

NGHIÊN CỨU CHẾ TẠO ROBOT PHÁT HIỆN ĂN MÒN BỒN NỔI HÌNH TRỤ ĐỨNG CHỨA XĂNG DẦU

Nguyễn Thị Lan^{1,2}, Trần Dương Tấn Quyền¹, Phạm Quốc Huy³, Nguyễn Tấn Tiến^{1,4}, Lê Văn Sỹ^{2,5}

¹Trường Đại học Bách khoa - Đại học Quốc gia Tp. Hồ Chí Minh

²Trường Đại học Dầu khí Việt Nam (PVU)

³Trường Cao đẳng Dầu khí (PV College)

⁴Phòng Thí nghiệm trọng điểm Quốc gia Điều khiển số và Kỹ thuật hệ thống (DCSELab)

⁵Tổng công ty Bảo dưỡng - Sửa chữa Công trình Dầu khí - CTCP (PVMR)

Email: ntlan.sdh231@hcmut.edu.vn

<https://doi.org/10.47800/PVSI.2025.03-08>

Tóm tắt

Bài viết giới thiệu kết quả nghiên cứu, thiết kế và chế tạo nguyên mẫu robot phát hiện ăn mòn cho thân bồn nổi hình trụ đứng chứa xăng dầu, dựa trên phương pháp kiểm tra rò rỉ đường sức từ (magnetic flux leakage - MFL). Thiết kế tổng thể, hệ thống động lực, điện, điều khiển và bộ kiểm tra rò rỉ từ đã được tính toán, thiết kế tối ưu bằng phần mềm chuyên dụng, đảm bảo các yêu cầu về an toàn cháy nổ theo quy định của IEC. Sau khi thiết kế, chế tạo, nguyên mẫu robot có trọng lượng 39 kg, vận tốc di chuyển từ 10 - 50 mm/giây.

Nguyên mẫu robot sau khi lắp ráp hoàn chỉnh đã được thử nghiệm tại xưởng trên mô hình tấm thép đứng, mô phỏng điều kiện làm việc thực tế của các bồn chứa xăng dầu. Kết quả thử nghiệm cho thấy robot đáp ứng các chỉ tiêu quan trọng: khả năng bám dính trên bề mặt thẳng đứng; di chuyển ổn định qua đường hàn có chiều cao tối đa 10 mm ở vận tốc tối đa 50 mm/giây; có khả năng phát hiện khuyết tật kích thước nhỏ với độ sâu 2 mm trên tấm thép dày đến 14 mm.

Từ khóa: Kiểm tra ăn mòn, kiểm tra không phá hủy, phương pháp rò rỉ từ thông, robot leo bồn chứa.

1. Giới thiệu

Trong lĩnh vực tồn trữ xăng dầu, sử dụng các phương pháp phù hợp trong kiểm tra ăn mòn bồn chứa là rất quan trọng để bảo vệ thiết bị, nhân sự, môi trường và cộng đồng xung quanh ngoài việc giảm thời gian ngừng hoạt động và chi phí bảo trì của các bể chứa.

Trong phương pháp kiểm tra thủ công, người kiểm tra tiếp cận bề mặt cần đánh giá với sự hỗ trợ của hệ thống giàn giáo quy mô lớn. Quá trình đánh giá tình trạng các bể chứa được thực hiện theo hướng dẫn của API 653 [1], với sự hỗ trợ của thiết bị siêu âm cầm tay. Đánh giá này gồm thông tin chung về bể chứa, đánh giá hiện tượng lún và đo mức độ ăn mòn và độ dày của vỏ, đáy, mối hàn và các bộ phận khác của bể chứa.

Công việc này mất nhiều thời gian và nguy hiểm đến tính mạng con người. Thêm vào đó, phương pháp kiểm

tra truyền thống chỉ kiểm tra được ở những vị trí dưới đáy bồn và phần thân kề đáy bồn. Đối với phần trên cao của thân bồn, việc kiểm tra sẽ khó khăn và càng trở nên nguy hiểm hơn. Do vậy, việc tự động hóa quá trình kiểm tra bồn bể bằng robot nhằm tiết kiệm thời gian, tăng năng suất và đảm bảo an toàn cho con người là hết sức cần thiết.

Một số nước phát triển đã đưa vào vận hành các robot hiện đại phục vụ kiểm tra tự động trên các bồn nổi chứa xăng dầu như Neptune [2], Maverick [3] và Robavatar [4]. Các robot này được trang bị các module phát hiện ăn mòn dựa trên công nghệ kiểm tra không phá hủy (NDT) [5]. Các kỹ thuật NDT phổ biến trong các vật liệu thép là kiểm tra siêu âm (ultrasonic testing - UT); kiểm tra phát xạ âm thanh (acoustic emission testing - AE); kiểm tra dòng điện xoáy (eddy currents testing - ECT); kiểm tra hạt từ (magnetic particle testing - MT) và kiểm tra rò rỉ từ thông (magnetic flux leakage testing - MFL) [5].

Trong ứng dụng kiểm tra ăn mòn cấu kiện thép từ tính, phương pháp kiểm tra rò rỉ từ thông MFL được đánh giá là thích hợp hơn so với phương pháp kiểm tra NDT khác, nhờ



Ngày nhận bài: 4/9/2024

Ngày đánh giá và sửa chữa: 4/9 - 27/11/2024

Ngày duyệt đăng: 27/11/2024

các ưu điểm sau: Phương pháp này không đòi hỏi quá trình chuẩn bị (pre-processing) phức tạp, dễ thu nhận tín hiệu, dễ thực hiện trực tuyến quá trình đo, phát hiện đa dạng các loại khuyết tật như khuyết tật bề mặt, lỗ rỗng, sọc, vết nứt, ăn mòn bên trong và bên ngoài bề mặt, với khả năng phát hiện khuyết tật rất nhỏ, trên bề dày tấm thép lớn. Điều này đã được minh chứng rõ trong nghiên cứu của Li và cộng sự [6], theo đó, nhóm tác giả đã đề xuất một đầu dò từ độ nhạy cao được sử dụng trong MFL để phát hiện các vết nứt nhỏ, với mẫu được thử nghiệm là thép kết cấu carbon Q235A và các khuyết tật có chiều dài 6 mm, chiều rộng từ 60 - 80 μm và chiều sâu từ 7 - 60 μm . Kết quả thí nghiệm cho thấy tất cả các khuyết tật đều được phát hiện.

Chính vì vậy, kỹ thuật kiểm tra MFL đã được áp dụng phổ biến trong kiểm tra ăn mòn trên các hệ thống đường ống dẫn khí đốt [7 - 11]. Từ tín hiệu MFL thu được, việc diễn giải các đặc trưng của mẫu tín hiệu giúp đánh giá kích thước cơ bản (dài, rộng, sâu), thậm chí là hình dáng khuyết tật, đây là chủ đề nghiên cứu được thảo luận nhiều trong những năm gần đây [12 - 17].

Về nghiên cứu phát triển robot leo bồn, nhiệm vụ quan trọng nhất là phát triển một cơ chế thích hợp để đảm bảo robot bám chặt vào thành bồn ở các bề mặt có độ cong khác nhau một cách đáng tin cậy mà không làm mất khả năng di chuyển và tính cơ động của nó.

Phương pháp bám dính - di chuyển thường được sử dụng nhất trong phát triển robot leo tường đứng là kết hợp nam châm vĩnh cửu với cơ cấu bánh xích [18 - 21]. Kiểu kết cấu vững chắc và diện tích tiếp xúc lớn đã làm tăng tính ổn định của robot, nhưng lại thiếu sự linh động và khó thích ứng với các bề mặt không bằng phẳng hoặc cong. Để khắc phục hạn chế này, một số nhóm nghiên cứu đã thêm hệ thống treo vào cơ cấu bánh xích, cho phép uốn

cong phần bánh xích và thích ứng với các bề mặt cong mà không làm mất đi tính ổn định của robot [22].

Mặc dù cơ cấu bánh xích từ đã được sử dụng rộng rãi trong robot leo tường trên các bề mặt sắt từ, nhưng khả năng linh động, tốc độ di chuyển vẫn là thách thức lớn. Để giải quyết vấn đề này, một số nhóm nghiên cứu đã đề xuất sử dụng cơ chế bám dính và di chuyển bằng các bánh xe từ tính có trọng lượng nhẹ [23]. Các bánh xe từ tính này mở rộng phạm vi ứng dụng tiềm năng của robot, cho phép bánh xe hoạt động trên các bề mặt cong [24] và không bằng phẳng [25].

Trong thực tiễn công nghiệp, các bồn nổi chứa xăng dầu dạng trụ thường được làm bằng thép carbon (vật liệu có từ tính). Vì vậy, các nghiên cứu về robot leo bồn thường sử dụng cơ chế bám dính bằng nam châm, đặc biệt là nam châm vĩnh cửu. Mặc dù đã có một số robot leo bồn thương mại hóa được trang bị bánh xích từ tính, tuy nhiên các nghiên cứu thử nghiệm cho thấy hệ thống động lực bánh xích làm gia tăng đáng kể trọng lượng robot và làm giảm khả năng cơ động. Từ các hạn chế này, nhóm tác giả đề xuất sử dụng hệ thống động lực bánh xe từ tính, dùng nam châm vĩnh cửu cho thiết kế robot leo bồn, do tính cơ động cao và trọng lượng nhỏ. Do robot phải hoạt động trong thời gian dài, nên phương pháp bám dính dựa trên nam châm vĩnh cửu là lựa chọn phù hợp nhằm tiết kiệm năng lượng.

2. Thiết kế robot phát hiện ăn mòn bồn nổi hình trụ đứng chứa xăng dầu

2.1. Thiết kế robot mang bộ từ hóa

Ở giai đoạn thiết kế nguyên lý, có 2 vấn đề lớn cần giải quyết. Thứ nhất là tối ưu hóa thiết kế hình dáng, kích thước cơ bản của robot và hệ thống nam châm cung cấp



Hình 1. Thực nghiệm robot di chuyển trên bề mặt cong.

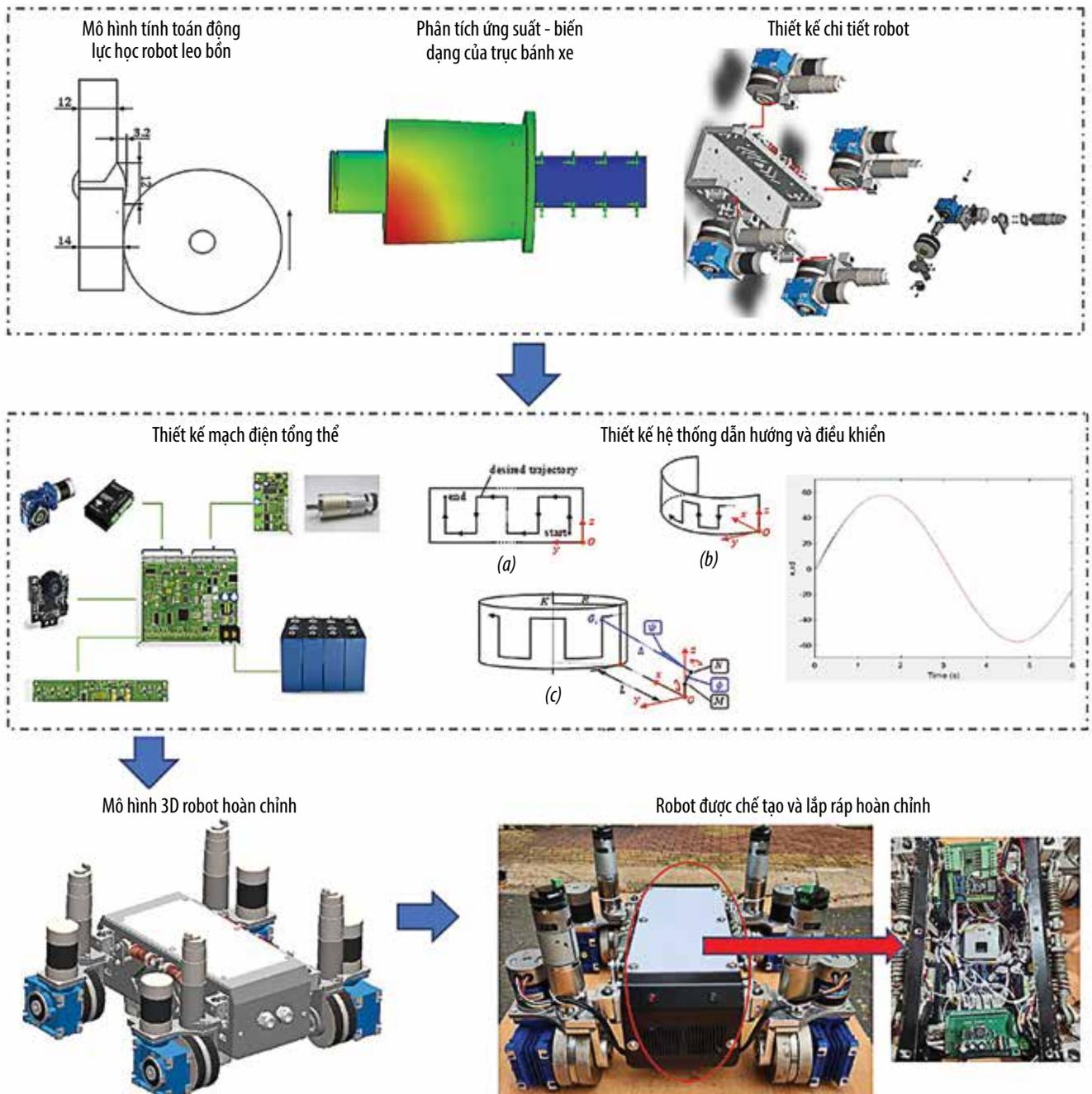


Hình 2. Thực nghiệm robot di chuyển trên thành bồn đứng, vượt qua đường hàn.

lực bám dính, sao cho bảo đảm đủ lực bám dính, đồng thời giảm tối đa trọng lượng robot. Thứ hai là lựa chọn phương thức di chuyển hợp lý, đảm bảo robot có khả năng di chuyển linh hoạt trên bề mặt phẳng đứng, bán kính cong khác nhau và có thể vượt qua các đường hàn có chiều cao đến 5 mm (theo khảo sát thực tế). Hình 1 và 2 trình bày quá trình thực nghiệm tại xưởng nhằm hiệu chỉnh các phương án thiết kế sơ bộ robot.

Sau khi thử nghiệm, phương án di chuyển bằng 4 bánh xe từ, truyền động độc lập để thiết kế hệ thống di

chuyển cho robot leo bồn đã được lựa chọn. Để hoàn thiện mô hình nguyên mẫu robot, nhóm tác giả đã tính toán, thiết kế chi tiết toàn bộ robot với sự hỗ trợ của các phần mềm chuyên dụng. Cụ thể, mô hình toán động lực học được xây dựng nhằm tối ưu hóa thiết kế tổng thể robot dựa trên phần mềm Matlab, gồm kích thước cơ bản, lực từ và moment trục bánh xe, bố trí chung và trọng tâm robot...; các cơ cấu truyền động như trục bánh xe, cơ cấu giảm chấn được mô hình hóa và phân tích ứng suất - biến dạng dựa trên phương pháp phần tử hữu hạn (FEM) trên phần mềm Ansys; mạch điện tổng được thiết kế và



Hình 3. Tối ưu hóa thiết kế robot leo bồn mang bộ từ hóa thông qua mô phỏng và thực nghiệm.

mô phỏng trên phần mềm OrCAD; giải thuật điều khiển robot cũng được xây dựng và mô phỏng trên phần mềm Matlab nhằm đánh giá độ ổn định và tốc độ đáp ứng trước khi thử nghiệm. Ở giai đoạn thiết kế chi tiết và thiết kế thi công, toàn bộ mô hình 3D và bản vẽ thi công đều được xây dựng với sự hỗ trợ của phần mềm Solidworks. Toàn bộ quy trình tính toán, thiết kế và chế tạo robot leo bồn được mô tả trong Hình 3.

Giai đoạn này, nhóm nghiên cứu đã bước đầu hoàn thiện nguyên mẫu robot leo bồn theo phương thức bám dính bằng từ tính, với 4 bánh xe truyền động độc lập. Các thông số cơ bản của robot được trình bày trong Bảng 1.

2.2. Thiết kế bộ kiểm tra rò rỉ từ thông

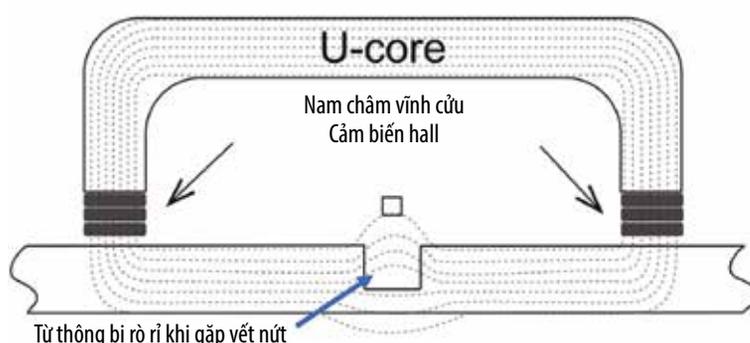
Bộ từ hóa đóng vai trò quan trọng trong phương pháp kiểm tra rò rỉ từ thông. Trong đó, kích thước và vật liệu cấu thành bộ từ hóa cần phải được thiết kế tối ưu sao cho giảm trọng lượng của toàn bộ robot trong khi tối đa hóa diện tích bao phủ (diện tích khảo sát bề mặt) và đủ khả năng cung cấp từ trường đạt trạng thái bão hòa trên bề mặt cần kiểm tra (nhằm đảm bảo tín hiệu rò rỉ từ thông được ghi nhận từ cảm biến luôn “rõ nét”).

Hình 4 mô tả nguyên lý của phương pháp kiểm tra rò rỉ từ thông, trong đó, hệ thống gồm 1 bộ từ hóa dạng thanh (backing bar) và 1 bộ cảm biến từ trường, với 2 cực là nam châm vĩnh cửu. Bộ từ hóa tạo ra một vùng từ trường bão hòa, phân bố gần như đều và song song với bề mặt kết cấu thép. Khi gặp vết nứt, dù rất nhỏ, từ thông sẽ bị rò rỉ ra khỏi bề mặt kết cấu thép và được cảm biến ghi nhận. Dữ liệu này chính là biểu đồ mô tả cường độ rò rỉ từ thông dọc theo chiều dài của vết nứt. Qua nghiên cứu từ tài liệu [26, 27], kết hợp với mô phỏng số và thí nghiệm trên các mẫu thử (Hình 5), nhóm tác giả nhận thấy tín hiệu rò rỉ từ thông bị ảnh hưởng bởi các thông số công nghệ của bộ kiểm tra rò rỉ từ thông, đặc điểm kết cấu - vật liệu bề mặt kiểm tra và kích thước khuyết tật.

Trong thực tiễn, việc thử nghiệm số lượng lớn tổ hợp tham số thiết kế hệ gông từ là rất khó khăn. Do vậy, nhóm nghiên cứu đã tiếp

Bảng 1. Thông số kỹ thuật cơ bản của robot được thiết kế

Đặc điểm/Đặc tính kỹ thuật của robot	Thông số kỹ thuật/Thông tin
Trọng lượng	39 kg
Kích thước (dài x rộng x cao)	450 mm x 350 mm x 150 mm
Vận tốc di chuyển	10 - 50 mm/giây
Moment tối đa trên trục bánh xe	17 N.m
Bán kính bánh xe	50 mm



Hình 4. Mô tả phương pháp kiểm tra rò rỉ từ thông MFL.

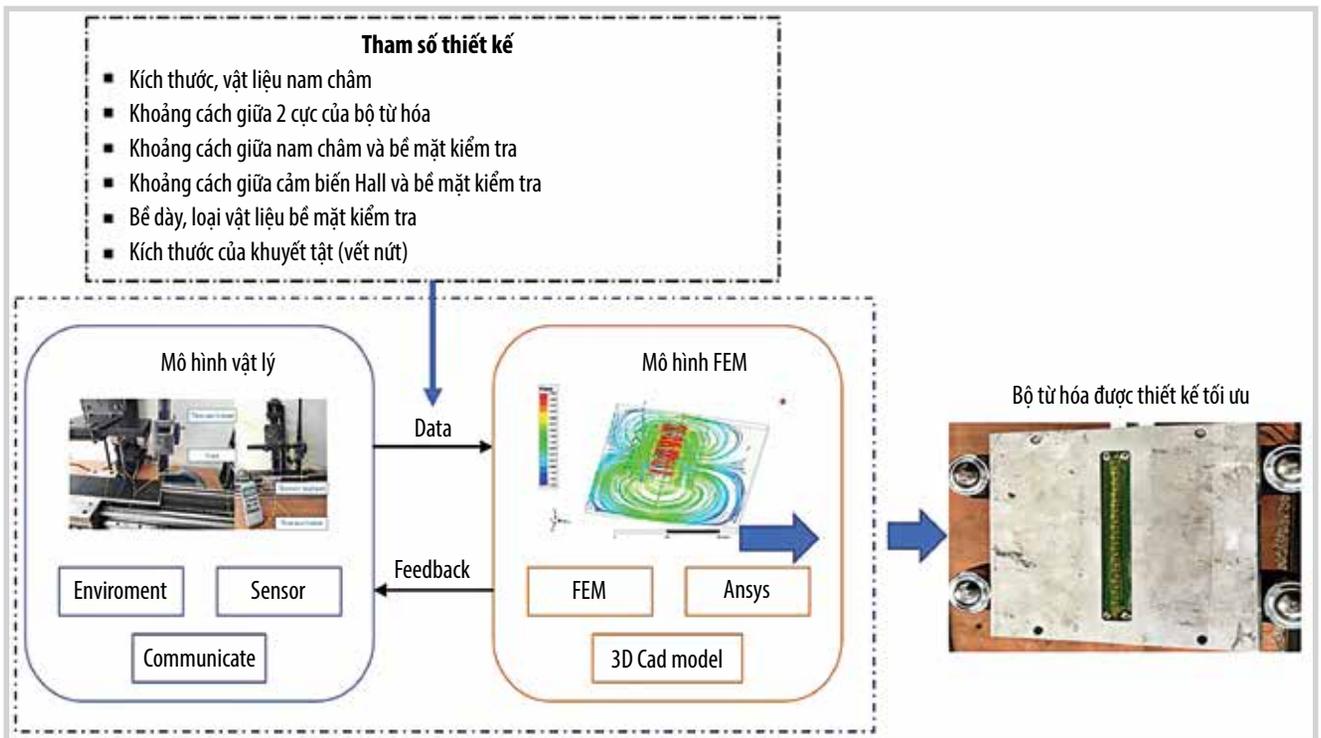
cận với phương pháp mô phỏng số, dựa trên phương trình chủ đạo Maxwell và giải bằng phương pháp phần tử hữu hạn FEM trên module Ansys Maxwell, nhằm dự đoán ảnh hưởng của các thông số công nghệ đến cường độ tín hiệu rò rỉ từ thông. Các kết quả mô phỏng được xác nhận thông qua thực nghiệm trên mẫu thử với các khuyết tật được gia công chính xác. Cuối cùng, tập hợp thông số công nghệ tối ưu theo hướng giảm trọng lượng bộ từ hóa và tối đa hóa cường độ rò rỉ từ thông đã được ghi nhận. Toàn bộ phương pháp tiếp cận này được mô tả trong Hình 6, cấu tạo của bộ từ hóa hoàn chỉnh được trình bày trong Hình 7. Phương pháp luận và mô hình toán thiết kế tối ưu bộ từ hóa của nhóm tác giả đã được kiểm chứng trong một nghiên cứu tiền khả thi và được mô tả đầy đủ trong tài liệu [28].

Trong quá trình thử nghiệm, nhóm tác giả phát hiện ra dữ liệu MFL bị ảnh hưởng bởi nhiều hệ thống và các tác nhân môi trường trong quá trình vận hành. Bên cạnh đó, do hệ thống vận hành sử dụng nguyên lý MFL cho việc phát hiện khuyết tật dẫn tới sự phát sinh dòng điện xoáy khi robot di chuyển. Việc phát sinh dòng điện xoáy này có thể dẫn tới sự ảnh hưởng lên cường độ và sự thay đổi trong tín hiệu MFL, gây khó khăn trong việc đánh giá dữ liệu. Do vậy, việc xử lý dữ liệu thô từ cảm biến trả về là việc cơ bản cần thực hiện.

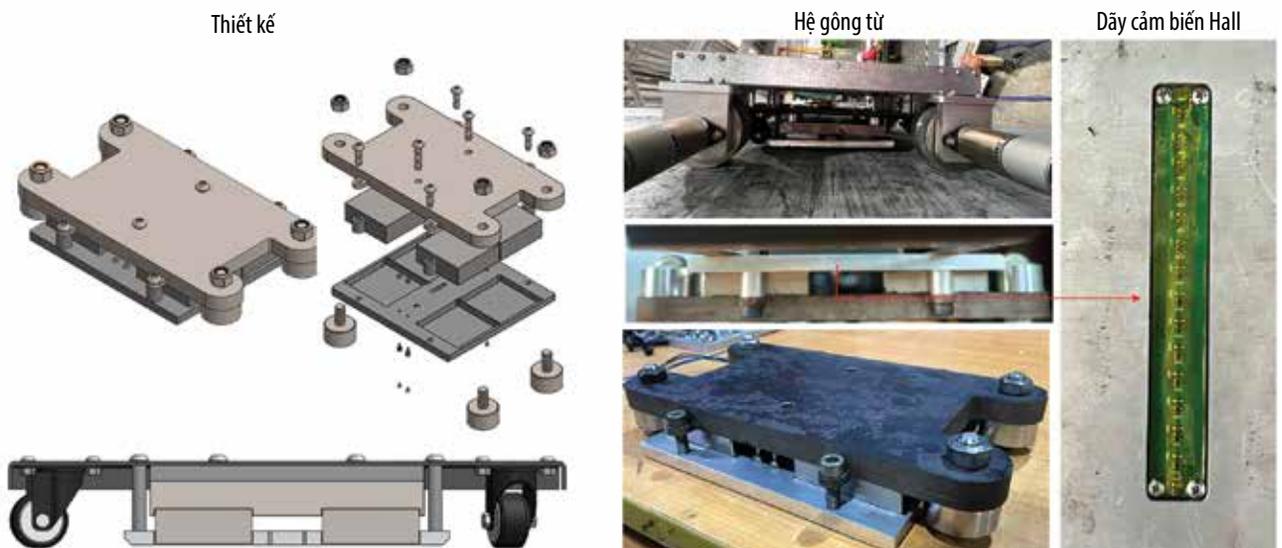
Quy trình xử lý tín hiệu MFL để xác định khuyết tật trên tấm kim loại gồm 4 bước chính (Hình 8). Đầu tiên, bước "Thu thập dữ liệu" là quá trình sử dụng cảm biến để thu thập tín hiệu MFL từ bề mặt tấm kim loại. Dữ liệu thu được thường gồm cả tín hiệu hữu ích liên quan đến khuyết tật và tín hiệu nhiễu gây ra bởi hệ thống, môi trường hay các yếu tố khác. Tiếp theo là bước "Lọc nhiễu", nơi các tín hiệu không mong muốn được loại bỏ dựa trên biến đổi wavelet theo kinh nghiệm (EWT). Quá trình này giúp giữ lại các thông tin MFL quan trọng, đồng thời làm mịn tín hiệu để giảm ảnh hưởng của nhiễu, giúp phát hiện



Hình 5. Mô hình tham số hóa và thực nghiệm trong thiết kế hệ từ hóa.



Hình 6. Tối ưu hóa thiết kế bộ từ hóa dựa trên mô phỏng FEM và thực nghiệm mô hình thu nhỏ.



Hình 7. Cấu tạo hệ gông từ được thiết kế và chế tạo hoàn chỉnh.



Hình 8. Quy trình xử lý dữ liệu MFL.

Bảng 2. Bảng thông số kỹ thuật của bồn trụ đứng chứa xăng dầu khảo sát tại Công ty cổ phần Lọc hóa dầu Bình Sơn

Thông số bồn trụ đứng chứa xăng dầu được khảo sát	
Lưu chất	MOGAS 92/95
Tiêu chuẩn bồn chứa xăng dầu	API 650 10 th Sept 2003, Add.3 (SI Unit)
Đường kính trong của bồn	28.000 mm
Chiều cao của bồn	19.700 mm
Vật liệu làm bồn	A36M
Chiều cao đường hàn (ngang và đứng): Max. 5 mm	
Bề rộng đường hàn (ngang và đứng): 15 - 20 mm	
Sơn bề mặt ngoài 3 lớp: Có	
+ Lớp trong cùng: Chống rỉ	
+ Lớp giữa: Bám dính	
+ Lớp ngoài cùng: Sơn che phủ	
Cách điện (insulation): Không có	

Bảng 3. Thông số khuyết tật mẫu

Tên khuyết tật	Chiều dài (mm)	Độ sâu (mm)	Bề rộng (mm)	Phương	Vị trí
KT1	25	50	2	45°	S1
KT2	37,5	5	2	Thẳng đứng	S2
KT3	50	4	2	Ngang	S3
KT4	65	3	2	Xiên góc 60°	S1
KT5	40	3,5	2	Xiên góc 120°	S2
KT6	40	2	2	Xiên góc bất kỳ	S3
KT7	25	3	2	Thẳng đứng	S4
KT8	65	2	2	Ngang	S4

rõ hơn các dấu hiệu của khuyết tật. Tuy nhiên, tín hiệu sau khi lọc vẫn có thể chịu ảnh hưởng của dòng điện xoáy (eddy current), gây ra sự không đồng nhất về cường độ. Do đó, trong bước "Xử lý, phân tích dữ liệu", một thuật toán được sử dụng để đồng nhất và chuẩn hóa dữ liệu thu được, giúp cải thiện độ chính xác trong việc xác định vị trí khuyết tật. Cuối cùng, toàn bộ dữ liệu sau khi xử lý sẽ được "Vẽ bản đồ 2D" trên hệ trục tọa độ của tấm kim loại, qua đó định vị chính xác khu vực có khả năng tồn tại khuyết tật.

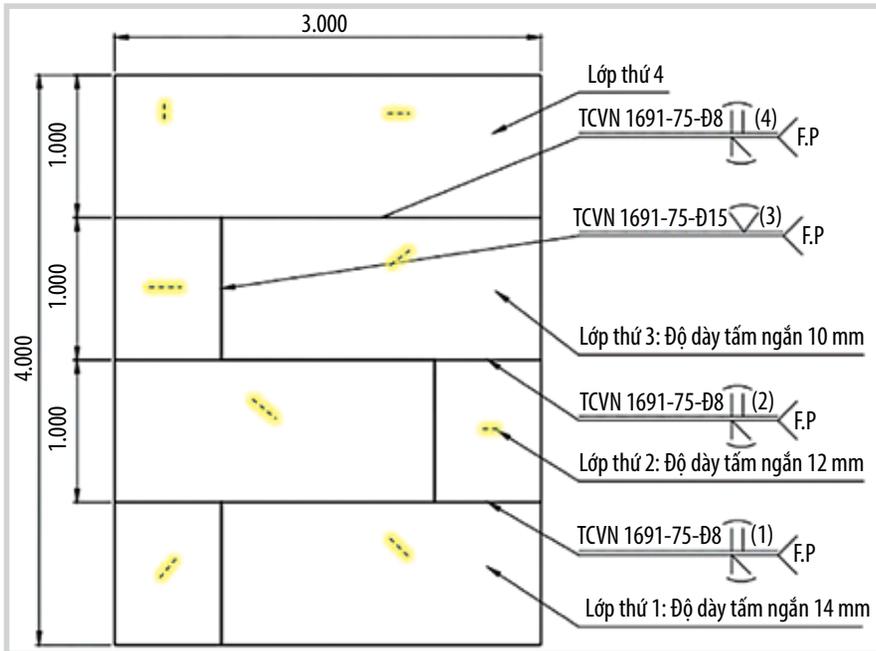
3. Kết quả nghiên cứu chế tạo robot phát hiện ăn mòn bồn nổi hình trụ đứng chứa xăng dầu

Để đánh giá khả năng đáp ứng động lực học (độ bám dính, khả năng di chuyển, tính cơ động) và khả năng phát hiện ăn mòn của robot được thiết kế chế tạo, nhóm tác giả trình bày kết quả thực nghiệm tại xưởng, khảo sát đặc trưng kết cấu của các bồn trụ đứng chứa xăng dầu, nhằm cung cấp dữ liệu đầu vào phục vụ thiết kế thí nghiệm; Mục 3.2 sẽ trình bày kết quả ghi nhận được sau thí nghiệm và đưa ra một số nhận xét.

3.1. Thiết kế thí nghiệm

Sau khi thực hiện khảo sát các loại bồn trụ đứng chứa xăng dầu tại Công ty cổ phần Lọc hóa dầu Bình Sơn (BSR) tại khu P1 và P3, nhóm tác giả đã chọn bồn trụ đứng (thông số kỹ thuật như Bảng 2) làm chuẩn để gia công tấm thép thử nghiệm, vì dữ liệu thiết kế, bảng thông số kỹ thuật và phạm vi chiều dày của tấm thép thân bồn hoàn toàn phù hợp với đặc tính kỹ thuật của robot được thiết kế.

Từ dữ liệu khảo sát này, 1 tấm thép đứng được chế tạo nhằm mô phỏng lại các đặc trưng vật lý của thành bồn trong thực tế. Cụ thể, tấm thép được cấu thành từ vật liệu thép A36M, kích thước (A x L) = 4.000 mm x 3.000 mm, được hàn ghép từ các tấm thép nhỏ có độ dày khác nhau, phạm vi độ dày 8 - 14 mm, cùng với các khuyết tật nhân tạo với kích thước và hình dáng khác nhau, nhằm đánh giá toàn diện khả năng phát hiện ăn mòn của robot trong thực tế. Hình 9 và Bảng 3 trình bày chi tiết các đặc trưng vật lý của tấm thép thử nghiệm đã được mô tả ở trên. Hình 10 trình bày hình ảnh thực tế của tấm thép được gia công theo thiết kế.



Hình 9. Bản thiết kế tấm thép thử nghiệm.



Hình 10. Tấm thép thử nghiệm.

3.2. Kết quả

Kết quả thí nghiệm thực hiện tại xưởng trên tấm thép đặt theo phương đứng (Hình 11) như sau: Lực hút của bánh xe từ: 900 N; lực hút của gông từ: 2.000 N; chiều sâu khuyết tật nhỏ nhất có thể phát hiện: 2 mm.

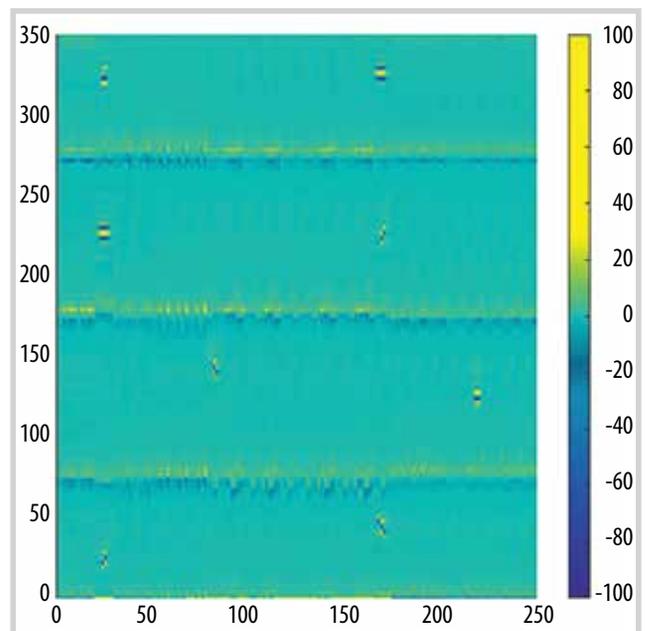
Kết quả này chứng tỏ hệ thống MFL có độ nhạy cao, vượt trội so với phương pháp kiểm tra bằng dòng điện xoáy. Hình 12 trình bày biểu đồ cường độ tín hiệu MFL thu được sau thí nghiệm với phạm vi quét 2,5 m x 3,5 m. Cụ thể, các khuyết tật với kích thước và hướng khác nhau đều được phát hiện và biểu thị rõ ràng trong biểu đồ. Lưu ý rằng 3 đường tín hiệu MFL nằm ngang phản ánh các đường hàn trên tấm thép.

Trong quá trình thử nghiệm, lộ trình quét của robot đã được quy hoạch tối ưu nhằm giảm thời gian quét, đồng thời đảm bảo các khuyết tật mẫu nằm trong phạm vi quét của mạch cảm biến Hall. Do đó, các đường hàn dọc không nằm trong phạm vi quét của các cảm biến Hall.

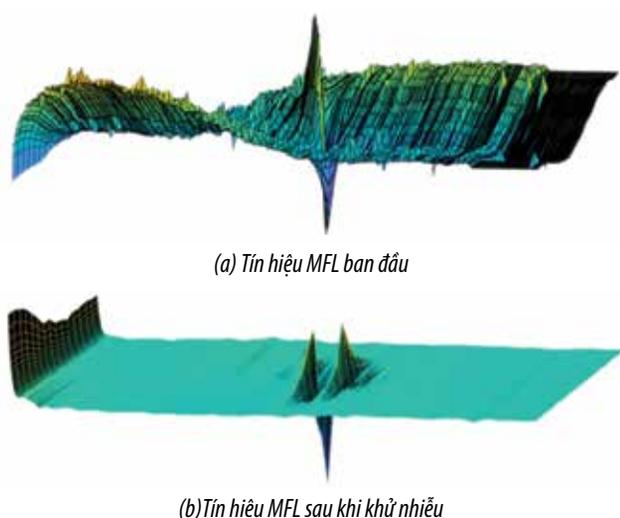
Một mẫu tín hiệu ghi nhận được từ bộ cảm biến khi đi qua một khuyết tật được trình bày trong Hình 13a. Đây là tín hiệu MFL khi robot quét qua khuyết tật có chiều sâu nhỏ nhất (2 mm) ở khu vực tấm thép có bề dày 8 mm, tương ứng với khuyết tật KT8 trong Bảng 3. Mặc dù dữ liệu xuất hiện nhiều trong quá trình thu thập, nhưng không ảnh hưởng đến việc phát hiện khuyết tật. Các tín hiệu nhiễu xuất hiện ở lân cận tín hiệu chính do rò rỉ từ thông khi gặp khuyết tật, nguyên nhân là do mật độ từ thông phân bố giữa 2 cực nam châm của hệ từ hóa quá



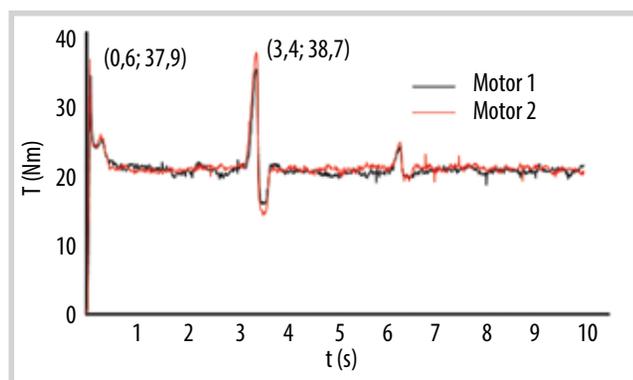
Hình 11. Robot đang thử nghiệm trên tấm thép đứng tại xưởng.



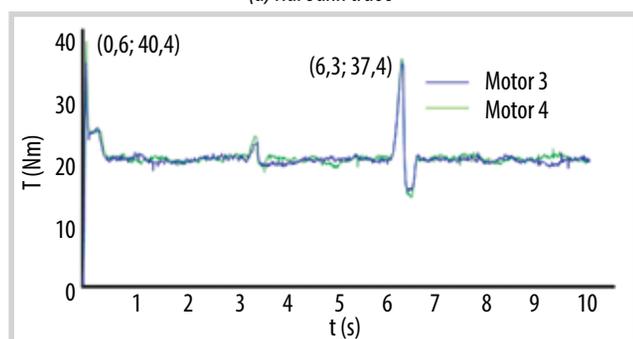
Hình 12. Kết quả kiểm tra khuyết tật.



Hình 13. Tín hiệu rò rỉ từ thông (MFL) khi robot đi qua khuyết tật có chiều sâu 2 mm, tại tấm thép có bề dày 8 mm.



(a) Hai bánh trước



(b) Hai bánh sau

Hình 14. Đồ thị moment động cơ khi đi qua đường hàn.

lớn (khoảng 300 Gauss). Trên thực tế, các tín hiệu nhiễu này dễ dàng được loại bỏ bằng các bộ lọc (xem kết quả lọc nhiễu ở Hình 13b).

Về khả năng bám dính và tính cơ động, kết quả thí nghiệm cho thấy robot có thể di chuyển theo phương thẳng đứng trên tấm thép với tốc độ tối đa 0,05 m/giây. Nhờ lực từ rất lớn, cùng với cơ cấu giảm chấn và hệ động lực độc lập của 4 bánh xe từ, robot có khả năng vượt qua các đường hàn có chiều cao tối đa 10 mm. Trong thực tế,

các mối hàn thường có chiều cao rất nhỏ so với 10 mm. Hình 14 trình bày đồ thị moment xoắn tương ứng với 4 động cơ khi robot vượt qua đường hàn trên tấm thép thử nghiệm. Do đó, với nguyên mẫu hiện tại, robot hoàn toàn đủ khả năng bám dính, di chuyển và vượt qua đường hàn an toàn trên các bồn trụ đứng chứa xăng dầu.

4. Kết luận

Kết quả nghiên cứu, thiết kế và chế tạo robot phát hiện ăn mòn trên bồn hình trụ đứng chứa xăng dầu. Robot và hệ thống kiểm tra rò rỉ từ thông (MFL) được thiết kế tối ưu bằng các phần mềm chuyên dụng như Matlab, Ansys, SolidWorks và OrCAD nhằm giảm trọng lượng và tăng hiệu quả kiểm tra ăn mòn.

Để đánh giá khả năng di chuyển, tính cơ động và khả năng phát hiện khuyết tật, nhóm tác giả đã chế tạo một mô hình thành bồn trụ đứng với tấm thép kích thước 4 m (cao) × 3 m (rộng), bán kính cong 14 m. Tấm thép này được hàn từ các tấm thép nhỏ có bề dày từ 8 - 14 mm, cùng với các khuyết tật nhân tạo trên mặt sau, nhằm mô phỏng đặc trưng vật lý của thành bồn chứa xăng dầu và hóa chất trong thực tế. Kết quả thử nghiệm trên tấm thép đứng tại xưởng cho thấy robot đã đạt được các chỉ tiêu chất lượng chính như vận tốc di chuyển tối đa 0,05 m/giây; khả năng bám dính và vượt qua đường hàn cao tối đa 10 mm; chất lượng tín hiệu MFL ghi nhận có khả năng phát hiện khuyết tật có độ sâu 2 mm trên tấm thép dày đến 14 mm.

Trong các nghiên cứu tiếp theo, nhóm tác giả sẽ tiếp tục hoàn thiện nguyên mẫu robot, tối ưu hóa thiết kế hệ thống định vị, dẫn hướng và điều khiển; phát triển bộ dữ liệu và các thuật toán trí tuệ nhân tạo để tái dựng chính xác hình dạng và kích thước khuyết tật từ tín hiệu MFL, nhằm cung cấp dữ liệu hữu ích cho thống kê, đánh giá tuổi thọ bồn chứa và ra quyết định bảo trì sớm.

Tài liệu tham khảo

[1] ATS, "Tank inspection protocol API 653". [Online]. Available: <https://www.atsenvironmental.com/commercial/aboveground-storage-tanks/api-inspection/api-653/#:~:text=What is API 653%3F,650 or API 12C standards.>

[2] Neptune Robotics, "A world class automated biofouling management and robotic hull cleaning system". [Online]. Available: <https://neptune-robotics.com/>.

[3] Maverick Inspection, [Online]. Available: <https://www.maverickinspection.com/>.

- [4] Robavatar, "Crawler robot chassis". [Online]. Available: <https://www.robavatar.com/products/basic/crawler/>.
- [5] Maria Inês Silva, Evgenii Malitckii, Telmo G. Santos, and Pedro Vilaça, "Review of conventional and advanced non-destructive testing techniques for detection and characterization of small-scale defects", *Progress in Materials Science*, Volume 138, 2023. DOI: 10.1016/j.pmatsci.2023.101155.
- [6] Erlong Li, Yihua Kang, Jian Tang, and Jianbo Wu, "A new micro magnetic bridge probe in magnetic flux leakage for detecting micro-cracks", *Journal of Nondestructive Evaluation*, Volume 37, 2018. DOI: 10.1007/s10921-018-0499-8.
- [7] Huaguang Zhang, Lei Wang, Jianfeng Wang, Fengyuan Zuo, Jifeng Wang, and Jinhai Liu, "A pipeline defect inversion method with erratic MFL signals based on cascading abstract features", *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Volume 71, pp. 1 - 11, 2022. DOI: 10.1109/TIM.2022.3152243.
- [8] Bin Liu, Zihan Wu, Peng Wang, Luyao He, Lijian Yang, Zheng Lian, and Tong Liu, "Quantization of magnetic flux leakage internal detection signals for composite defects of gas and oil pipelines", *Energy Reports*, Volume 9, pp. 5899 - 5914, 2023. DOI: 10.1016/j.egy.2023.05.025.
- [9] Lin Jiang, Huaguang Zhang, Jinhai Liu, Xiangkai Shen, and Lei Wang, "Pipeline irregular defect inversion for magnetic flux leakage detection system based on heterogeneous multiclass feature fusion", *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Volume 72, pp. 1 - 9, 2023. DOI: 10.1109/TIM.2023.3265110.
- [10] Bingyi Mao, Yi Lu, Peiliang Wu, Bingzhi Mao, and Pengfei Li, "Signal processing and defect analysis of pipeline inspection applying magnetic flux leakage methods", *Intelligent Service Robotics*, Volume 7, Issue 4, pp. 203 - 209, 2014. DOI: 10.1007/s11370-014-0158-6.
- [11] Jiatong Ling, Ke Feng, Teng Wang, Min Liao, Chunsheng Yang, and Zheng Liu, "Data modeling techniques for pipeline integrity assessment: A state-of-the-art survey", *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Volume 72, pp. 1 - 17, 2023. DOI: 10.1109/TIM.2023.3279910.
- [12] Jie Yuan, Mengtian Qiao, Chun Hu, Yufei Cheng, Zhen Wang, and Dezhi Zheng, "A classification and quantitative assessment method for internal and external surface defects in pipelines based on ASTC-Net", *Advanced Engineering Informatics*, Volume 61, 2024. DOI: 10.1016/j.aei.2024.102492.
- [13] Rongbiao Wang, Yongzhi Chen, Haozhi Yu, Zhiyuan Xu, Jian Tang, Bo Feng, Yihua Kang, and Kai Song, "Defect classification and quantification method based on AC magnetic flux leakage time domain signal characteristics", *NDT E International*, Volume 149, 2025. DOI: 10.1016/j.ndteint.2024.103250.
- [14] Haotian Wei, Shaohua Dong, Lushuai Xu, Fan Chen, Hang Zhang, and Xingtao Li, "Internal inspection method for crack defects in ferromagnetic pipelines under remanent magnetization", *Measurement*, Volume 242, 2025. DOI: 10.1016/j.measurement.2024.115907.
- [15] Lin Jiang, Huaguang Zhang, Jinhai Liu, Qi Xiao, Xiangkai Shen, and Hang Xu, "A physics-guided MFL deformed defect recovery method", *IEEE Transactions on Automation Science Engineering*, Volume 21, Issue 2, pp. 2113 - 2124, 2024. DOI: 10.1109/TASE.2023.3260281.
- [16] Pengpeng Shi, Pengcheng Zhang, Shuai Hao, Wenshui Wang, and Xiaofan Gou, "Classification and evaluation for nearside/backside defect via magnetic flux leakage: A dual probe design with SVM and PSO intelligence algorithms", *NDT E International*, Volume 144, Issue 1, 2024. DOI: 10.1016/j.ndteint.2024.103100.
- [17] Lei Wang, Huaguang Zhang, Jinhai Liu, Xiangkai Shen, and Fengyuan Zuo, "Irregular defect size estimation for the magnetic flux leakage detection system via expertise-informed collaborative network", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Volume 71, Issue 10, pp. 13189 - 13200, 2024. DOI: 10.1109/TIE.2024.3357845.
- [18] Zeliang Xu and Peisun Ma, "A wall-climbing robot for labelling scale of oil tank's volume", *Robotica*, Volume 20, Issue 2, 2002. DOI: 10.1017/S0263574701003964.
- [19] Weimin Shen, J. Gu, and Yanjun Shen, "Permanent magnetic system design for the wall-climbing robot", *IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, Niagara Falls, ON, Canada, 29 July - 1 August 2005*. DOI: 10.1533/abbi.2006.0024.
- [20] Patrick Schoeneich, Frederic Rochat, Olivier Truong-Dat Nguyen, Roland Moser, and Francesco Mondada, "TRIPILLAR: A miniature magnetic caterpillar climbing robot with plane transition ability", *Robotica*, Volume 29, Issue 7, pp. 1075 - 1081, 2011. DOI: 10.1017/S0263574711000257.
- [21] Yanheng Liu, HyunGyu Kim, and TaeWon

Seo, "AnyClimb: A new wall-climbing robotic platform for various curvatures", *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, Volume 21, Issue 4, 2016. DOI: 10.1109/TMECH.2016.2529664.

[22] Junyu Hu, Xu Han, Yourui Tao, and Shizhe Feng, "A magnetic crawler wall-climbing robot with capacity of high payload on the convex surface", *Robotics and Autonomous Systems*, Volume 148, 2022. DOI: 10.1016/j.robot.2021.103907.

[23] Wolfgang Fischer, Fabien Tâche, and Roland Siegwart, "Magnetic wall climbing robot for thin surfaces with specific obstacles", *Springer Tracts in Advanced Robotics*, 2008. DOI: 10.1007/978-3-540-75404-6_53.

[24] Mansi S. Chabukswar, Ravikant K. Nanwatkar, and Aparna M. Bagde, "Design and experimental analysis of magnetic climbing robot", *International Journal of Research in Engineering Science and Management*, Volume 2, Issue 12, 2019.

[25] Raihan Enjikalayil Abdulkader, Prabakaran Veerajagadheswar, Nay Htet Lin, Selva Kumaran, Suresh Raj Vishaal, and Rajesh Elara Mohan, "Sparrow: A magnetic climbing robot for autonomous thickness measurement in ship hull maintenance", *Journal of Marine Science and Engineering*, Volume 8, Issue 6, 2020. DOI: 10.3390/JMSE8060469.

[26] Yue Long, Songling Huang, Lisha Peng, Shen Wang, and Wei Zhao, "A new dual magnetic sensor probe for lift-off compensation in magnetic flux leakage detection", *IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC)*, Dubrovnik, Croatia, 25 - 28 May 2020. DOI: 10.1109/I2MTC43012.2020.9129204.

[27] Peng-Peng Shi, Shuai Hao, and Tian-Shou Liang, "The defect depth evaluation based on the dual-sensor strategy: Resisting the lift-off disturbance in magnetic flux leakage testing", *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Volume 582, 2023. DOI: 10.1016/j.jmmm.2023.171039.

[28] Quoc Minh Lam, Van Tu Duong, Hoang Long Phan, Tan Tien Nguyen, and Huy Hung Nguyen, "Parametric design methodology for yoke-magnetization in magnetic flux leakage detection systems", *Results Engineering*, Volume 23, 2024. DOI: 10.1016/j.rineng.2024.102669.

[29] Nguyễn Thị Lan, Huỳnh Khắc Tâm và Thái Lâm Cường Quốc, "Nghiên cứu ứng dụng robot và phương pháp kiểm tra không phá hủy trong đánh giá ăn mòn bồn chứa nhiên liệu", *Dầu khí - Khoa học, Công nghệ và Đổi mới sáng tạo*, Số 5, trang 69 - 78, 2024. DOI: 10.47800/PVSI.2024.05-08.

DEVELOPMENT OF A WALL-CLIMBING ROBOT FOR CORROSION DETECTION OF VERTICAL OIL TANKS

Nguyen Thi Lan^{1,2}, Tran Duong Tan Quyen¹, Pham Quoc Huy³, Nguyen Tan Tien^{1,4}, Le Van Sy^{2,5}

¹Ho Chi Minh City University of Technology - Vietnam National University Ho Chi Minh City

²Petrovietnam University (PVU)

³Petrovietnam College (PV College)

⁴National key Laboratory of Digital Control and System Engineering (DCSELab)

⁵Petrovietnam Maintenance and Repair Corporation (PVMR)

Email: ntlan.sdh231@hcmut.edu.vn

Summary

This paper presents the research, design, and fabrication of a prototype robot for corrosion detection on vertical cylindrical oil tanks using the magnetic flux leakage (MFL) inspection technique. The robot's overall design, propulsion system, electrical components, control architecture, and MFL inspection unit were meticulously optimized using specialized software, in compliance with IEC explosion safety standards. The completed prototype has a total mass of 39 kg and operates within a speed range of 10 - 50 mm/s.

The prototype then underwent testing on a vertical steel plate fabricated to simulate the physical properties of actual gasoline and oil storage tanks. Preliminary test results demonstrate the robot's adherence to key performance criteria, including strong adhesion, efficient mobility on vertical surfaces, and high sensitivity to micro-defects. Specifically, the robot can traverse weld seams up to 10 mm in height, maintain stable movement at a maximum speed of 50 mm/s, and detect defects as small as 2 mm in depth on steel plates up to 14 mm thick.

Key words: Corrosion inspection, non-destructive testing (NDT), magnetic flux leakage, wall-climbing robot.