: Nhiệt độ cao (miền Nam Việt Nam quanh năm nóng ẩm) gia tăng nhanh phản ứng hoá học. Nhiệt độ cao ở vùng biển nhiệt đới làm tăng nhanh quá trình oxy hóa và ăn mòn bề mặt.

Thiết kế kết cấu và thi công: Các chi tiết không được bảo vệ tốt hoặc dễ đọng nước mặn sẽ gia tăng ăn mòn. Ví dụ, các khe hở hàn, vị trí nối mặt bích giữa các ống thép và thép hình, đai thép giằng thẳng đứng... đều chịu ăn mòn đỉnh. TCVN 12705-1:2021 lưu ý rằng nếu kết cấu không tiếp cận được với biện pháp bảo vệ (hay bị che khuất), cần thiết kế bộ phận dự phòng hoặc cho phép ăn mòn một mức nhất định. Tại Duyên Hải 3, một số mối ghép kín dễ đọng muối và ẩm, dẫn đến hư hỏng trước.

Cường độ dòng điện và pH môi trường: Mặc dù không có chất thải công nghiệp ăn mòn hay dòng điện rò trực tiếp, nước biển tự nhiên của vùng ven biển vốn kiềm và chứa Cl^- là đủ tác động.

3.3. Đề xuất giải pháp kỹ thuật và kết quả đạt được

a. Giải pháp

Để đảm bảo tuổi thọ > 15 năm cho kết cấu thép vùng ven biển, nghiên cứu đề xuất áp dụng hệ thống giải pháp đồng bộ. Trọng tâm là hệ sơn phủ chuyên dụng có khả năng chống ăn mòn cao, tổng chiều dày trung bình 450 µm và độ bám dính tốt. Cấu tạo hệ sơn gồm: (i) lớp lót VT-ST01 dày trung bình 125 µm có phụ gia nano siêu mịn nhằm lấp đầy lỗ rỗng và tăng cường độ bám dính; (ii) lớp trung gian VT-EP02 dày trung bình 185 µm là sơn epoxy hàm lượng chất rắn cao, tạo lớp màng đặc chắc ngăn ngừa ion Cl^-, SOx; và (iii) lớp phủ Cleanthan 3000 dày trung bình 140 µm, có khả năng chịu tia UV và tác động của muối biển. Các thử nghiệm được chỉ ra tại Bảng 1, Bảng 2 và Bảng 3 cho thấy cả ba loại sơn đều đạt hoặc vượt các chỉ tiêu kỹ thuật về độ bám dính, độ bền mù muối, độ bền nhiệt ẩm và khả năng kháng hóa chất. Tổng thể hệ sơn được thiết kế đáp ứng tiêu chuẩn ISO 12944 cho môi trường CX, với chế độ bảo hành lên tới 20 năm trong điều kiện ven biển.

Bảng 1: Thông số kỹ thuật của sơn lót VT-ST01

TT	Tên chỉ tiêu	Đơn vị	Giá trị yêu cầu	Kết quả	Phương pháp thử
1	Độ bám dính trên nền thép (Sa 2.5)	MPa	≥ 5,0	7,5	ASTM D4541
2	Độ cứng màng sơn	loại	F	F	JIS K5400
3	Độ bền va đập	kg.cm	≥ 50	50	TCVN 2100:2
4	Độ bền nhiệt ẩm	giờ	≥ 720	1.000	ASTM D4585
5	Độ bền mù muối	giờ	≥ 1.440	1.440	ASTM B117
6	Độ bền ngâm màng trong nước muối 5%	--	không thay đổi	không thay đổi	TCVN 9014:2011
7	Hàm lượng chất rắn	%	≥ 70	71	TCVN 9065:2012

Bảng 2: Thông số kỹ thuật của sơn trung gian VT-EP02

TT	Tên chỉ tiêu	Đơn vị	Giá trị yêu cầu	Kết quả	Phương pháp thử
1	Độ bám dính trên nền thép (Sa 2.5)	MPa	≥ 5,0	7,2	ASTM D4541
2	Độ bền va đập	kg.cm	≥ 50	50	TCVN 2100:2
3	Độ bền nhiệt ẩm	giờ	≥ 720	1.000	ASTM D4585
4	Độ bền mù muối	giờ	≥ 1.440	1.440	ASTM B117
5	Chịu hóa chất	--	không phá hủy	không phá hủy	ASTM D3912
6	Hàm lượng chất rắn	%	≥ 55	81	TCVN 9065:2012

Bảng 3: Thông số kỹ thuật của sơn phủ Cleanthan 3000

TT	Tên chỉ tiêu	Đơn vị	Giá trị yêu cầu	Kết quả	Phương pháp thử
1	Chịu mài mòn	mg	≤ 60	55	ASTM D1242
2	Chịu hóa chất	--	không phá hủy	không phá hủy	ASTM D3912
3	Độ bền nhiệt ẩm	giờ	≥ 720	1.000	ASTM D4585
4	Độ bền mù muối	giờ	≥ 720	1.000	ASTM B117
5	Hàm lượng chất rắn	%	≥ 50	65	TCVN 9065:2012
6	Độ bám dính trên nền thép (Sa 2.5)	MPa	≥ 5,0	7,2	ASTM D4541
7	Thử nghiệm lão hóa theo chu kỳ	h	≥ 1680		ISO 12944-6:2018

Xử lý bề mặt trước khi sơn: Tiến hành phun cát đạt độ sạch Sa 2.5 hoặc SSPC SP10 cho bề mặt thép, loại bỏ hoàn toàn gỉ cũ, dầu mỡ và cặn bám. Sau khi phun, đo độ sạch bề mặt (độ bám bẩn, cấp 2 theo ISO 8502-3). Đảm bảo điều kiện thi công khô, khối cầu dày đủ yêu cầu và hạn chế thi công vào thời tiết ẩm cao. Việc xử lý kỹ giúp tăng độ bám dính lớp sơn và tuổi thọ lớp phủ.

Quy trình bảo trì và kiểm định định kỳ: Ban hành quy trình bảo dưỡng theo TCVN/ISO liên quan. ISO 12944-8:2017 quy định chỉ dẫn bảo dưỡng sơn (gồm kiểm tra trạng thái màng sơn và sửa chữa). Nên lập lịch kiểm tra 3 - 5 năm/lần: quan sát tổng thể bề mặt kết cấu, đo lại độ dày sơn và kiểm tra độ bám dính, phát hiện kịp thời các vị trí bị ăn mòn vượt ngưỡng và bổ sung sơn hoặc thay thế. Đồng thời, định kỳ rửa trôi muối mặn bám trên bề mặt (rửa với nước ngọt áp lực) và bôi tác nhân chống gỉ nếu cần. Sự bảo trì liên tục sẽ ngăn ngừa gỉ lan rộng và duy trì khả năng chống ăn mòn lâu dài của lớp phủ.

b. Kết quả đạt được

Giải pháp sơn phủ chuyên dụng đã được áp dụng thực tế tại Hệ thống băng tải và tiếp nhận than Nhà máy Nhiệt điện Duyên Hải 1 cũng như Hệ thống khung dầm lò máy thi công từ năm 2021 Hình ảnh hiện trạng sau thi công như Hình 3. Sau 4 năm vận hành trong điều kiện môi trường biển khắc nghiệt, các kết cấu này vẫn duy trì chất lượng rất tốt, không ghi nhận hiện tượng bong tróc hay ăn mòn cục bộ. Kết quả thí nghiệm tại hiện trường cho thấy chiều dày màng sơn đều đạt tối thiểu 450 µm, phù hợp với yêu cầu NDFT theo ISO 12944, đồng thời độ bám dính đo được đạt từ 6,8 MPa trở lên, vượt ngưỡng tối thiểu 5,0 MPa quy định trong ASTM D4541/TCVN 2098. Những số liệu này chứng tỏ hệ sơn đề xuất đã tạo lớp bảo vệ bền chắc, có khả năng chống lại tác động của hơi muối, độ ẩm cao và tia UV. Đến thời điểm hiện tại, cả hai hệ thống vẫn được bảo vệ hiệu quả, qua đó khẳng định tính khả thi và độ tin cậy của giải pháp trong việc đảm bảo tuổi thọ kết cấu thép gần biển vượt trên 15 năm.

a) Kết cấu thép băng tải than tại tháp chuyển tiếp

b) Kết cấu thép sàn băng tải

c) Kết cấu thép khung dầm lò máy BOP

Hình 3: Ứng dụng hệ sơn của Trung tâm Tư vấn Chống ăn mòn và Xây dựng tại Nhà máy Nhiệt điện Duyên Hải 1

4. KẾT LUẬN

Khảo sát tại Nhà máy Nhiệt điện Duyên Hải 3 cho thấy các kết cấu thép gần biển đang bị ăn mòn tương đối mạnh: nhiều vị trí giảm dày kim loại đến hàng chục % và lớp sơn phủ không đồng đều, độ dày chưa đảm bảo. Nguyên nhân chủ yếu do môi trường biển nhiệt đới (độ ẩm, muối) và thiết kế dễ đọng nước gây phá hoại lớp phủ. Để đảm bảo tuổi thọ trên 15 năm, cần kết hợp sơn phủ, mạ kẽm và bảo dưỡng một cách đồng bộ: áp dụng hệ sơn chuyên dụng chống mặn cao, xử lý bề mặt kỹ lưỡng, mạ kẽm nóng cho kết cấu thích hợp, cải tiến chi tiết chống đọng nước và quy trình bảo trì định kỳ. Các biện pháp này tương ứng với tiêu chuẩn Việt Nam và quốc tế về chống ăn mòn (như TCVN 5408, TCVN 2097, ISO 12944, ISO 9223,...) và được khuyến nghị áp dụng rộng rãi cho các công trình ven biển.

LỜI CẢM ƠN

Nghiên cứu này được hỗ trợ bởi Trung tâm Tư vấn Chống ăn mòn và Xây dựng - Viện Khoa học công nghệ xây dựng (CCP-IBST). Tác giả chân thành cảm ơn sự hỗ trợ của CCP-IBST trong việc triển khai nghiên cứu và hoàn thiện bài báo này.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] Monmi Saikia, Trisha Dutta, Niteen Jadhav, Deep J. Kalita (2024). *Insights into the development of corrosion protection coatings*. Polymers 2025, MDPI, 17 (2025): 3.

[2] Nguyễn Nam Thắng, Nguyễn Mạnh Hồng, và Phan Văn Chương (2011). Đánh giá chất lượng các hệ sơn phủ chống ăn mòn kết cấu thép vùng biển Việt Nam. *Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng*, Viện Khoa học công nghệ xây dựng, 3 (2011): 1.

[3] Lê Thị Hồng Liên (2017). Tóm tắt kết quả nghiên cứu về ăn mòn khí quyển tại Việt Nam. *Tạp chí Khoa học và Công nghệ Việt Nam*, 50 (2017): 379-391.

[4] TCVN 12251 (2020). *Bảo vệ chống ăn mòn cho kết cấu xây dựng.* Bộ Xây dựng, Việt Nam.

[5] TCVN 5408 (2007) ISO 1461 (1999). *Lớp phủ kẽm nhúng nóng trên sản phẩm gang và thép - Yêu cầu kỹ thuật và phương pháp thử.* Bộ Khoa học và Công nghệ, Việt Nam.

[6] TS. Nguyễn Đăng Khoa; ThS. Trần Đức Hiếu và các cộng sự (2025). *Tập 2 - Báo cáo khảo sát hiện trạng thuộc Báo cáo khảo sát, đánh giá hiện trạng, kiểm định kết cấu, lập phương án kỹ thuật và dự toán sửa chữa kho than Nhà máy Nhiệt điện Duyên Hải 3*. Viện Khoa học Công nghệ Xây dựng, Hợp đồng số 09/HĐ-NĐDH-VKHCNXD.25.

[7] Tsuchida, I., Yokoi, Y., & Abe, T. (1985). On-site corrosion study of port structures. *Ocean Space Utilization '85* (Vol. 23, pp. 9-11). Springer-Verlag, Tokyo. Vol. 23, pp.9-11.

[8] Rodríguez (2023). Environmental factors in the corrosion of marine structures. *Inspenet* (2023).