

NGHIÊN CỨU ỨNG DỤNG ROBOT VÀ PHƯƠNG PHÁP KIỂM TRA KHÔNG PHÁ HỦY TRONG ĐÁNH GIÁ ĂN MÒN BỒN CHỨA NHIÊN LIỆU

Nguyễn Thị Lan^{1,2}, Huỳnh Khắc Tâm², Thái Lâm Cường Quốc²

¹Trường Đại học Dầu khí Việt Nam (PVU)

²Trường Đại học Bách khoa, Đại học Quốc gia Thành phố Hồ Chí Minh

Email: ntlan.sdh231@hcmut.edu.vn

<https://doi.org/10.47800/PVSI.2024.05-08>

Tóm tắt

Hiện tượng ăn mòn và nứt gãy trên bồn chứa nhiên liệu hoặc hệ thống đường ống dầu khí có thể gây hậu quả nghiêm trọng đến con người và môi trường. Nghiên cứu này giới thiệu và phân tích các loại robot leo bồn trụ đứng kết hợp với các phương pháp kiểm tra không phá hủy (NDT) trong công tác khảo sát, đánh giá ăn mòn bồn chứa nhiên liệu. Từ việc phân tích ưu nhược điểm của từng phương pháp, nhóm tác giả đề xuất giải pháp tích hợp robot leo bồn chứa hình trụ đứng và phương pháp NDT phù hợp để kiểm tra ăn mòn tại hệ thống bồn chứa nhiên liệu tại các đơn vị thành viên của Tập đoàn Dầu khí Việt Nam (Petrovietnam).

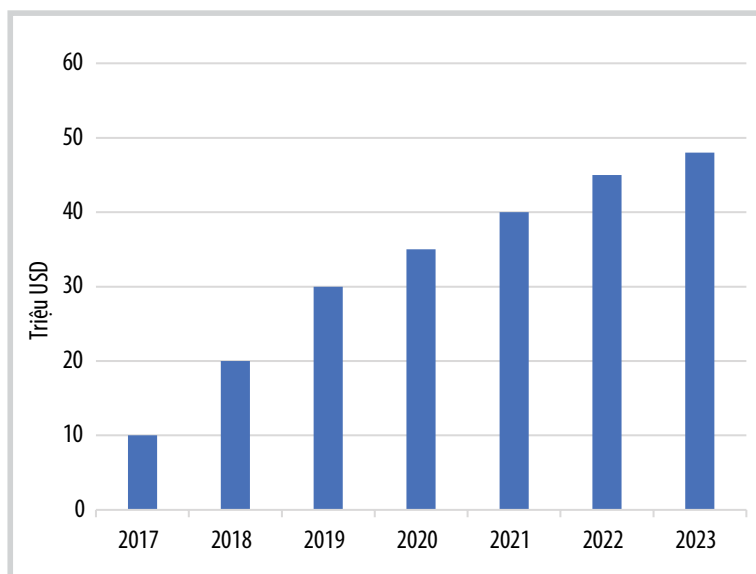
Từ khóa: Robot leo bồn, phương pháp kiểm tra không phá hủy (NDT), phương pháp MFL, bồn chứa dầu, ăn mòn.

1. Giới thiệu

Các công trình, thiết bị trong chuỗi hoạt động dầu khí (khai thác, chế biến, tàng trữ, vận chuyển và phân phối) cần được kiểm tra định kỳ để đảm bảo vận hành an toàn. Trước đây, phương pháp kiểm tra truyền thống đối với bồn chứa thường dựa vào con người trực tiếp quan sát bằng mắt hoặc thiết bị cầm tay, với sự hỗ trợ của giàn giáo không chỉ tốn thời gian mà còn tiềm ẩn rủi ro cao về an toàn lao động.

Nhu cầu sử dụng robot phát hiện khuyết tật tăng liên tục trong giai đoạn 2017 - 2023 (Hình 1) [1]. Tại Việt Nam, công tác khảo sát bồn chứa nhiên liệu chủ yếu vẫn áp dụng phương pháp thủ công, việc sử dụng robot còn rất hạn chế. Trong khi đó, hệ thống bồn chứa đã được xây dựng từ lâu với số lượng lớn, dẫn đến nhu cầu khảo sát ngày càng tăng. Việc nghiên cứu tính năng và công nghệ của các loại robot khảo sát là cơ sở quan trọng để triển khai tự động hóa công tác kiểm tra ăn mòn bồn chứa.

Bài báo giới thiệu các loại robot leo bồn chứa hình trụ đứng trong đó tập trung vào công nghệ điều khiển, khả năng áp dụng và tính năng của từng loại robot đang được nghiên cứu phát triển trên thế giới; công nghệ và phương pháp khảo sát ăn mòn được trang bị cho các loại robot này. Trên cơ sở phân tích ưu nhược điểm của từng loại robot và công nghệ khảo sát có thể ứng dụng trong quá trình bảo trì và bảo dưỡng bồn chứa nhiên liệu, nhóm tác giả đề xuất loại robot phù hợp để kiểm tra ăn mòn bồn chứa nhiên liệu tại các đơn vị của Petrovietnam.



Hình 1. Tổng đầu tư cho robot kiểm tra bồn chứa trong ngành công nghiệp dầu khí trong giai đoạn 2017 - 2023 [1].



Ngày nhận bài: 20/10/2023.

Ngày phân biên đánh giá và sửa chữa: 20/10/2023 - 4/2/2024.

Ngày bài báo được duyệt đăng: 4/10/2024.

2. Phân loại robot khảo sát ăn mòn bồn trụ đứng chứa sản phẩm dầu khí

Bồn chứa nhiên liệu thường được chế tạo bằng các tấm thép từ tính, liên kết bằng các đường hàn dọc và ngang. Trong quá trình vận hành, các khu vực khác nhau của bồn chứa nhiên liệu chịu tác động ăn mòn không đồng đều, do các sản phẩm phụ như $Fe_2(SO_4)_3$ và H_2S sinh ra trong quá trình lưu trữ dầu thô [2].

Đáy bồn chứa thường bị ăn mòn do lắng đọng bùn chứa vi sinh vật dị dưỡng [2]. Việc kiểm tra đáy bồn phải dừng hoạt động sản xuất, rút sản phẩm và làm sạch bề mặt đáy, gây tốn kém và tiềm ẩn rủi ro cao. Thân bồn chứa thường bị ăn mòn và biến dạng kết cấu, cần kiểm tra thường xuyên theo tiêu chuẩn quốc tế. Việc kiểm tra thân bồn có thể nghiên cứu ứng dụng robot di chuyển tự động để khảo sát ăn mòn.

Nguyên tắc leo bồn là tiêu chí chính để phân loại robot kiểm tra bồn chứa. Có hai nhóm kỹ thuật leo chính: thứ nhất dựa trên cơ chế bám dính và thứ hai là nguyên lý di chuyển. Trong đó, cơ chế bám dính an toàn và ổn định vào thành bồn là yếu tố quan trọng nhất khi thiết kế robot, đảm bảo khả năng di chuyển linh hoạt trên các bề mặt khác nhau. Các cơ chế bám dính thường được sử dụng bao gồm: lực từ tính [4 - 7], giác hút chân không [8], chân kẹp sinh học [9, 10] và thiết bị gắn cơ

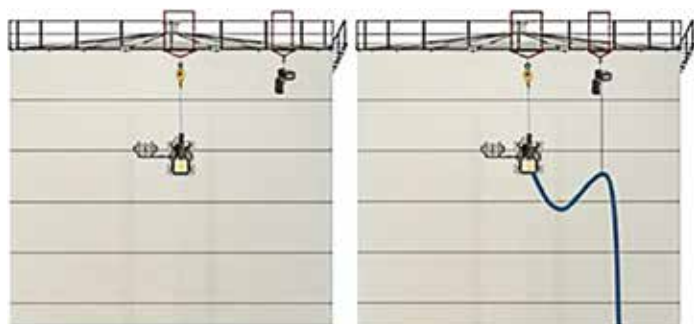
khí như đường ray, chân hoặc kẹp. Nhóm nguyên lý di chuyển có thể được chia thành 4 nhóm nhỏ hơn [11]: bánh xe, đường ray, chân và các thiết bị dựa trên bộ truyền động [11]. Hình 2 minh họa nguyên lý vận động của robot sử dụng nam châm vĩnh cửu trong quá trình khảo sát bồn trụ nổi.

Với đặc tính từ tính của thép carbon - vật liệu chế tạo chính của bồn trụ nổi chứa dầu, robot sử dụng nguyên lý bám dính từ tính được ứng dụng phổ biến. Phương pháp này thường sử dụng nam châm vĩnh cửu, như trong trường hợp robot của hãng Eddyfi [12], cho phép robot bám chắc trên bề mặt khảo sát mà không cần cung cấp thêm năng lượng. Trong những trường hợp cần điều chỉnh lực bám dính, nam châm điện được sử dụng như một giải pháp thay thế hiệu quả [13].

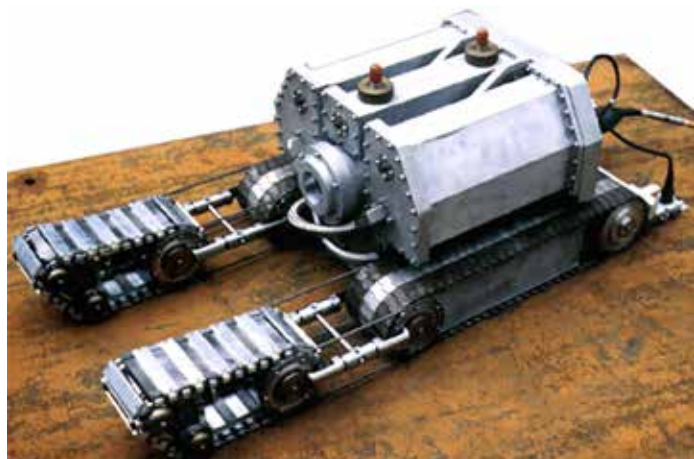
Cơ chế bám dính bằng khí nén là công nghệ phổ biến trong robot kiểm tra kết cấu thẳng đứng. Lực bám của robot tỷ lệ thuận với chênh lệch áp suất giữa buồng cốc hút và khí quyển. Ưu điểm của phương pháp này là robot có thể hoạt động trên nhiều loại vật liệu, không giới hạn ở bề mặt sắt từ như phương pháp bám dính từ tính. Hệ thống cốc hút điển hình bao gồm: 3 giác hút, 1 tấm đỡ, 1 bơm chân không và các phụ kiện khác đi kèm [14]. Robot ICM Rover là ví dụ ứng dụng cơ cấu này như giải pháp an toàn chống rơi trong quá trình khảo sát.

Phương pháp bám dính mô phỏng sinh học đang được nhiều doanh nghiệp phát triển để tạo robot leo bồn hiệu quả. Một nghiên cứu đã phát triển robot 4 chân với 12 lưỡi câu [15], mô phỏng kỹ thuật chuyển động của vận động viên leo núi và mèo trên bề mặt thẳng đứng. Hyouk Ryeol Choi and Se-gon Roh [16] đề xuất phương pháp lấy cảm hứng từ ngón chân tắc kè (gecko), sử dụng tấm gạch cứng được hỗ trợ bởi vật liệu đàn hồi và đường gân không co giãn, giúp bộ phận leo tiếp xúc tối ưu với bề mặt.

Robot Neptune, do Viện Robotics tại Đại học Carnegie Mellon phát triển, là một trong những robot kiểm tra bồn chứa điển hình cùng với Maverick và Scavenger. Neptune được thiết kế để kiểm tra các bồn chứa dầu trên mặt đất mà không cần làm sạch sản phẩm. Robot được trang bị các thành phần chuyên biệt: Bánh xích để di chuyển vào bên trong bể; cảm biến siêu âm để phát hiện rò rỉ và định vị; camera HD để thu thập hình ảnh; cảm biến siêu âm đo chiều dày, giúp lập bản đồ chiều dày và kiểm tra



Hình 2. Robot khảo sát bồn kim loại chứa xăng dầu.



Hình 3. Robot kiểm tra trong bồn của Neptune [17].

đường hàn [17]. Hình 3 minh họa cấu tạo và hoạt động của robot Neptune.

Các robot khảo sát bồn chứa thường được trang bị thiết bị kiểm tra ăn mòn và khuyết tật tương tự nhau, chỉ khác biệt chủ yếu ở cơ chế leo bồn và hệ thống điều khiển. Đáng chú ý là robot của Osaka Gas đã ứng dụng công nghệ mới, sử dụng nguyên lý sóng siêu âm chỉ nhiễu xạ khi có khuyết tật, mang lại hiệu quả cao hơn về thời gian và chi phí so với phương pháp phản xạ xung siêu âm truyền thống.

Hệ thống điều hướng của robot đã được phát triển theo nhiều hướng khác nhau. Hua Wang và cộng sự đề xuất kết hợp thuật toán CMAC mờ (fuzzy CMAC) với mạng neuron để nâng cao hiệu suất điều hướng thông qua hệ thống điều khiển theo dõi. Trong khi đó, Raúl Fernández và cộng sự [18] ứng dụng phương pháp máy chủ/máy khách để điều hướng tự động cho mẫu robot leo bồn.

Hệ thống máy chủ/máy khách phân chia chức năng điều khiển robot theo 2 cấp độ. Chương trình máy khách tập trung vào điều khiển cục bộ, đảm bảo di chuyển và điều hướng an toàn. Trong khi đó, chương trình máy chủ tại phòng điều khiển thực hiện các nhiệm vụ như thu thập dữ liệu hình ảnh và phát hiện ăn mòn/khuyết tật. Tuy nhiên, phương pháp này không phù hợp với bồn chứa thành mỏng, vì trọng lượng và kích thước của robot có thể gây biến dạng bề mặt bồn chứa.

Fischer [19] đề xuất giải pháp kết cấu mẹ/con cho bồn chứa thành mỏng. Robot mẹ có kích thước lớn, di chuyển trên đường ray gắn trên bồn, đảm nhiệm chức năng bám dính và vận động. Robot con được thiết kế có trọng lượng rất nhẹ chỉ mang thiết bị dò tìm cần thiết. Về mức độ tự động hóa, robot kiểm tra bồn chứa chủ yếu là bán tự động, đòi hỏi giám sát từ xa của người vận hành. Tuy nhiên, Kalra [4] đã phát triển cơ chế điều khiển không dây mới, cho phép robot vận hành hoàn toàn tự động.

Nam châm được lựa chọn là phương pháp bám dính tối ưu cho robot leo bồn, do bồn trụ đứng dung tích lớn chủ yếu được chế tạo bằng thép từ tính. Hiện nay, có 3 dạng robot leo bồn sử dụng nguyên lý bám dính từ tính gồm: Robot dạng bánh xích, robot dạng bánh xe từ và robot dạng thanh răng. Các loại robot đang được thử nghiệm và ứng dụng trong công nghiệp sẽ được phân tích tính năng, đánh giá khả năng áp dụng, từ đó đề xuất phương án phát triển robot khảo sát ăn mòn và khuyết tật của các bồn chứa dầu của Petrovietnam.

3. Các dạng robot leo bồn trụ đứng điển hình

3.1. Robot leo bồn thử nghiệm dạng bánh xích bám dính bằng nam châm vĩnh cửu

Weimin Shen và cộng sự đã phát triển robot kiểm tra không phá hủy (NDT) cho bồn chứa nhiên liệu, nhằm thay thế phương pháp sử dụng giàn giáo truyền thống. Robot được thiết kế để hoạt động bồn chứa có bán kính 5 - 10 m, chiều cao 15 - 20 m với cấu trúc đặc thù là các tấm thép hàn nối nhiều tầng có độ dày khác nhau, tạo ra đường hàn khoảng 10 mm. Để đáp ứng điều kiện hoạt động, robot được thiết kế có khả năng mang theo thiết bị NDT tối thiểu 30 kg và di chuyển với tốc độ 5 - 10 m/phút. Đặc biệt, robot phải vượt qua được các mối hàn mà không bị rơi và có thể điều khiển từ xa trong phạm vi tối thiểu 50 m. Với các tính năng này, robot có thể thực hiện được nhiều chức năng như kiểm tra vết rỗ, nứt trên thân bồn, phun cát và phun sơn bề mặt...

Weimin Shen và cộng sự đã chế tạo thành công robot leo bồn thử nghiệm vào năm 2006 [20], sau 1 năm nghiên cứu. Robot được trang bị hệ thống nam châm vĩnh cửu kích thước $52 \times 55 \times 28 \text{ mm}^3$, có trọng lượng 3,5 N cho mỗi nam châm, tạo lực hút 150 N cho mỗi tổ hợp với khe hở là 3 mm. Tổng lực hút của hệ thống nam châm đạt trên 2.700 N, cho phép robot di chuyển an toàn và chắc chắn trên thành bồn với tải trọng lớn hơn 350 N.

Trong cùng thời điểm, Love P. Karla và cộng sự đã công bố robot leo bồn thử nghiệm sử dụng cảm biến NDT để kiểm tra khuyết tật thân bồn nổi chứa xăng dầu hình trụ (Hình 4) [4].

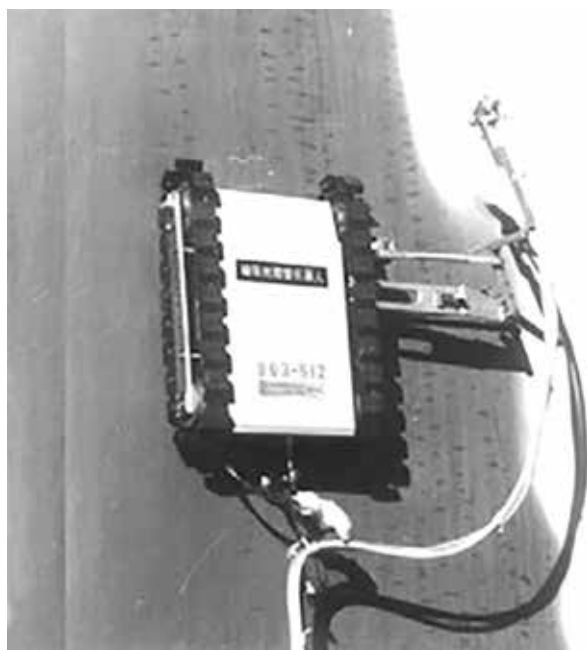
Nghiên cứu tập trung phát triển giải thuật di chuyển cho robot trên bồn chứa có chướng ngại vật là cầu thang hàn trực tiếp vào thân bồn chứa, nối từ đáy lên đỉnh, các đường hàn cao 2 - 3 cm. Việc thử nghiệm được thực hiện trên bồn chứa 3 tầng (3 courses) có cầu thang bộ như Hình 5.



Hình 4. Cấu trúc cơ khí của robot kiểm tra vết nứt bồn trụ nổi chứa xăng dầu [4].



Hình 5. Thử nghiệm robot phát hiện vết nứt trên thân bồn chứa nhiên liệu hình trụ đứng [4].



Hình 6. Robot leo bồn do Đại học Dalhousie nghiên cứu chế tạo [10].



Hình 7. Robot MINI Climber [21].

Các thử nghiệm được thực hiện nhằm đánh giá: khả năng bám dính của đường ray trên bề mặt cong, ảnh hưởng của chuyển động xoay và phản ứng của nam châm với bề mặt bị gỉ sét và bong tróc sơn. Robot được trang bị camera không dây để ghi lại hành trình di chuyển và dây an toàn để phòng trường hợp nam châm bị rơi. Với yêu cầu di chuyển theo cả chiều dọc và ngang, robot được thiết kế theo dạng bánh xích, sử dụng phương pháp bám dính bằng nam châm vĩnh cửu (permanent magnetic adsorption method) và cơ chế di chuyển dạng track (tracked locomotion mode). Mặc dù chỉ là mô hình thử nghiệm, kết quả nghiên cứu này có ý nghĩa quan trọng trong việc phát triển robot khảo sát ăn mòn thân bồn chứa nhiên liệu cho ngành công nghiệp dầu khí Việt Nam.

3.2 Robot thử nghiệm của Đại học Dalhousie

Đại học Dalhousie đã nghiên cứu, chế tạo robot leo tường để kiểm tra đường hàn, khuyết tật và mức độ ăn mòn của bồn chứa nhiên liệu có đường kính trên 15 m (Hình 6). Robot có cấu tạo đơn giản với khung nhôm dày 3 mm và trọng lượng 13,6 kg. Hệ thống bám dính gồm 2 dây đai, mỗi đai gắn 24 thanh nam châm vĩnh cửu (kích thước 50,8 x 12,7 x 6,4 mm). Robot được trang bị 2 động cơ Astro flight 940P (24 volt, 750 watts), cho phép di chuyển với tốc độ 10 m/phút. Mặc dù có ưu điểm về kết cấu đơn giản và tốc độ di chuyển nhanh, nhưng robot này chưa được ứng dụng vào thực tế.

3.3. Robot MINI Climber IMC

Robot MINI Climber của IMC (Hình 7) được thiết kế để kiểm tra các công trình có không gian hẹp như đập thủy điện, turbine gió và tàu ngầm. Robot có kích thước nhỏ gọn (35 x 38 cm), trọng lượng 9 kg và được trang bị 1 cánh tay robot. Ưu điểm của MINI Climber là sử dụng vật liệu composite (sợi carbon và epoxy) giúp giảm thiểu trọng lượng, đồng thời tích hợp hệ thống định vị tia laser để tối ưu hóa chuyển động trong không gian hạn chế. Tuy nhiên, công nghệ bản quyền khiến chi phí sử dụng robot này khá cao.

3.4. Robot Scorpion B-Scan

Robot Scorpion B-Scan do Silverwing (Mỹ) phát triển (Hình 8) là robot kiểm tra khuyết tật bên trong bồn chứa nhiên liệu bằng đầu dò siêu âm. Robot có kích thước 385 x 222 x 102 mm, trọng lượng 4,74 kg, lực hút nam châm 13,6 kg, tốc độ di chuyển 25 mm/giây, phạm vi hoạt động 30 m (theo chiều dài cáp). Hệ thống truyền động là 4 bánh



Hình 8. Robot Scorpion2 [22].

xe với 4 động cơ độc lập 12 VDC. Robot này có ưu điểm là thiết kế nhẹ, khả năng di chuyển nhanh và linh hoạt trên bề mặt bồn chứa. Tuy nhiên, robot cũng có hạn chế là chi phí cao, hiệu suất làm việc thấp do diện tích quét nhỏ, đầu dò chuyên biệt có cấu tạo phức tạp, khó thay thế.

3.5. Robot RMS2

Robot RMS2 (Rinaldi Mechatronic Systems) là thiết bị chuyên dụng đánh giá ăn mòn sử dụng phương pháp siêu âm 3 chiều, với chức năng hiển thị C-Scan để xác định chiều dày (Hình 9). Robot này có ưu điểm là khả năng kiểm tra nhanh, chính xác và hiệu suất cao. Tuy nhiên, robot có hạn chế về mặt kỹ thuật như cấu tạo phức tạp, trọng lượng lớn, khó chế tạo và chi phí bảo trì cao.



Hình 9. Robot RMS2 - 600 [23].

3.6. Robot Tripod

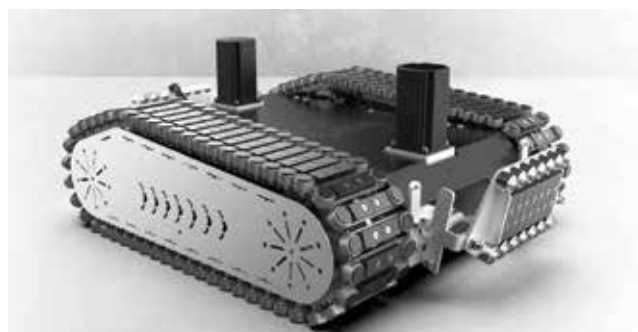
Jirech đã nghiên cứu thiết kế và chế tạo robot Tripod có các bánh xe gắn các nam châm giúp Tripod di chuyển dễ dàng theo phương thẳng đứng hoặc theo phương ngang trên bề mặt vật liệu là sắt thép (Hình 10). Đặc biệt, Tripod có thể xoay 360°. Tripod được sử dụng để kiểm tra chất lượng đường hàn, khuyết tật bên trong vật liệu, kiểm tra độ ăn mòn của đường ống hay bồn chứa nhiên liệu. Tripod được thiết kế với kích thước dài 450 mm, rộng 394 mm và cao 165 mm, di chuyển với vận tốc có thể thay đổi được trong phạm vi 0 - 304,8 mm/giây, nặng 13,6 kg và phạm vi điện áp là 10 VDC - 30 VDC (28 VDC khi hoạt động). Lực hút của các bánh xe nam châm 90,72 kg. Ưu điểm là thiết kế đơn giản, thẩm mỹ cao, tốc độ di chuyển nhanh và linh hoạt, năng suất kiểm tra cao. Tuy nhiên giá thành robot rất cao.



Hình 10. Robot Tripod [24].

3.7. Robot GECKO-MA600

Robot GECKO-MA600 (Hình 11) sử dụng cơ cấu bám tường bánh xích. Trong cơ cấu bánh xích này, nam châm được gá trên mỗi mắt xích được dùng làm lực hút chính cho robot. Đồng thời nhờ vào lực ma sát giữa khối cao su và thành bồn làm lực bám, robot có thể di chuyển tự do trên bồn.



Hình 11. Robot GECKO-MA600 [25].

Bảng 1. Thông số kỹ thuật của robot GECKO-MA600

Thông số	Giá trị
Trọng lượng (kg)	80
Tải trọng tối đa (kg)	40
Vận tốc (m/giây)	0 - 0,11
Vật liệu	Thép không gỉ 304/nhôm
Góc leo tối đa (độ)	90°
Kích thước (dài × rộng × cao)	895 × 616 × 273 mm

Ngoài ra, nhằm tăng cường lực bám cho robot, ở 2 đầu robot còn được gắn thêm 2 cụm nam châm, có thể điều chỉnh góc so với thành bồn.

3.8. Robot Sumitomo

Robot Sumitomo (Hình 12) có cơ cấu truyền động được sử dụng là unit driver với 2 bậc tự do, giúp robot di chuyển linh hoạt giữa 2 chiều dọc và ngang trên thành bồn. Bánh xe từ tạo lực bám cho robot, có nhược điểm diện tích tiếp xúc đối với thành bồn nhỏ, dẫn tới độ ổn định bám dính không cao.

4. Công nghệ khảo sát tích hợp trong robot

Kiểm tra không phá hủy (NDT) để cập đến phương pháp đánh giá và thu thập dữ liệu về vật liệu, hệ thống hoặc thành phần mà không gây tổn hại đến đối tượng kiểm tra. Trong ngành công nghiệp dầu khí, có 4 phương pháp NDT được ứng dụng phổ biến để kiểm tra khuyết tật trong đường ống công nghệ và bồn chứa nhiên liệu: Kiểm tra trực quan (vision testing), kiểm tra siêu âm (ultrasonic testing - UT), kiểm tra dòng điện xoáy (Eddy current testing - ECT), kiểm tra rò rỉ đường sức từ (magnetic flux leakage - MFL).

4.1. Phương pháp kiểm tra trực quan

Kiểm tra trực quan là phương pháp NDT lâu đời và phổ biến nhất, từ việc sử dụng mắt thường để kiểm tra tình trạng bồn chứa đến hệ thống camera tích hợp trên robot. Phương pháp này có thể bổ sung đèn LED để quan sát trong điều kiện thiếu ánh sáng. Mặc dù đơn giản và dễ thực hiện, kiểm tra trực quan chỉ phát hiện được khuyết tật bề mặt, với chất lượng kiểm tra phụ thuộc vào điều kiện ánh sáng và kinh nghiệm của người thực hiện.

4.2. Phương pháp kiểm tra siêu âm - UT

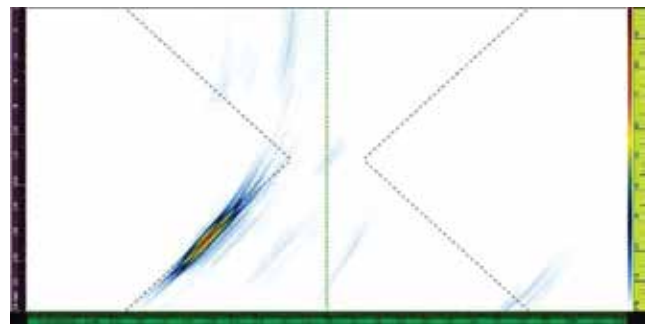
Phương pháp kiểm tra siêu âm là công nghệ quan trọng được tích hợp trên robot. Nguyên lý hoạt động dựa trên việc phát và thu nhận siêu âm phản xạ từ vật liệu. Cụ thể, chùm tia siêu âm được truyền vào kim loại, sau đó các tia phản xạ từ bề mặt và khuyết tật bên trong được ghi nhận và phân tích để xác định chiều dày kim loại, kích thước và vị trí khuyết tật. Phương pháp này có ưu điểm là độ chính xác và độ nhạy cao, phù hợp với nhiều loại vật liệu, chi phí thiết bị hợp lý và khả năng xác định chiều sâu khuyết tật. Tuy nhiên, phương pháp này cũng có hạn chế như khó phát hiện khuyết tật song song với chùm siêu âm và phụ thuộc nhiều vào kỹ năng của người thực hiện.



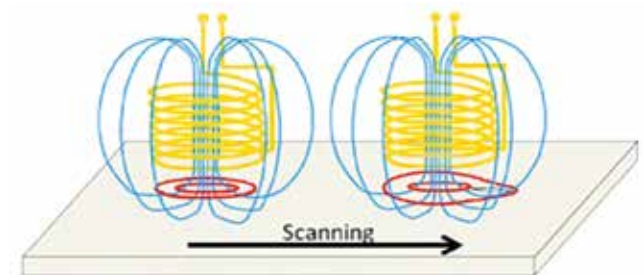
Hình 12. Robot Sumitomo [26].

Bảng 2. Bảng thông số kỹ thuật robot Sumitomo

Thông số	Giá trị
Vận tốc (cm/giây)	11
Tải trọng tối đa (kg)	12 kg (trần nhà), 4kg (bám tường)
Vật liệu	Thép không gỉ 304
Góc leo tối đa (độ)	90°
Kích thước (dài × rộng × cao)	307 × 525 × 135 mm



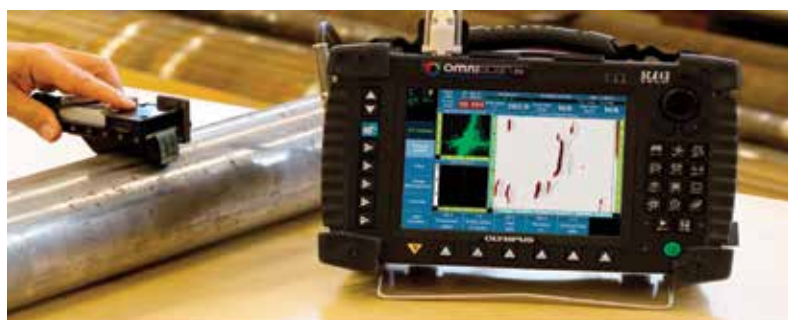
Hình 13. Phát hiện khuyết tật không ngẫu vách của mối hàn bằng kỹ thuật siêu âm xung - vọng.



Hình 14. Nguyên lý dòng điện xoáy.

4.3. Phương pháp dòng điện xoáy - ECT

Phương pháp dòng điện xoáy chủ yếu được sử dụng để đánh giá thành bồn chứa. Nguyên lý hoạt động dựa trên việc cuộn dây đầu dò phát ra xung từ trường, xuyên qua lớp cách điện giữa đầu dò và vật kiểm tra, tạo ra dòng điện cảm ứng trong vật liệu (Hình 14). Khi xuất hiện vết nứt trong kết cấu, dòng điện xoáy sẽ thay đổi, dẫn đến biến thiên trở kháng của cuộn dây. Việc theo dõi sự thay đổi này giúp đánh giá được tình trạng của vật liệu khảo sát.



Hình 15. Kiểm tra vết nứt, ăn mòn trên đường ống sử dụng ECT bằng thiết bị OmniScan ECA.

4.4. Phương pháp kiểm tra rò rỉ đường sức từ - MFL

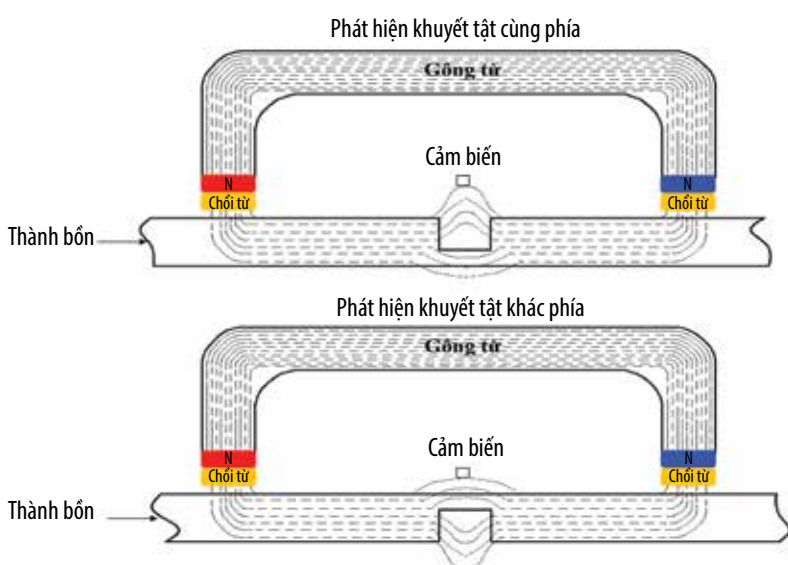
Phương pháp rò rỉ đường sức từ (MFL) hoạt động dựa trên cảm biến nhạy từ tính đặt trên kết cấu hoặc tấm vật liệu kim loại từ tính. Khi từ trường được tạo ra, các đường sức từ thường đi qua vật liệu kim loại, nhưng sẽ uốn cong và rò rỉ ra ngoài tại vị trí có khuyết tật (Hình 16). Các cảm biến sẽ phát hiện từ trường rò rỉ này và phân tích tín hiệu để xác định các thay đổi trong cấu trúc vật liệu.

MFL là phương pháp phổ biến nhất do có ưu điểm: Quy trình chuẩn bị đơn giản; dễ dàng thu nhận tín hiệu và đo đạc trực tuyến; có thể phát hiện khuyết tật cả bên trong và bên ngoài thành ống [27] và thành bồn chứa nhiên liệu [28 - 30].

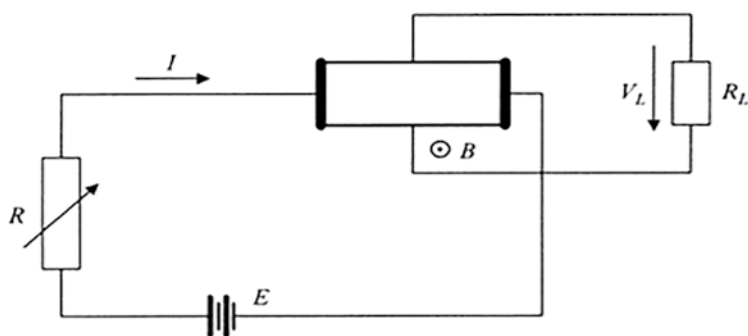
Nguyên lý hoạt động của phương pháp MFL bắt đầu từ việc từ hóa thành ống/thành bồn chứa (làm bằng vật liệu sắt từ) đến trạng thái gần bão hòa nhờ nam châm điện hoặc nam châm vĩnh cửu. Trong điều kiện bình thường, các đường sức từ sẽ chạy bên trong thành đường ống/thành bồn chứa. Tại các vị trí có khuyết tật, do độ từ thẩm giảm, đường sức từ bị rò rỉ ra ngoài, tạo thành từ trường có thể đo được bằng cảm biến từ. Bằng cách phân tích tín hiệu điện từ cảm biến, có thể xác định loại, hình dạng và mức độ của khuyết tật. Chính vì vậy, cảm biến từ đóng vai trò quan trọng trong việc quyết định hiệu suất của toàn bộ hệ thống MFL.

Cảm biến từ được sử dụng phổ biến trong phương pháp MFL là cảm biến cuộn dây (coil sensor) và cảm biến Hall (Hall effect sensor). Trong đó, cảm biến cuộn dây là thiết bị thụ động hoạt động theo định luật cảm ứng điện từ Faraday. Khi đi qua từ trường, cuộn dây sẽ sinh ra điện áp với độ lớn phụ thuộc vào 2 yếu tố: số vòng dây và tốc độ thay đổi của rò rỉ đường sức từ. Do đó, tốc độ di chuyển của cảm biến là yếu tố quan trọng ảnh hưởng đến chất lượng tín hiệu thu được.

Cảm biến Hall - Hall effect sensor:



Hình 16. Mô tả phương pháp MFL



Hình 17. Sơ đồ mạch cơ bản của cảm biến Hall.

Độ dày và tính chất vật liệu của đối tượng kiểm tra quyết định đặc trưng suy giảm của dòng cảm ứng. Bằng cách so sánh tín hiệu với 1 ống có độ dày bình thường, có thể đánh giá được độ dày còn lại của ống cần kiểm tra (Hình 15). Phương pháp dòng điện xoáy có nhiều ưu điểm như không cần chất tiếp âm, không đòi hỏi làm sạch bề mặt hay bóc lớp vỏ bọc, nhạy với khuyết tật bề mặt và có thể kiểm tra kết cấu nhiều lớp. Tuy nhiên, phương pháp này cũng có nhược điểm là vùng đo lớn không phát hiện được khuyết tật nhỏ và vết nứt, không phù hợp với hình dạng phức tạp, dễ bị ảnh hưởng bởi tính thẩm từ và không phát hiện được khuyết tật song song với bề mặt.

Bảng 3. So sánh 2 cảm biến Hall GaAs và InSb trong điều kiện thử nghiệm: cường độ dòng điện = 1 mA, mật độ từ thông = 100 mT, nhiệt độ 20°C

Loại	Độ nhạy (mV)	Dòng điều khiển (mA)	Độ phi tuyến (%)	Dải nhiệt độ (°C)	Hệ số nhiệt (%/°C)	Điện trở vào (Ω)
GaAs	5 - 50	1 - 5	0,1 - 1	-55 - 125	-0,06	500
InSb	20 - 270	< 20	> 1	-40 - 125	-2	150 - 500

Cảm biến Hall hoạt động dựa trên hiệu ứng Hall và được sử dụng để phát hiện và đo từ trường. Hình 17 là sơ đồ mạch cơ bản của cảm biến Hall [31]. Sức điện động Hall V_h được xác định qua biểu thức $V_h = \frac{I.B}{n.e.b}$.

Trong đó, V_h là sức điện động, I là cường độ dòng điện, n và e liên quan đến vật liệu chế tạo cảm biến Hall, B là mật độ từ thông. Đặt $K_h = (n.e.b)^{-1}$, khi đó:

$$B = \frac{V_h \times K_h}{I} \quad (1)$$

Từ biểu thức (1) cho thấy nếu I là hằng số, mật độ từ thông B tỷ lệ thuận với sức điện động V_h , khi đó mật độ rò rỉ đường sức có thể được đo chính xác bằng cảm biến Hall. Có 2 loại cảm biến Hall là GaAs và InSb. Bảng 3 so sánh các đặc tính của 2 loại cảm biến này.

Kết quả so sánh 2 loại cảm biến Hall (Bảng 3) cho thấy, cảm biến InSb có độ nhạy cao hơn trong khi GaAs có dải nhiệt độ hoạt động rộng hơn và độ tuyến tính tốt hơn. Vì thế, GaAs được ưu tiên lựa chọn do đáp ứng tốt yêu cầu về độ ổn định của hệ thống MFL. Silverwing (UK) kết hợp nam châm vĩnh cửu với cảm biến Hall cho phép kiểm tra tấm thép có độ dày lên đến 20 mm [32].

Phương pháp MFL có ưu điểm: Khả năng phân tích khuyết tật thông qua độ lớn tín hiệu, thiết bị nhỏ gọn, có thể hoạt động trong nhiều giờ, phát hiện được khuyết tật trong và ngoài thành ống mà không cần tiếp xúc trực tiếp, điều khiển tự động và vận hành đơn giản. Bên cạnh đó, phương pháp MFL cũng có hạn chế: Chỉ áp dụng được cho vật liệu sắt từ; yêu cầu kỹ năng và kinh nghiệm khi vận hành; cần thực hiện chuẩn hóa tín hiệu bằng khuyết tật giả; gặp khó khăn trong việc phát hiện khuyết tật song song với hướng từ trường; bị giới hạn ở độ dày 20 mm và dễ bị ảnh hưởng bởi nhiễu từ môi trường.

Qua việc phân tích các công nghệ và cảm biến tích hợp trên robot có thể thấy mỗi phương pháp đều có ưu nhược điểm riêng. Do đó, việc lựa chọn công nghệ và cảm biến phù hợp cần dựa trên sự cân nhắc kỹ lưỡng giữa khả năng ứng dụng và hạn chế của từng phương pháp.



Hình 18. Kiểm tra bồn chứa nhiên liệu theo phương pháp thủ công.

5. Nghiên cứu ứng dụng robot kiểm tra bồn chứa nhiên liệu hình trụ đứng

Các đơn vị thành viên của Petrovietnam đang quản lý vận hành số lượng lớn bồn chứa nổi hình trụ đứng để chứa xăng dầu, LPG, LNG... Phương pháp kiểm tra thủ công không chỉ tốn thời gian, nhân lực mà còn tiềm ẩn các rủi ro tai nạn nghề nghiệp (Hình 18).

Kết quả khảo sát Công ty CP Lọc hóa dầu Bình Sơn (BSR), các đơn vị thành viên của Tổng công ty Khí Việt Nam - CTCP (PV GAS), Tổng công ty Dầu Việt Nam - CTCP (PVOIL) cho thấy bồn chứa nhiên liệu được chế tạo từ thép carbon (vật liệu có từ tính). Do đó, việc nghiên cứu và phát triển robot kiểm tra bồn chứa với cơ chế bám dính từ tính và di chuyển bằng bánh xích hoặc bánh xe từ giải pháp phù hợp và thiết thực.

Robot được thiết kế để thực hiện đa chức năng gồm: Phun cát làm sạch bề mặt, phun sơn và phát hiện các khuyết tật như vết nứt, rỗ thân bồn từ đó để xuất giải pháp bảo dưỡng, sửa chữa hoặc thay thế phù hợp. Dựa trên việc phân tích các kỹ thuật NDT và đặc điểm vật liệu thép từ tính của bồn chứa dầu khí, phương pháp MFL (sử dụng nam châm vĩnh cửu và cảm biến từ Hall) được xác định là giải pháp phù hợp nhất để phát hiện ăn mòn trên bồn chứa nổi hình trụ đứng.

6. Kết luận

Bài báo đã tổng hợp và phân tích các dạng robot khảo sát bồn chứa nổi hình trụ đứng về công nghệ điều khiển, khả năng áp dụng và tính năng. Đồng thời, đánh giá các công nghệ và phương pháp khảo sát ăn mòn được tích hợp trên robot, phân tích ưu nhược điểm để ứng dụng cho công tác bảo dưỡng sửa chữa. Đối với các bồn chứa nhiên liệu do các đơn vị của Petrovietnam quản lý vận hành, nhóm tác giả đề xuất

ngiên cứu, phát triển robot có cơ chế bám dính từ tính phù hợp với vật liệu chế tạo bồn chứa, kết hợp với phương pháp MFL để phát hiện ăn mòn thân bồn chứa có độ dày tấm thép tối đa 20 mm.

Tài liệu tham khảo

- [1] Leijian Yu, Erfu Yang, Peng Ren, Cai Luo, Gordon Dobie, Dongbing Gu, and Xiutian Yan, "Inspection robots in oil and gas industry: A review of current solutions and future trends", *25th International Conference on Automation and Computing (ICAC)*, Lancaster, UK, 5 - 7 September 2019. DOI: 10.23919/ICAC.2019.8895089.
- [2] Aisha H. Al-Moubaraki and Ime Bassey Obot, "Corrosion challenges in petroleum refinery operations: Sources, mechanisms, mitigation, and future outlook", *Journal of Saudi Chemical Society*, Volume 25, Issue 12, 2021. DOI: 10.1016/j.jscs.2021.101370.
- [3] Fabien Tâche, Wolfgang Fischer, Roland Moser, Francesco Mondada, and Roland Siegwart, "Adapted magnetic wheel Unit for compact robots inspecting complex shaped pipe structures", *IEEE/ASME international conference on advanced intelligent mechatronics*, Zurich, Switzerland, 4 - 7 September 2007. DOI: 10.1109/AIM.2007.4412506.
- [4] Love P. Kalra, Jason Gu and Max Meng, "A wall climbing robot for oil tank inspection", *IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics*, Kunming, China, 17 - 20 December 2006. DOI: 10.1109/ROBIO.2006.340155.
- [5] Alexander H. Slocum, Shorya Awtar, and John Hart, "Magnebots - A magnetic wheels based overhead transportation concept", *IFAC Proceedings Volumes*, Volume 35, Issue 2, pp. 761 - 766, 2002. DOI: 10.1016/S1474-6670(17)34031-4.
- [6] Annual IEEE Computer Conference, "IEEE International Symposium on Intelligent Systems and Informatics 8 2010.09.10-11 Subotica, and SISY 8 2010.09.10-11 Subotica", *8th International Symposium on Intelligent Systems and Informatics (SISY)*, 10 - 11 September 2010, Subotica, Serbia.
- [7] Jizhong Xiao, Ali M. Sadegh, M. Elliott, A. Calle, A. Persad, and Ho Ming Chiu, "Design of mobile robots with wall climbing capability", *IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*, February 2005. DOI:10.1109/AIM.2005.1501030.
- [8] Baeksuk Chu, Kyungmo Jung, Chang-Soo Han, and Daehie Hong, "A survey of climbing robots: Locomotion and adhesion", *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, Volume 11, Issue 4, pp. 633 - 647, 2010. DOI: 10.1007/s12541-010-0075-3.
- [9] Wolfgang Fischer, Fabien Tâche, and Roland Siegwart, "Magnetic wall climbing robot for thin surfaces with specific obstacles", *Field and Service Robotics*. Springer, 2007. DOI: 10.1007/978-3-540-75404-6_53.
- [10] Jason Gu and Peter X. Liu, *2005 IEEE International Conference on Mechatronics and Automations*. IEEE, 2005. DOI: 10.1109/ICMA.2005.1626938.
- [11] Eddyfi Technologies, "Tank integrity inspection solutions." [Online]. Available: <https://www.eddyfi.com/doc/ProductsDownloadables/Eddyfi-Storage-Tanks-Inspection-Solutions-01.pdf>.
- [12] Manuel F. Silva, Ramiro S. Barbosa, and António L.C. Oliveira, "Climbing robot for ferromagnetic surfaces with dynamic adjustment of the adhesion system", *Journal of Robotics*, 2012. DOI: 10.1155/2012/906545.
- [13] Guisheng Fang and Jinfeng Cheng, "Advances in climbing robots for vertical structures in the past decade: A review", *Biomimetics*, Volume 8, Issue 1, 2023. DOI: 10.3390/biomimetics8010047.
- [14] Wei Song, Hongjian Jiang, Tao Wang, Daxiong Ji, and Shiqiang Zhu, "Design of permanent magnetic wheel-type adhesion-locomotion system for water-jetting wall-climbing robot", *Advances in Mechanical Engineering*, Volume 10, Issue 7, 2018. DOI: 10.1177/1687814018787378.
- [15] Maki K. Habib, *Bioinspiration and robotics walking and climbing robots*. InTechOpen, 2007. DOI: 10.5772/46.
- [16] H. Schempf, B. Chemel, and N. Everett, "Robot system", 1995.
- [17] IEEE, *7th World Congress on intelligent control and automation*, 2008. DOI: 10.1109/WCICA.2008.4592783.
- [18] Raúl Fernández, Elizabeth González, Vicente Feliú, and Antonio González Rodríguez, "A wall climbing robot for tank inspection. An autonomous prototype", *36th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society*, Glendale, AZ, USA, 7 - 10 November 2010. DOI: 10.1109/IECON.2010.5675473.
- [19] Günther Fischer, Francesco Nicola Tubiello, Harrij van Velthuisen, and David Wiberg, "Climate change impacts on irrigation water requirements: Effects of mitigation, 1990-2080", *Technological Forecasting and Social Change*, Volume 74, Issue 7, pp. 1083 - 1107, 2007. DOI:10.1016/j.techfore.2006.05.021.

- [20] Weimin Shen, J. Gu, and Yanjun Shen, "Permanent magnetic system design for the wall-climbing robot", *Applied Bionics and Biomechanics*, Volum 3, Issue 3, pp. 151 - 159, 2006. DOI: 10.1533.abbi.2006.0024.
- [21] https://static.wixstatic.com/media/bfb2aa_947afd8e13164edc9de421abb717cf8a~mv2.jpg/v1/fill/w_864,h_648,al_c/bfb2aa_947afd8e13164edc9de421abb717cf8a~mv2.jpg?C6%B0.
- [22] Mu'ayna, "Our vision & values". [Online]. Available: <https://muayna.com/>.
- [23] SA, "Rapid motion scanner RMS2". [Online]. Available: <https://sa-international.org/services/advanced-ndt/rms2/>.
- [24] JIREH, "Actuated probe lifts". [Online]. Available: <https://www.jireh.com/products/actuated-probe-lifts/>.
- [25] JCS Robot, "GECKO-MA600 magnetic wall climbing robot chassis (40kg)". [Online]. Available: <https://www.jcsrobot.com/product/GECKO-MA600.html>.
- [26] Sumitomo Heavy Industries, Ltd., "Successful development of magnetic wheeled robot capable of traveling over curved steel surfaces". [Online]. Available: <https://www.shi.co.jp/english/info/2022/6kgpsq0000003be1.html>.
- [27] Fujun Liu, Xiaolian Guo, Dongming Hu, Weican Guo, and Nanhui Jin, "Comprehensive inspection and evaluation technique for atmospheric storage tanks", *Nondestructive Testing and Evaluation*, Volume 25, Issue 1, pp. 45 - 59, 2010, DOI: 10.1080/10589750902795358.
- [28] Z.W. Cui, Zhenguo G. Sun, Wenzeng Z. Zhang, and Q. Chen, "Permanent magnet absorbed repairing end effector for wall-climbing robot", *International Conference on Electrical, Automation and Mechanical Engineering*, 2015. DOI:10.2991/eame-15.2015.28.
- [29] Shaheidula Batai, "Development of a wall-climbing robot for boiler tube inspection", 2018.
- [30] X-C Song, X-J Wu and Y-H Kang, "An inspection robot for boiler tube using magnetic flux leakage and ultrasonic methods", *Insight - Non-Destructive Testing and Condition Monitoring*, Volume 46, Issue 5, pp. 275 - 278, 2004. DOI:10.1784/insi.46.5.275.55566.
- [31] Tao Jin, Peiwen Que, Tianlu Chen, and Qi Zhang, "Automatic data acquisition system for offshore oil pipeline magnetic flux leakage on-line inspection", *Journal of the Japan Petroleum Institute*, Volume 48, Issue 6, pp. 380 - 385, 2005. DOI:10.1627/jpi.48.380.
- [32] J.C. Drury I. Eng, and M. Insndt, "Magnetic flux leakage technology", Silverwing (UK) Limited.

STUDY THE APPLICATION OF ROBOTICS AND NON-DESTRUCTIVE TESTING METHODS TO INSPECT CORROSION OF FUEL TANKS AT MEMBER UNITS OF PETROVIETNAM

Nguyen Thi Lan^{1,2}, Huynh Khắc Tam², Thai Lam Cuong Quoc²

¹Petrovietnam University (PVU)

²Ho Chi Minh City University of Technology (HCMUT) - Vietnam National University Ho Chi Minh City

Email: ntlan.sdh231@hcmut.edu.vn

Summary

Corrosion and cracking in fuel tanks or oil and gas pipelines can cause severe consequences for both humans and the environment. This study introduces and analyzes various types of wall-climbing robots integrated with non-destructive testing (NDT) methods for inspecting and assessing corrosions of fuel tanks. By analyzing the advantages and disadvantages of each method, the authors propose integrated solutions that combine wall-climbing robots and suitable NDTs to inspect corrosion of fuel tanks at the member units of Petrovietnam.

Key words: Wall-climbing robot, non-destructive testing (NDT), tank inspection.