

# NGHIÊN CỨU, THIẾT KẾ, CHẾ TẠO MẪU THIẾT BỊ KIỂM TRA ĂN MÒN ĐÁY BỒN CHỨA XĂNG DẦU BẰNG PHƯƠNG PHÁP TỪ THÔNG BIẾN DẠNG

**Đặng Quốc Triệu<sup>(1)</sup>, Bùi Trọng Duy<sup>(1)</sup>, Vương Đức Phụng<sup>(1)</sup>, Lại Viết Hải<sup>(1)</sup>,  
Trần Minh Tiến<sup>(1)</sup>, Trần Hữu Duy<sup>(2)</sup>**

(1) Trung tâm Ứng dụng kỹ thuật hạt nhân trong công nghiệp; (2) Trường Đại học Đà Lạt

Ngày nhận bài 20/12/2019; Ngày gửi phản biện 18/01/2020; Chấp nhận đăng 20/02/2020

Liên hệ email: dangquoctrieu@gmail.com

<https://doi.org/10.37550/tdmu.VJS/2020.03.037>

## **Tóm tắt**

*Bài báo trình bày nghiên cứu, thiết kế, chế tạo thiết bị kiểm tra ăn mòn đáy bồn chứa xăng dầu chôn ngầm dưới đất bằng phương pháp từ thông biến dạng sử dụng cảm biến Hall. Mục đích của nghiên cứu, chế tạo là phục vụ công tác đảm bảo an toàn tại các cơ sở lưu trữ xăng dầu. Kết quả bước đầu cho phép phát hiện vị trí khuyết tật trong mẫu thép cacbon với kích thước 40% bề dày mẫu, tuy nhiên hạn chế là chưa đánh giá được kích thước khuyết tật thành công. Đây là tiền đề để tiếp tục nghiên cứu phát triển thiết bị kiểm tra ăn mòn đáy bồn chứa xăng dầu tại các cơ sở lưu trữ và nhà máy lọc dầu tại Việt Nam.*

**Từ khóa:** từ thông biến dạng, từ trường rò, từ trường cảm ứng

## **Abstract**

**STUDY, DESIGN AND PRODUCTION OF A PROTOTYPE EQUIPMENT  
USED FOR INSPECTING BOTTOM CORROSION OF PETROLEUM TANKS  
BY METHOD MAGNETIC FLUX LEAKAGE**

*The paper presents study, design, and production of equipment for checking bottom corrosion of underground petroleum storage tanks by deformation magnetic flux method using Hall sensor. The purpose of design and production is to ensure safety at petroleum storage facilities. Preliminary results allow detecting the location of defects in carbon steel samples with a size of 40% of the thickness of the samples, but the limitation is that the size of successful defects has not been evaluated. This is the premise to continue researching and developing equipment for checking bottom corrosion of petroleum tanks at storage facilities and refineries in Vietnam.*

## **1. Giới thiệu**

Bồn chứa xăng dầu là một trong những hệ thống chức năng quan trọng trong các nhà thiết bị lọc hóa dầu, cơ sở lưu trữ xăng dầu... có nhiệm vụ tiếp nhận, tàng trữ các sản phẩm xăng dầu một cách an toàn. Trong quá trình vận hành bồn chứa xăng dầu có

thể bị biến dạng do nhiều nguyên nhân, trong đó vấn đề ăn mòn không được kiểm soát có thể gây ra những sự cố như thất thoát một lượng lớn sản phẩm xăng dầu, gây ô nhiễm môi trường, thậm chí nghiêm trọng hơn là sự cố cháy nổ. Vì vậy việc sử dụng phương pháp từ thông biến dạng (MFL - Magnetic Flux Leakage) để xác định, kiểm tra, đánh giá định kỳ vị trí và mức độ ăn mòn bồn chứa xăng dầu là nhu cầu cần thiết trong công tác đảm bảo an toàn cho thiết bị.

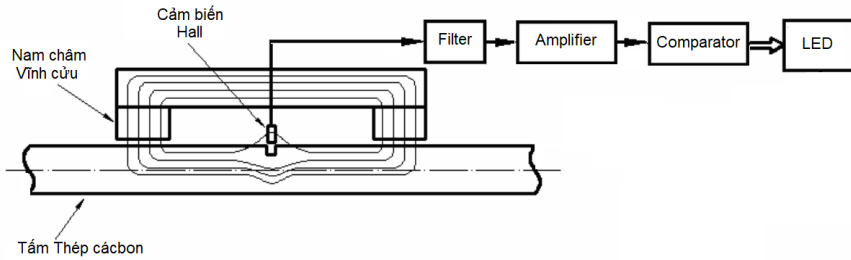
Có rất nhiều phương pháp như gamma tán xạ ngược, dòng điện xoáy (EC), siêu âm, từ thông biến dạng (MFL)... được sử dụng trong khảo sát ăn mòn đáy bồn chứa xăng dầu bằng kim loại. Mỗi phương pháp đều có những ưu điểm và hạn chế riêng tùy thuộc vào đối tượng và yêu cầu khảo sát. Trong đó phương pháp MFL là phương pháp tầm soát nhanh, có khả năng phát hiện ăn mòn đáy bồn chứa xăng dầu với độ nhạy cao (Keshwani, 2009). Mặc dù kỹ thuật Từ thông biến dạng MFL đã được áp dụng rộng rãi và hiệu quả từ lâu, nhưng trong thời gian gần đây vẫn còn rất nhiều nghiên cứu về công nghệ MFL ứng dụng trong kiểm tra không phá hủy (NDT), đặc biệt trong thiết bị con thoi thông minh (PIG). Các nghiên cứu mới về MFL hướng tới việc tích hợp các công nghệ mới, các phương pháp xử lý tín hiệu và số liệu tiên tiến đã làm tăng khả năng và mở rộng phạm vi ứng dụng của phương pháp. Một số kết quả mới nhất trong việc nghiên cứu MFL là khả năng phân biệt và nhận diện hình dạng và mức độ khuyết tật thông qua việc phân tích hình dạng của tín hiệu đo được. Về lĩnh vực đo đạc, cảm biến Hall với công nghệ chế tạo tiên tiến là lựa chọn hàng đầu về linh kiện trong việc chế tạo đầu dò MFL (Ke & Liao & Song, 2010).

Thiết bị ứng dụng MFL kiểm tra ăn mòn đáy bồn chứa xăng dầu đã được một số công ty phát triển thương mại như SilverwingNDT (Anh), MFE Enterprises (Mỹ). Các thiết bị thương mại này có khả năng kiểm tra tầm soát và đánh giá ăn mòn đáy bình bồn với độ tin cậy cao, phần mềm hiển thị và xử lý số liệu hiện đại nhưng có giá thành không ít hơn 100.000 USD. Một số cấu hình về sản phẩm thương mại của hai công ty SilverwingNDT và MFE Enterprises: phiên bản thứ nhất có cấu hình nhỏ gọn, dễ dàng thao tác, cấu hình thiết bị đo thấp, giá thành thấp hiển thị thông tin bằng LED và âm thanh nhưng khuyết điểm là không cho thông tin về độ lớn ăn mòn (Drury I.Eng, 2015).

## **2. Phương pháp nghiên cứu**

Phương pháp kiểm tra MFL sử dụng từ hóa vật liệu (thép carbon) bằng nam châm vĩnh cửu và sử dụng cảm biến Hall để phát hiện khuyết tật. Phương pháp MFL kiểm tra không phá hủy ứng dụng trong kiểm tra ăn mòn điểm và mất vật liệu trong các kết cấu thép nói chung và trong bồn chứa xăng dầu nói riêng. Dựa trên phương pháp MFL và cấu hình thiết bị Handscan thế hệ thứ nhất, sơ đồ khối mẫu thiết bị kiểm tra ăn mòn đáy bồn chứa xăng dầu bằng phương pháp từ thông biến dạng như Hình 1. Khi đặt thiết bị MFL lên bề mặt đối tượng kiểm tra (đáy bồn chứa xăng dầu) di chuyển thiết bị tịnh tiến, lúc này từ trường nam châm sẽ làm bão hòa đáy bồn chứa xăng dầu và tín hiệu sẽ được ghi nhận bởi cảm biến Hall (Kim & Yoo & Rho & Park, 2013). Giả sử có khuyết tật

trên khu vực mà thiết bị MFL đi qua, từ thông tại đây sẽ có sự thay đổi và sự thay đổi này sẽ được ghi nhận bởi cảm biến Hall. Tín hiệu lỗi ra của cảm biến Hall được đi qua tầng khuếch đại (Amplifier) đảm bảo mức tín hiệu từ 300mV÷5000mV. Tín hiệu sau khi khuếch đại đưa qua tầng so sánh (Comparator) tại đây tín hiệu được so sánh bởi mạch đặt ngưỡng cao và mạch ngưỡng thấp. Sau đó tín hiệu sẽ được chỉ thị thông qua đèn báo (LED). Người vận hành sẽ đánh dấu vị trí có thông báo khuyết tật và sử dụng phương pháp siêu âm để kiểm tra chéo và đánh giá mức độ khuyết tật.

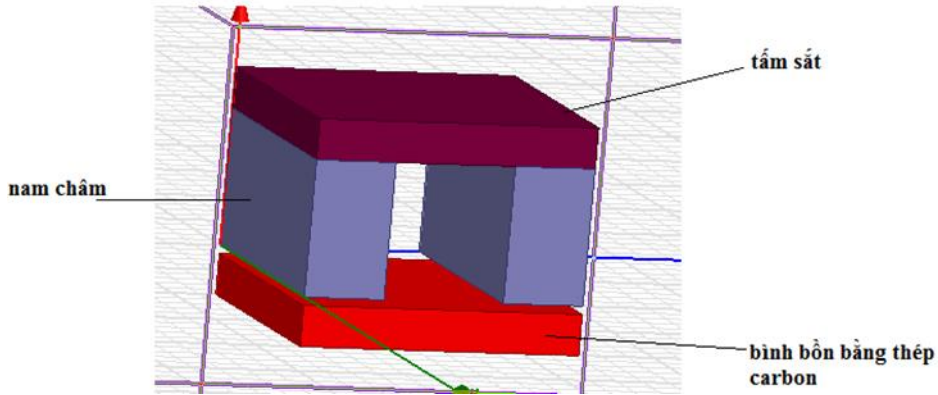


**Hình 1.** Sơ đồ thiết bị kiểm tra ăn mòn đáy bồn chứa xăng dầu bằng phương pháp từ thông biến dạng

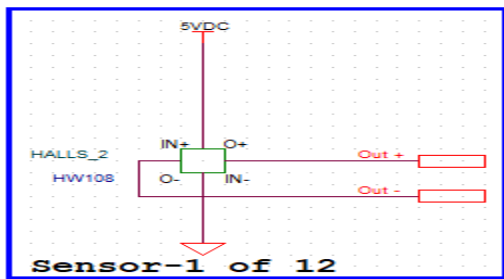
### 2.1. Thiết kế hệ đo

**Nam châm vĩnh cửu:** Tính toán kích thước nam châm phục vụ kiểm tra ăn mòn đáy bồn chứa xăng dầu bằng phương pháp từ thông biến dạng. Tính toán kích thước nam châm, vị trí đặt cảm biến Hall để từ trường tại cảm biến nằm trong khoảng 10mT đến 50mT. Sử dụng phần mềm Ansys Maxwell để mô phỏng ảnh hưởng của từ trường lên khuyết tật trong kỹ thuật MFL. Cấu hình mô phỏng sử dụng cấu hình nam châm chữ U được ghép bởi 2 nam châm vĩnh cửu ngược chiều và một tấm sắt (Feng & Zhang & Lu & Wang, 2013). Cả hai thanh nam châm vĩnh cửu được sử dụng bố trí cách nhau 45mm và có kích thước 100 x 30 x 50mm. Tấm sắt trên 2 thanh nam châm có kích thước 100 x 105 x 11mm. Vật liệu từ tính được sử dụng là Thép carbon S1008 có kích thước 100 x 105 x 11mm. Các khuyết tật hình trụ có bán kính và chiều sâu khác nhau được tạo ra ở giữa tấm thép carbon. Cảm biến được đặt nằm trên khuyết tật, cách nam châm ở những khoảng cách khác nhau.

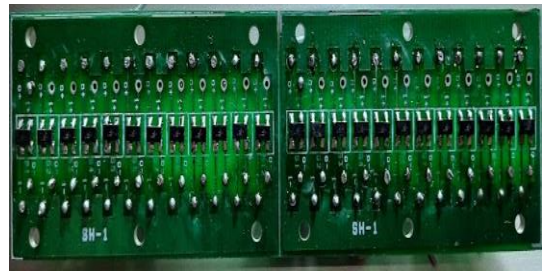
**Khối cảm biến Hall:** Từ kết quả tính toán mô phỏng cấu hình Nam châm và cường độ từ trường tại vị trí có khuyết tật trên tấm thép carbon khoảng 10mT ÷ 50mT đề tài lựa chọn cảm biến Hall HW108F. Cảm biến Hall HW108F được sản xuất bởi Asahi Kasei Corporation (Nhật Bản). Điện thế lỗi ra cảm biến Hall HW108F theo thông số của nhà sản xuất:  $V_H = 168mV - 320mV$  ( $B=50mT, V_c=1V$ ). Tín hiệu lỗi ra chân dương và chân âm (Hình 2) đi qua bộ lọc để xử lý nhiễu tạp âm tần số thấp và tiếp tục xử lý bởi các tầng sau. Mạch cảm biến Hall HW108F được thiết kế hai mảng cảm biến, số lượng cảm biến Hall trên mỗi mảng cảm biến là 12 cảm biến và tổng số cảm biến Hall là 24 cảm biến. Mảng cảm biến 24 kênh được thiết kế song song với đáy bồn chứa.



**Hình 2.** Cấu hình nam châm vĩnh cửu thiết bị MFL.



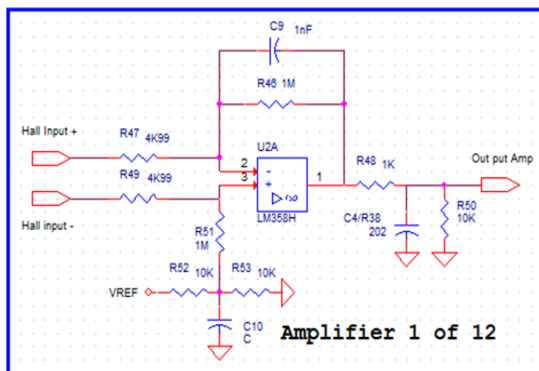
(a)



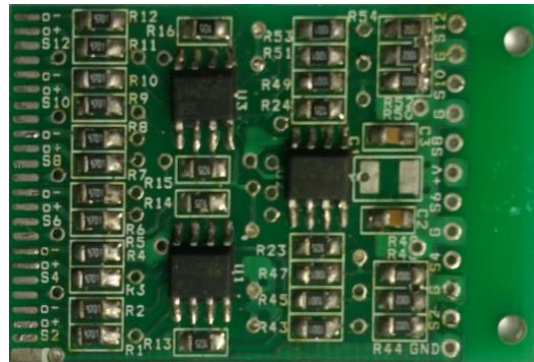
(b)

**Hình 3.** Mạch cảm biến Hall; (a) Sơ đồ nguyên lý; (b) Mạch in linh kiện.

**Khối khuếch đại:** Khối khuếch đại tín hiệu điện từ cảm biến Hall đảm bảo tín hiệu đủ lớn để đưa vào khối ngưỡng so sánh. Khối khuếch đại được thiết kế theo sơ đồ nguyên lý ở Hình 4.



(a)

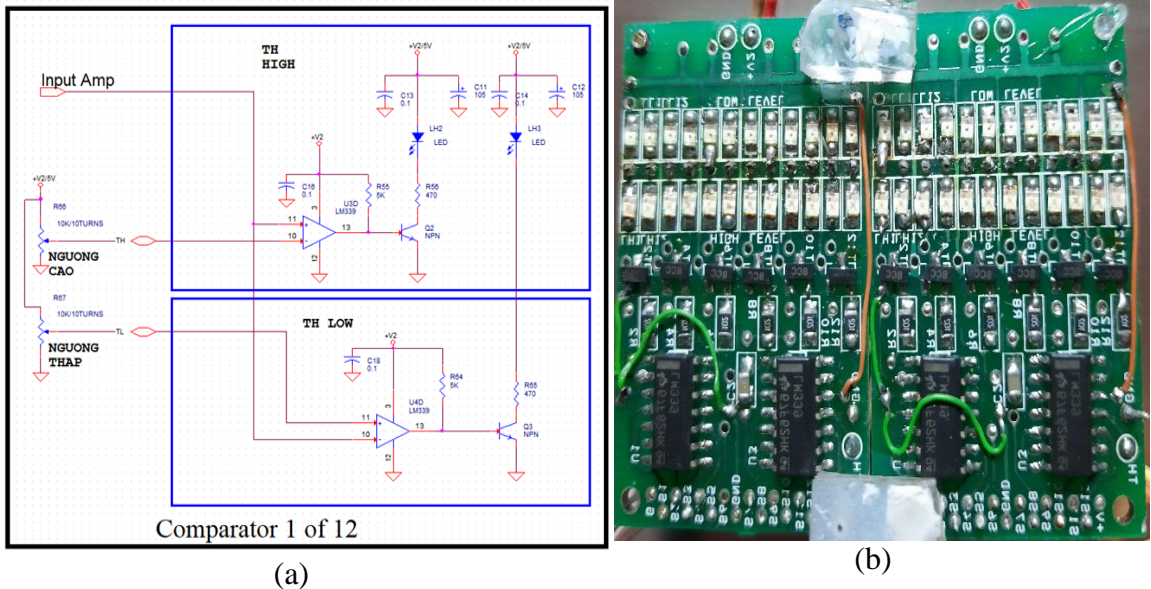


(b)

**Hình 4.** Mạch khuếch đại, (a) Sơ đồ nguyên lý; (b) Mạch in linh kiện.

**Khối so sánh:** Bộ sánh Op-amp là mạch so sánh điện áp tương tự với một mức điện áp khác hoặc với một điện áp tham chiếu ( $V_{REF}$ ) đặt trước, để tạo ra điện áp đầu ra dựa trên điện áp so sánh đầu vào. Nói cách khác, mạch so sánh điện áp op-amp là mạch so sánh độ lớn hai điện áp đầu vào và xác định điện áp nào là lớn nhất.

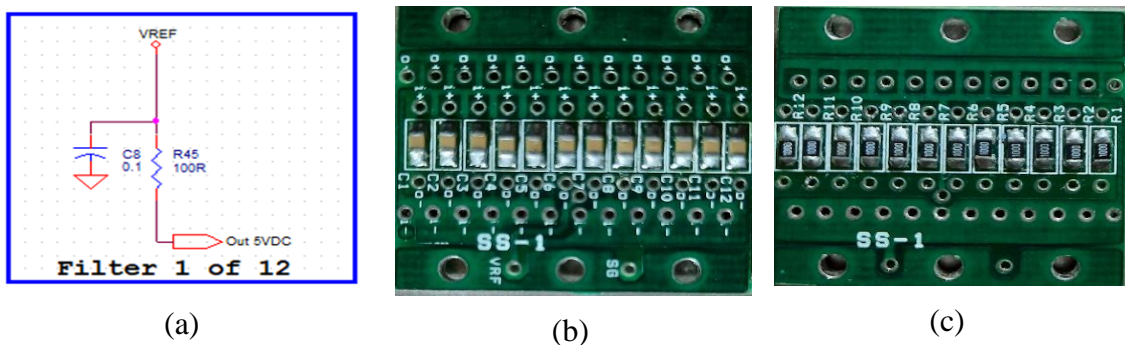
Sơ đồ nguyên lý mạch so sánh Comparator được thiết kế như Hình 5a. Mạch sử dụng op-amp so sánh LM339, điện áp so sánh được thiết lập bởi hai biến trở  $R_{66}$  ( $V_{RFE(UPPER)}$  - ngưỡng cao) và  $R_{67}$  ( $V_{RFE(LOWER)}$  - ngưỡng thấp). Mạch thiết kế thành phần phản hồi dương với  $R_{55}$  có tác dụng giảm nhiễu lồi ra. Tín hiệu điện áp lồi ra sau khi qua bộ so sánh LM339 sẽ điều khiển để đóng mở Trasistor 2N3904 để chỉ thị LED. Với LED LH2 là ngưỡng cao và LED LH3 là ngưỡng thấp, qua đó sẽ xác định được vị trí của khuyết tật kiểm tra.



**Hình 5.** Mạch so sánh và hiển thị LED, (a) Sơ đồ nguyên lý; (b) Mạch in linh kiện.

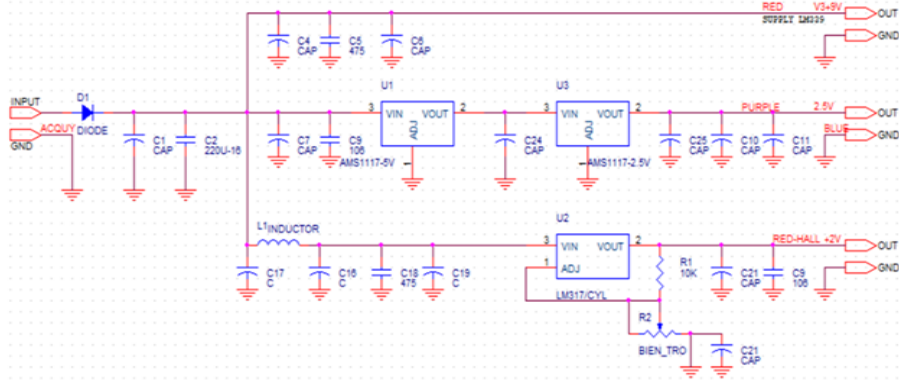
**Khối hiển thị LED:** Tín hiệu sau khi qua bộ so sánh điều khiển đóng mở Transistor 3904 để chỉ thị LED khi cảm biến Hall đi qua vị trí có khuyết tật (Hình 5b).

**Khối lọc Filter:** Tín hiệu lồi ra từ nguồn nuôi thế thấp có sự đóng góp của các phần tử nhiễu tần số thấp (rung lắc khi di chuyển, sự gò gè bề mặt đáy bồn), các nguồn nhiễu tần số thấp này được khắc phục bằng mạch lọc. Mạch lọc (Filter) có tính năng như bộ lọc thông cao (HPF), loại bỏ những tín hiệu nhiễu tần số thấp từ nguồn nuôi.



**Hình 6.** Mạch lọc Filter, (a) Sơ đồ nguyên lý; (b) & (c) Mạch in linh kiện.

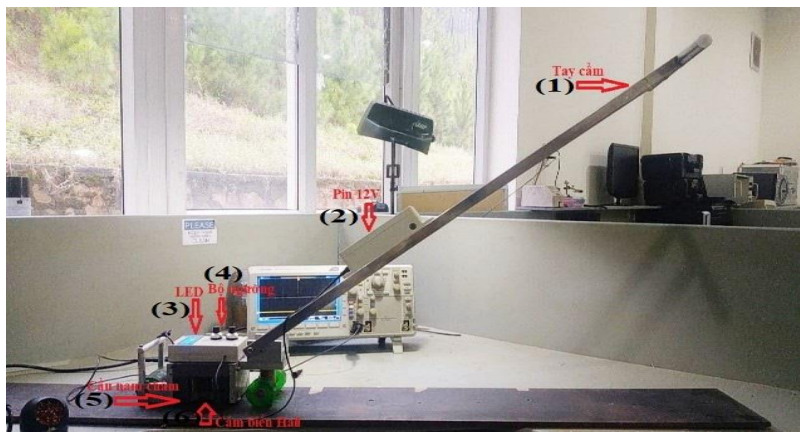
*Khối nguồn nuôi:* Nguồn nuôi trong mạch sử dụng từ bình ắc-quy 12V được ổn áp thành nguồn 5VDC và nguồn 2.5VDC cung cấp cho mạch hoạt động. Thiết kế mạch nguồn ổn định cho thiết bị MFL (Hình 7). Mạch sử dụng IC ổn áp AMS1117-5V, IC AMS1117-2.5V và IC LM317 để cấp nguồn cho mạch hoạt động.



**Hình 7.** Sơ đồ nguyên lý mạch nguồn nuôi.

## 2.2. Chế tạo hệ đo

Cấu hình đo thiết bị MFL được thiết kế là cấu hình đơn giản và phổ biến được ứng dụng trong việc kiểm tra phát hiện khuyết tật dưới đáy bồn chứa xăng dầu bằng thép. Thiết bị với cấu hình cầu nam châm cố định, thanh cảm biến nằm giữa cầu nam châm đặt song song với bề mặt vật liệu kiểm tra để phát hiện từ trường biến dạng từ khuyết tật vật liệu, thiết bị chuyển động song song trên bề mặt vật liệu kiểm tra được người vận hành điều khiển và đẩy bằng tay. Sau khi nghiên cứu một số cấu hình thiết bị MFL Handscan trên thế giới, thiết bị MFL được thiết kế chế tạo như Hình 8.



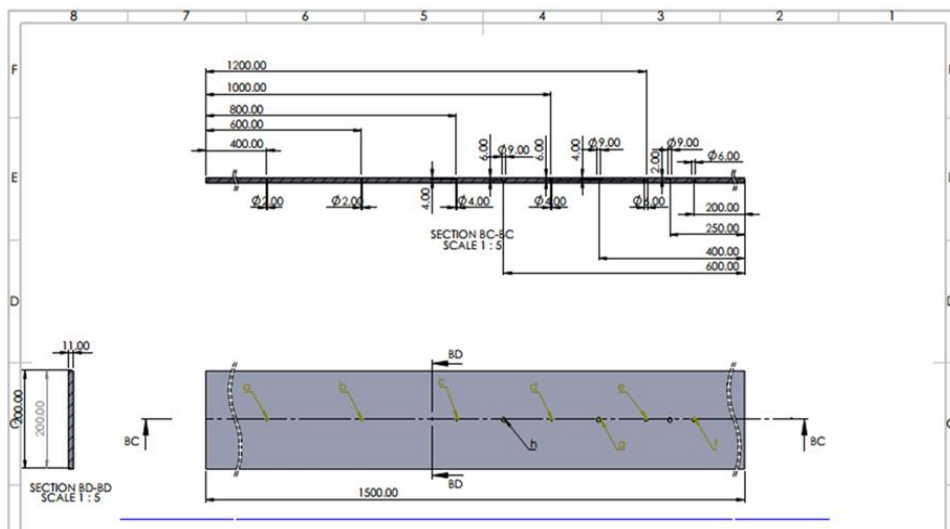
**Hình 8.** Thiết bị MFL MFL, (1) Tay cầm; (2) Pin 12V; (3) Đèn LED; (4) Bộ chỉnh ngưỡng so sánh; (5) Cầu nam châm; (6) Cảm biến Hall.

Thông số Thiết bị MFL: (1) Cảm biến Hall: 24 cảm biến; (2) Độ rộng scan: 100 mm (4"); (3) Nam châm vĩnh cửu; (4) Tốc độ đi chuyển tối ưu: 0.5m/s; (5) Ngưỡng phát hiện: hiệu chỉnh bằng tay; (6) Nguồn nuôi: pin 12V; (7) Khối lượng: 8 kg; (8) Thời gian hoạt động: >12 giờ làm việc.

### 3. Kết quả và thảo luận

Kỹ thuật từ thông biến dạng phát hiện được vị trí khuyết tật nằm bên trong và bên ngoài thành ống. Kỹ thuật hạn chế trong đánh giá định lượng kích thước khuyết tật do không có pha tín hiệu phân tích. Khi tín hiệu xuất hiện và chỉ thị bằng LED thì xác định được vị trí khuyết tật trên tấm thép carbon. Đánh giá khuyết tật theo biên độ tín hiệu (cường độ - độ sáng đèn LED), tương ứng với biên độ tín hiệu lớn thì thể tích bề dày mất mát lớn - khuyết tật lớn. Ngược lại, biên độ tín hiệu nhỏ tỷ lệ với thể tích bề dày mất mát nhỏ - khuyết tật nhỏ. Đối với phương pháp MFL, xác định vị trí khuyết tật bên trong hoặc bên ngoài đối với vật liệu thép carbon dễ dàng hơn xác định độ sâu khuyết tật do không có pha tín hiệu, để đánh giá kích thước khuyết tật đòi hỏi cần phải có nhiều kinh nghiệm.

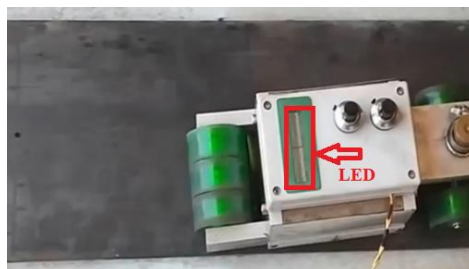
Khảo sát thiết bị MFL để đánh giá các tham số ảnh hưởng đến khả năng của thiết bị, độ lớn khuyết tật và tốc độ di chuyển đối với độ nhạy của thiết bị MFL được tiến hành với hai thực nghiệm 1 và thực nghiệm 2: (1) Thiết bị đo: thiết bị MFL (Hình 8); (2) Mẫu thép carbon: Kích thước (1500mm x 200mm x 10mm); (3) Chi tiết khuyết tật (Hình 9).



**Hình 9.** Khuyết tật tạo ra trên tấm thép carbon

*Thực nghiệm 1:* Kiểm tra khuyết tật tấm thép carbon với thiết bị MFL

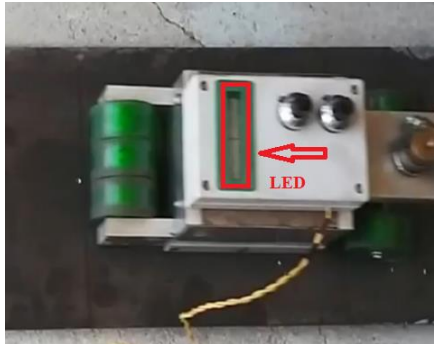
Thiết bị	Vật liệu	Khuyết tật	Độ sâu ăn mòn
MFL	Thép carbon (1500 x 200 x 110 mm)	Lỗ khoan	20% (~2mm)



**Hình 10.** Tín hiệu khuyết tật 20% bề dày tấm thép.

Kết quả: Thiết bị MFL không phát hiện vị trí khuyết tật.

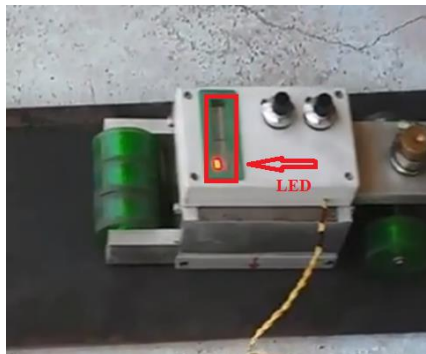
Thiết bị	Vật liệu	Khuyết tật	Độ sâu ăn mòn
MFL	Thép carbon (1500 x 200 x 110 mm)	Lỗ khoan	40% (~4mm)



**Hình 11.** Tín hiệu khuyết tật 40% bề dày tấm thép.

Kết quả: Thiết bị MFL không phát hiện vị trí khuyết tật.

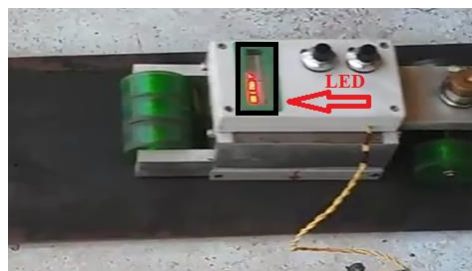
Thiết bị	Vật liệu	Khuyết tật	Độ sâu ăn mòn
MFL	Thép carbon (1500 x 200 x 110 mm)	Lỗ khoan	60% (~6mm)



**Hình 12.** Tín hiệu khuyết tật 60% bề dày tấm thép.

Kết quả: Thiết bị MFL phát hiện vị trí khuyết tật.

Thiết bị	Vật liệu	Khuyết tật	Độ sâu ăn mòn
MFL	Thép carbon (1500 x 200 x 110 mm)	Lỗ khoan	80% (~8mm)



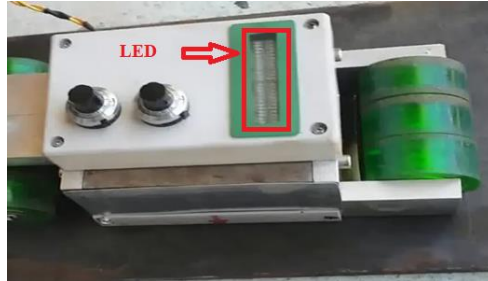
**Hình 13.** Tín hiệu khuyết tật 80% bề dày tấm thép.

Kết quả: Thiết bị MFL phát hiện vị trí khuyết tật.



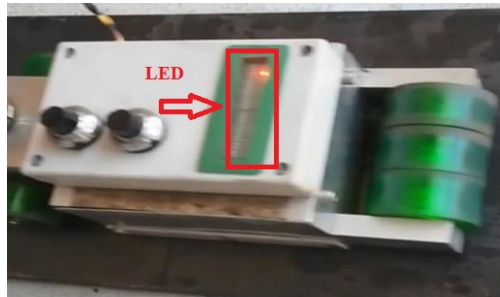
*Thực nghiệm 2:* Tiến hành thí nghiệm kiểm tra ở những tốc độ kéo 0.2, 0.5 và 0.7 m/s trên tấm thép carbon. Các kết quả thu được như sau:

Thiết bị	Vật liệu	Khuyết tật	Độ sâu ăn mòn
MFL	Thép carbon (1500 x 200 x 110 mm)	Lỗ khoan	80% (~8mm)



**Hình 14.** Tín hiệu khuyết tật tấm thép với tốc độ 0.2 m/s.

Kết quả: Thiết bị MFL không phát hiện vị trí khuyết tật với tốc độ 0.2m/s.



**Hình 15.** Tín hiệu khuyết tật tấm thép với tốc độ 0.5m/s.

Kết quả: Thiết bị MFL phát hiện vị trí khuyết tật với tốc độ 0.5m/s.



**Hình 16.** Kiểm tra tốc độ kéo MFL với tốc độ kéo 1.0m/s

Kết quả: Thiết bị MFL nhiều tại vị trí khuyết tật với tốc độ 1.0m/s.

Các kết quả thí nghiệm cho thấy sự thay đổi tốc độ thiết bị MFL Handscan MH01 ảnh hưởng đến khả năng phát hiện khuyết tật. Các khuyết tật có kích thước nhỏ (20%, 40%) không thể phát hiện tin cậy do tín hiệu bị nhiễu. Đối với vận tốc 0.5m/s, tín hiệu chỉ thị từ LED tốt hơn so với 2 tốc độ còn lại cho thấy việc lựa chọn tốc độ di chuyển

thiết bị MFL quan trọng trong chẩn đoán vị trí khuyết tật. Vì vậy tốc độ di chuyển thiết bị MFL phải được hiệu chỉnh trước khi tiến hành kiểm tra khuyết tật. Do phương pháp MFL dựa trên tốc độ biến thiên của từ thông, vì vậy tốc độ thiết bị MFL sẽ ảnh hưởng tới biên độ xung thu được.

#### 4. Kết luận

Nghiên cứu đã thiết kế, chế tạo thành công thiết bị phát hiện ăn mòn đáy bồn chứa xăng dầu bằng từ thông biến dạng nhưng còn một số hạn chế: (1) Giới hạn độ nhạy thiết bị MFL >40% bề dày thành ăn mòn; (2) Độ chính xác khuyết tật bị ảnh hưởng bởi các thành phần vật liệu kiểm tra, cường độ từ hóa vật liệu, tốc độ di chuyển thiết bị và bề dày vật liệu kiểm tra; (3) Khả năng phát hiện khuyết tật - nhạy với khuyết tật ăn mòn điểm, rỗ; (4) Phương pháp MFL là kỹ thuật phát hiện nhanh vị trí khuyết tật, nhưng không đánh giá được chính xác kích thước khuyết tật. Sản phẩm mẫu thiết bị MFL làm tiền đề định hướng nghiên cứu và cải tiến thiết bị MFL nhằm nâng cao hiệu quả, mở rộng phạm vi ứng dụng của mẫu thiết bị.

Kiến nghị: Cần xây dựng các nghiên cứu riêng của Việt Nam về phương pháp MFL để có thể đưa vào áp dụng thực tế. Vì phương pháp MFL trong kiểm tra đáy bồn chứa (xăng dầu) là một kỹ thuật phức tạp, cần sự phối hợp của nhiều ngành khoa học và công nghệ như điện từ trường, điện tử tự động, toán và lập trình phần mềm. Với sản phẩm ban đầu là mẫu thiết bị MFL Handscan làm tiền đề, các hướng nghiên cứu và cải tiến như đề xuất sau đây nhằm nâng cao hiệu quả, mở rộng phạm vi ứng dụng của mẫu thiết bị. Về phần cứng: (1) Thiết kế chế tạo thêm phần xử lý hiển thị kết quả bằng số với hệ thu nhận song song 24 kênh tín hiệu. Cải tiến này sẽ giúp tiết kiệm thời gian và cho biết thông tin chính xác về khuyết tật; (2) Thiết kế chế tạo phần điều khiển tự động, có bộ đo tốc độ. Cải tiến này sẽ hạn chế được nhiều do sự thay đổi tốc độ đột ngột, cho kết quả đo chính xác hơn, nâng cao độ nhạy và giới hạn phát hiện của thiết bị. Về phần mềm: Cần nghiên cứu phát triển thuật toán dựng hình 3D để cho thông tin chính xác khuyết tật như độ rộng, chiều sâu và độ lớn khuyết tật. Đây là một trong những cải tiến quan trọng nhất ảnh hưởng đến độ chính xác, thời gian đo và hiển thị trực quan nhất về khuyết tật.

#### *Lời cảm ơn*

*Nghiên cứu này được thực hiện tại Phòng thí nghiệm Điện tử tự động của Trung tâm Ứng dụng kỹ thuật hạt nhân trong công nghiệp với kinh phí do Viện Năng lượng nguyên tử Việt Nam cấp thông qua đề tài mã số CS/19/06-03. Các tác giả xin trân trọng cảm ơn.*

#### TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Espina-Hernandez, J.W.; Hallen, J.M. (2010). Influence of Remanent Magnetization on Pitting Corrosion in Pipeline Steel. In Proceedings of the 8th International Pipeline Conference, Calgary, AL, Canada, pp. 565–572.

- [2] Feng, J.; Zhang, J.F.; Lu, S.X.; Wang, H.Y.; Ma, R.Z. (2013). Three-axis magnetic flux leakage in-line inspection simulation based on finite-element analysis, 531–536.
- [3] Gloriaa, N.S.; Areiza, M.L. (2009). Development of a magnetic cảm biến for detection and sizing of internal pipeline corrosion defects, 669–677.
- [4] Isabel, C.P.; Jorge, H.A.; Gerd, D. (2014). Simulation for magnetic flux leakage signal interpretation: A FE-approach to support in-line magnetic pipeline pigging, pp. 349–353.
- [5] J. C. Drury I.Eng. M.Ins NDT. (2015). Magnetic Flux Leakage Technology, SilverwingNDT (Uk) Limited.
- [6] Ke, M.Y.; Liao, P.; Song, X.C. (2010). Real-time Data Mining in Magnetic Flux Leakage Detecting in Boiler Pipeline. In Proceedings of the International Conference on Digital Manufacturing & Automation, Changsha, China, 18–20.
- [7] Keshwani, R.T. (2009). Analysis of Magnetic Flux Leakage Signals of Instrumented Pipeline Inspection Gauge using Finite Element Method. IETE J. Res, 73–82.
- [8] Keshwani, R.T. (2009). Analysis of Magnetic Flux Leakage Signals of Instrumented Pipeline Inspection Gauge using Finite Element Method, 73–82.
- [9] Kim, H.M.; Yoo, H.R.; Rho, Y.W.; Park, G.S. (2013). Detection method of cracks by using magnetic fields in underground pipeline.