



## RECOVERY RARE EARTH COMPOUNDS FROM NdFeB MAGNET OF WASTE HDDs AND EXPLORATION THE CORROSION INHIBITION ABILITY FOR ALUMINIUM ALLOY

Bui Thi Thanh Huyen<sup>1</sup>, Pham Khanh Huy<sup>2</sup>, Ha Duy Dung<sup>3</sup>, Vu Thi Xuan<sup>4\*</sup>

<sup>1</sup>National University of Civil Engineering, No. 55 Giai Phong Street, Hanoi, Vietnam

<sup>2</sup>Hanoi University of Mining and Geology, No. 18 Pho Vien Street, Hanoi, Vietnam

<sup>3,4</sup>University of Transport and Communications, No 3 Cau Giay Street, Hanoi, Vietnam

### ARTICLE INFO

TYPE: Research Article

Received: 15/12/2020

Revised: 20/1/2021

Accepted: 26/1/2021

Published online: 15/2/2021

<https://doi.org/10.47869/tcsj.72.2.6>

\* *Corresponding author*

Email: vuthixuan@utc.edu.vn

**Abstract.** The recovery of rare earth compounds from the magnet of waste HDDs and then fabricating a rare earth salt mixture used as an environmentally friendly corrosion inhibitor for metals is a prospective research topic, that is greatly significant in environmental protection and sustainable development. In this study, permanent magnets are collected from some kinds of waste HDDs in Vietnamese market. The hydrometallurgical method is used to recover mixtures of rare earth oxides from permanent magnets. By analyzing EDX, ICP-MS and XRD, the mixture of rare earth metal oxide product obtained with high purity. The Nd content accounts for over 80% of the rare earth elements weight. Since then, the mixture of rare earth chloride salts was fabricated and initially explored the corrosion inhibition ability of the rare earth salt mixture for the aluminum alloys in the strong aggressive environments like 3.5% NaCl. The mixture of fabricated rare earth chloride salts exhibits an efficient inhibitor for corrosion process of aluminum alloy in 3.5% NaCl. The inhibition efficiency is stable on time and reach over 92% after about 168 ÷ 1344 hours immersion by the mass loss method.

**Keywords:** Electronic waste, rare earth magnets, FeNdB, corrosion inhibition, aluminium alloy, ICP-MS.



## THU HỒI HỢP CHẤT ĐẤT HIẾM TỪ NAM CHÂM NdFeB CỦA Ổ CỨNG MÁY TÍNH THẢI VÀ THĂM DÒ KHẢ NĂNG ỨC CHẾ ĂN MÒN ĐỐI VỚI HỢP KIM NHÔM

Bùi Thị Thanh Huyền<sup>1</sup>, Phạm Khánh Huy<sup>2</sup>, Hà Duy Dũng<sup>3</sup>, Vũ Thị Xuân<sup>4\*</sup>

<sup>1</sup>Trường Đại học Xây dựng, Số 55 Giải Phóng, Hà Nội, Việt Nam

<sup>2</sup>Trường Đại học Mỏ - Địa chất, Số 18 phố Viên, Bắc Từ Liêm, Hà Nội, Việt Nam

<sup>3,4</sup>Trường Đại học Giao thông vận tải, Số 3 Cầu Giấy, Hà Nội, Việt Nam

### THÔNG TIN BÀI BÁO

CHUYÊN MỤC: Công trình khoa học

Ngày nhận bài: 15/12/2020

Ngày nhận bài sửa: 20/1/2021

Ngày chấp nhận đăng: 26/1/2021

Ngày xuất bản Online: 15/2/2021

<https://doi.org/10.47869/tcsj.72.2.6>

\* Tác giả liên hệ

Email: vuthixuan@utc.edu.vn

**Tóm tắt.** Việc thu hồi hợp chất đất hiếm từ nam châm của ổ cứng máy tính thải và từ đó chế tạo thành hỗn hợp muối đất hiếm dùng làm chất ức chế ăn mòn thân thiện môi trường cho kim loại là hướng nghiên cứu triển vọng. Nó có ý nghĩa lớn trong bảo vệ môi trường và phát triển bền vững. Trong nghiên cứu này, nam châm vĩnh cửu được thu thập từ các ổ cứng máy tính thải trên thị trường Việt Nam. Phương pháp thủy luyện kim được sử dụng để thu hồi hỗn hợp ôxít đất hiếm từ các nam châm vĩnh cửu. Bằng phương pháp phân tích EDX, ICP-MS và XRD cho thấy, sản phẩm hỗn hợp ôxít kim loại đất hiếm thu được có độ tinh khiết cao. Hàm lượng Nd chiếm >80% khối lượng các nguyên tố đất hiếm. Từ đó chế tạo muối clorua đất hiếm và bước đầu thăm dò khả năng ức chế ăn mòn của hỗn hợp muối này đối với ăn mòn hợp kim nhôm làm việc trong môi trường xâm thực mạnh như NaCl 3,5%. Hỗn hợp muối clorua đất hiếm chế tạo được thể hiện là chất ức chế hiệu quả đối với hợp kim nhôm trong môi trường NaCl 3,5%. Hiệu quả ức chế là ổn định và đều đạt trên 92% sau khoảng 168 ÷ 1344 giờ thử nghiệm bằng phương pháp tổn hao khối lượng.

**Từ khóa:** Rác thải điện tử, nam châm đất hiếm, FeNdB, ức chế ăn mòn, hợp kim nhôm, ICP-MS.

## 1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Các nguyên tố đất hiếm có tầm quan trọng lớn trong ngành công nghiệp hiện đại để sản xuất các vật liệu chức năng khác nhau trong thiết bị điện, điện tử như nam châm vĩnh cửu, pin sạc, chất xúc tác, đèn huỳnh quang... vì các đặc tính từ tính và điện tử độc đáo của chúng [1-3]. Ngoài ra, hợp chất muối kim loại đất hiếm còn được thấy có khả năng ức chế ăn mòn tốt cho một số kim loại và hợp kim trong môi trường xâm thực mạnh [4-7]. Do nhu cầu gia tăng và thiếu hụt nguồn cung, các nguyên tố đất hiếm được liệt vào danh sách những nguyên liệu thô quan trọng có tầm quan trọng chiến lược ở nhiều quốc gia trên thế giới [1, 8].

Bên cạnh đó, nguồn phát sinh các chất thải điện, điện tử ngày càng tăng cùng với sự phát triển của khoa học và kinh tế. Theo nghiên cứu của C. P. Baldé, năm 2018, toàn cầu sẽ có 49,8 triệu tấn chất thải điện tử, với mức tăng trưởng hàng năm từ 4 đến 5 % [9]. Lượng chất thải điện tử dự báo tới năm 2021 sẽ là 52,2 triệu tấn [10]. Lượng chất thải điện tử năm 2010 tại Việt Nam là 114.000 tấn. Với tốc độ gia tăng trung bình trong những năm gần đây của việc tiêu dùng mặt hàng thiết bị điện tử lên tới 20 % đã đưa ra con số dự báo đến năm 2025 tại Việt Nam là 567.000 tấn chất thải điện tử sẽ bị thải bỏ [11-13]. Đây là một thách thức không nhỏ vì hiện nay do Việt Nam chưa có được một hệ thống quản lý, công nghệ tái chế chất thải đặc biệt đối với thiết bị điện, điện tử hiện đại và đảm bảo môi trường. Quá trình xử lý, tái chế, tái sử dụng không đúng cách sẽ là nguy cơ gây nên những tác động xấu tới môi trường sống và con người. Hơn nữa, phát triển nhanh và sản xuất quá mức dẫn đến cạn kiệt tài nguyên.

Nam châm neodymium sắt boron (NdFeB) là một bộ phận của ổ cứng máy tính được dùng rộng rãi trên toàn thế giới, nó chiếm 62% thị phần của vật liệu từ trường vĩnh cửu. Thành phần nam châm này ngoài neodymium (Nd), còn có các nguyên tố đất hiếm khác như dysprosium (Dy) và praseodymium (Pr) được sử dụng với lượng khác nhau (tổng cộng chiếm 25 - 30% khối lượng nam châm) để có được các đặc tính từ tính cần thiết [14]. Tại Việt Nam, việc nghiên cứu tinh chế đất hiếm hầu hết được thực hiện trong lĩnh vực khai thác khoáng sản, thu hồi từ các nguồn bã thải sau quá trình tuyển quặng, chế thành các sản phẩm phụ như phân bón hay các nghiên cứu cơ bản từ tinh quặng. Nghiên cứu thu hồi đất hiếm trong thiết bị điện tử thải, cụ thể là từ nam châm ổ cứng máy tính thải và ứng dụng sản phẩm thu hồi đó ít được đề cập [2, 14, 15]. Một số nghiên cứu trước đây cho thấy, muối clorua và nitrat của kim loại đất hiếm như ceri (Ce), lantan (La), neodymium (Nd) và praseodymium (Pr) hoặc hỗn hợp giữa chúng có khả năng ức chế ăn mòn cho hợp kim nhôm trong môi trường NaCl [4, 6]. Do vậy, việc thu hồi hợp chất đất hiếm và chế tạo thành hỗn hợp muối đất hiếm thu hồi được từ nam châm của ổ cứng máy tính thải làm chất ức chế ăn mòn kim loại là hướng nghiên cứu triển vọng và hứa hẹn, có ý nghĩa lớn trong bảo vệ môi trường và phát triển bền vững.

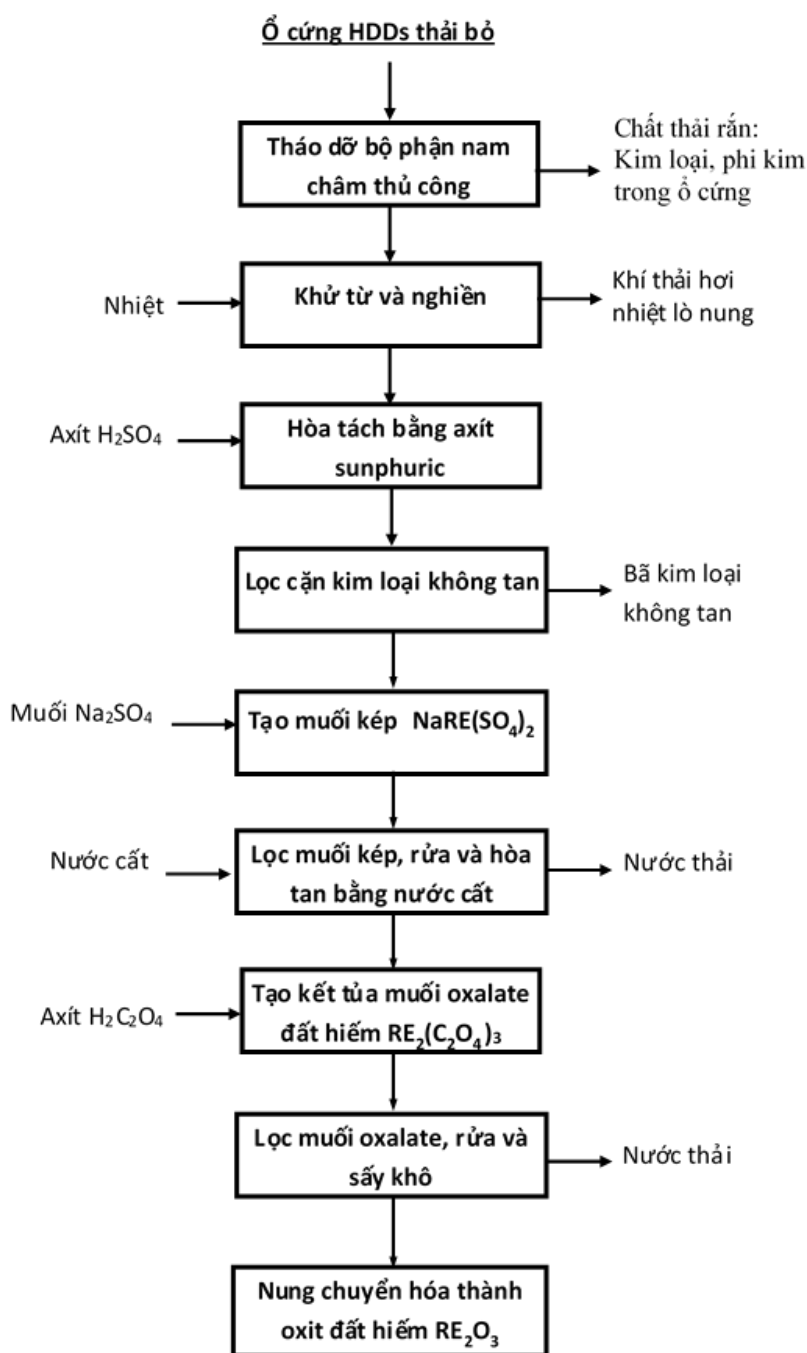
Trong nghiên cứu này, phương pháp thủy luyện kim được sử dụng để thu hồi kim loại đất hiếm từ các nam châm ổ cứng để tạo ra ôxít kim loại đất hiếm - sản phẩm có độ tinh khiết cao. Từ đó chế tạo chất ức chế ăn mòn cho hợp kim nhôm làm việc trong môi trường xâm thực mạnh như NaCl.

## 2. THỰC NGHIỆM

### 2.1. Thu hồi ôxít đất hiếm từ nam châm ổ cứng máy tính thải

Trong nghiên cứu này, nam châm vĩnh cửu được thu thập từ các ổ cứng HDD bị loại bỏ trên thị trường Việt Nam từ một số thương hiệu như Samsung, Seagate, Maxtor, Western

Digital và Quantum. Quá trình thu hồi kim loại đất hiếm bao gồm các bước chính như được trình bày trên Hình 1, cụ thể như sau:

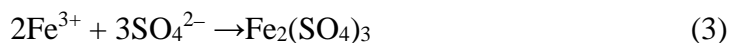
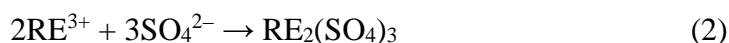
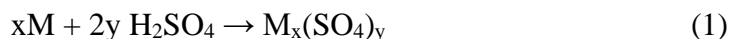


Hình 1. Quy trình thu hồi hỗn hợp kim loại đất hiếm dạng ôxít.

- (1) **Tách riêng bộ phận nam châm:** Ổ cứng máy tính thải bỏ được tháo dỡ, tách riêng phần nam châm đất hiếm và các bộ phận khác bằng phương pháp thủ công;
- (2) **Khử từ và nghiền:** Bộ phận nam châm đất hiếm được nung tới nhiệt độ 300 °C, trong thời gian 30 phút để khử từ. Sau đó đem nghiền thành bột tới cấp hạt trung bình 0,2 mm;
- (3) **Hòa tách:** Bột nam châm được hòa tách bằng axit sunphuric có nồng độ 1,2 M; tỉ lệ

rắn lỏng R:L = 20 g/L; Tốc độ khuấy 200 vòng/phút; thời gian hòa tách là 15 phút;

Các phản ứng trong quá trình hòa tách:



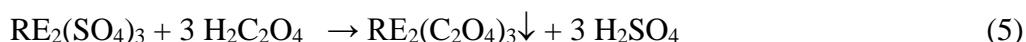
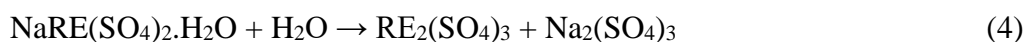
(4) **Lọc cặn kim loại chưa tan:** Do hiệu suất hòa tách không hoàn toàn, trong dung dịch còn chứa các kim loại chưa tan hết, với mục đích lọc bỏ để không lẫn vào trong muối kép thu được ở bước sau;

(5) **Tạo muối kép  $NaRE(SO_4)_2$**  Dung dịch hòa tách sau khi được lọc, sẽ đem tiến hành tạo muối kép  $NaRE(SO_4)_2$  bằng natri sulfate với tỉ lệ bằng 2 lần số mol của kim loại đất hiếm trong dung dịch hòa tách, ở điều kiện thường. Phản ứng tạo muối sulphate kép được biểu diễn bởi phương trình sau:



(6) **Lọc kết tủa muối kép, rửa nhanh và hòa tan lại bằng nước cất:** Muối kép  $NaRE(SO_4)_2$  được lọc, rửa nhanh và hòa tan bằng nước cất với tỉ lệ rắn lỏng lên tới 1:200 cho tới khi tan hết;

(7) **Tạo kết tủa muối oxalate đất hiếm  $RE_2(C_2O_4)_3$ :** Dung dịch muối kép sau khi được hòa tan sẽ được tiến hành kết tủa oxalate đất hiếm bằng axit oxalic (Merck/Đức) với tỉ lệ 1:1,1 theo số mol của kim loại đất hiếm có trong dung dịch để thu tổng kim loại đất hiếm; Phản ứng thu tạo kết tủa oxalate được biểu diễn bởi phương trình sau:



(8) **Lọc kết tủa muối oxalate đất hiếm:** Muối oxalate đất hiếm được lọc, rửa sạch bằng nước cất và sấy khô tại 120 °C tới khối lượng không đổi.

(9) **Nung muối oxalate đất hiếm tạo thành ôxít đất hiếm:** mẫu muối oxalate đất hiếm (đã sấy khô) được tiến hành chụp giản đồ phân tích nhiệt (TGA NETZSCH – STA 409 PC/PG) để đánh giá xem, nhiệt độ nung nào để đảm bảo thu hồi được lượng đất hiếm nhiều nhất, có độ tinh khiết nhất.

## 2.2. Chế tạo muối kim loại đất hiếm từ ôxít đất hiếm thu hồi

Hỗn hợp ôxít đất hiếm thu hồi được đem phân tích thành phần ôxít bằng Quang phổ nguồn plasma cảm ứng cao tần kết nối khối phổ (ICP-MS Elan 9000 – Perkin Elmer) và EDX (S-4800). Với mục tiêu chế tạo các muối clorua của kim loại đất hiếm, nên hỗn hợp ôxít đất hiếm thu được đem hòa tan bằng HCl 1N theo phản ứng tổng quát sau:



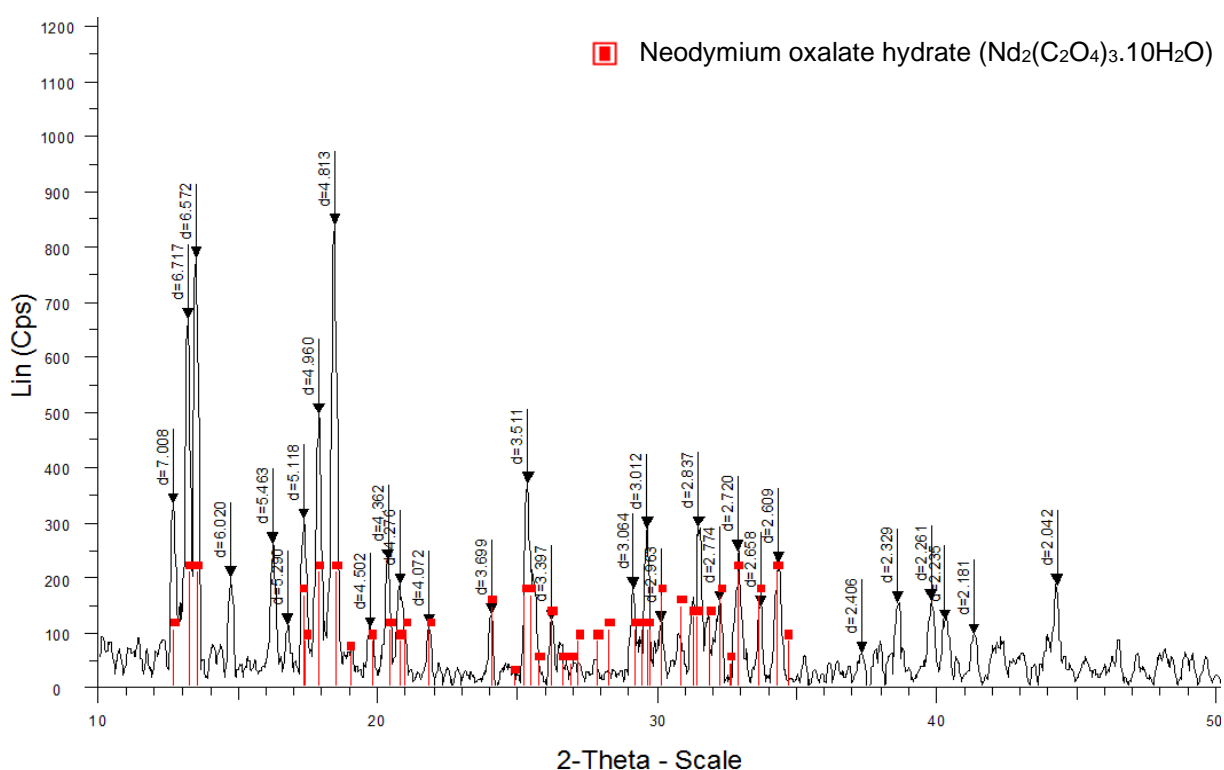
## 2.3. Nghiên cứu thăm dò khả năng ức chế ăn mòn hợp kim nhôm trong NaCl 3,5%

Nghiên cứu thăm dò được thực hiện với quá trình ăn mòn hợp kim nhôm trong dung dịch NaCl 3,5% khi không và khi có 500ppm hỗn hợp ức chế muối đất hiếm  $RECl_3$  chế tạo được. pH của dung dịch có chất ức chế được điều chỉnh có giá trị 6,5 bằng với pH của dung dịch NaCl 3,5%. Nghiên cứu này được thực hiện bằng phương pháp đo điện thế ăn mòn và tổn hao khối lượng theo thời gian (1, 2, 4 và 8 tuần thử nghiệm).

### 3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

#### 3.1. Thu hồi và đánh giá độ tinh khiết của hỗn hợp ôxít đất hiếm thu hồi được

Sau khi được hòa tan, tiến hành kết tủa oxalate bằng axit oxalic để thu hồi chọn lọc kim loại đất hiếm. Phương trình kết tủa muối oxalate được biểu diễn bằng phương trình (5). Sản phẩm muối kết tủa ( $RE_2(C_2O_4)_3$ ) thu hồi được đem phân tích, đánh giá thành phần bằng phương pháp XRD, ICP và EDX. Kết quả đo XRD được thể hiện trên hình 2 cho thấy muối thu được ở giai đoạn này là muối oxalate đất hiếm với thành phần chính là neodymium có các đỉnh nhiễu xạ ở các vị trí góc  $2\theta$  trùng khớp với giản đồ nhiễu xạ chuẩn của muối  $Nd_2(C_2O_4)_3 \cdot 10H_2O$  (CPDS card No. 20-0764) với  $2\theta = 12,6^\circ; 13,5^\circ; 17,9^\circ; 18,6^\circ; 25,4^\circ$ .

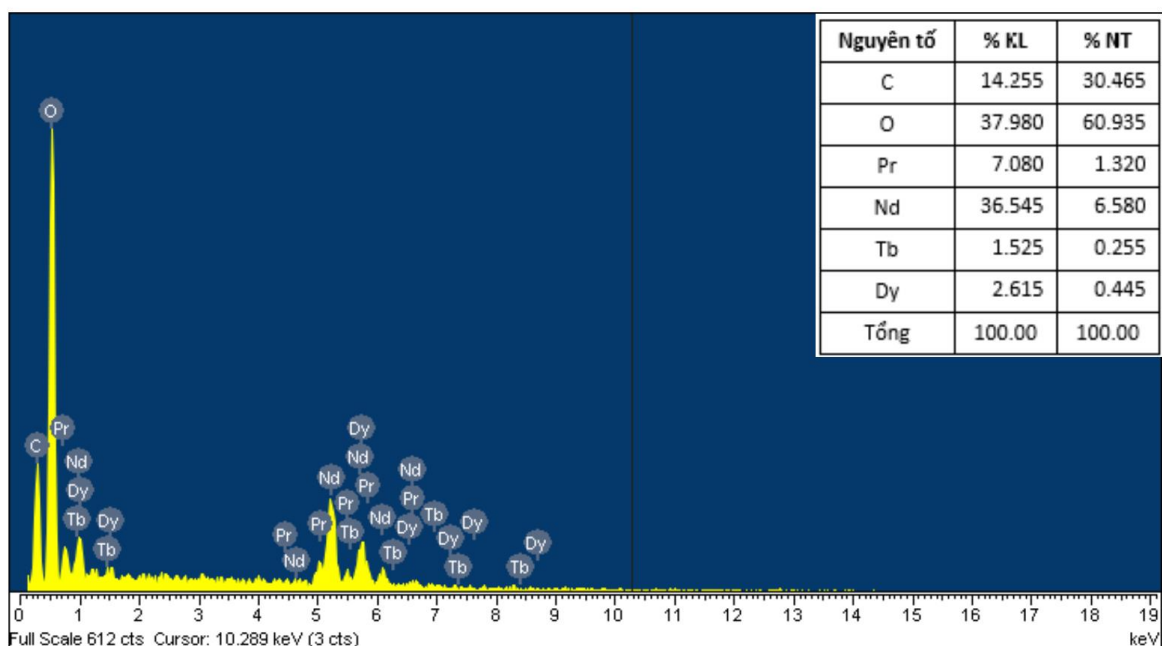


Hình 2. Giản đồ XRD mẫu bột sau khi kết tủa muối oxalate đất hiếm.

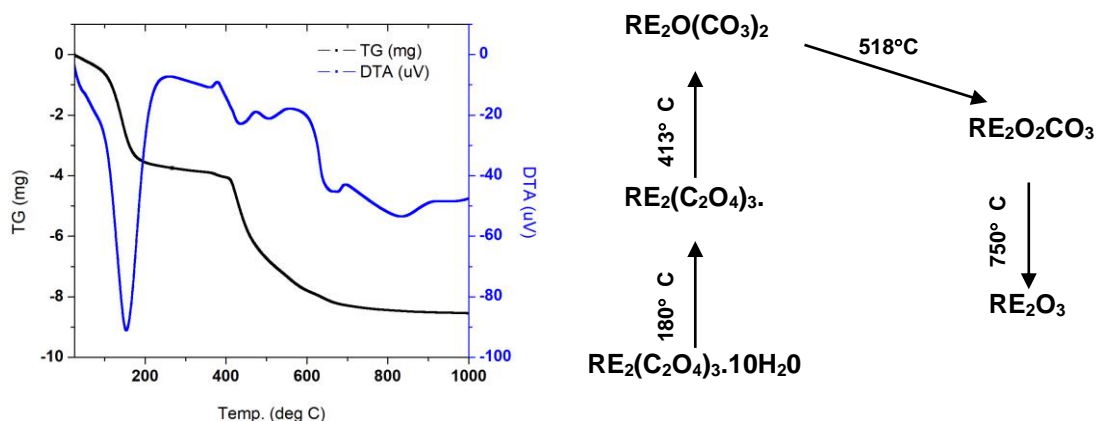
Hiệu suất thu hồi đất hiếm bằng việc tạo kết tủa oxalate tại bước này đạt tới hơn 99 % lượng đất hiếm thu hồi được từ bước tạo muối kép với natri sulfate. Kết quả phân tích này tương đồng với nhiều kết quả nghiên cứu trước đây, tuy nhiên với điều kiện nhiệt độ và thời gian sấy mẫu khác nhau sẽ ảnh hưởng đến thành phần  $H_2O$  có trong muối tổng oxalate đất hiếm thu hồi được. Kết quả phân tích mẫu muối tổng oxalate đất hiếm thu hồi được bằng phương pháp EDX thể hiện trên hình 3 cho thấy thành phần kim loại trong mẫu muối oxalate thu hồi được hoàn toàn là các kim loại đất hiếm.

Bằng quy trình thu hồi hai bước với bước một là tạo muối sulfate kép và bước hai là tạo muối oxalate đã thu hồi được tổng kim loại đất hiếm có trong bộ phận nam thái bỏ với hiệu suất thu hồi đạt tới 90,4 %. Trong sản phẩm muối oxalate đất hiếm thu được, cho thấy không phát hiện sự có mặt của các kim loại khác như sắt và chúng đã được tách bỏ hoàn toàn. Kết quả phân tích cho thấy thành phần kim loại đất hiếm thu hồi chủ yếu là Nd chiếm tới 81,01 %; Pr là 15,25 %; Dy là 2,77 % và Tb là 0,93 %.

Để thu được hỗn hợp ôxít đất hiếm có độ tinh khiết cao, muối oxalate đất hiếm sau khi sấy khô được chụp giản đồ phân tích nhiệt đến 1000°C. Kết quả (hình 4) cho thấy, cần nung hỗn hợp muối oxalate ở nhiệt độ  $\geq 750^\circ\text{C}$  sẽ cho hỗn hợp ôxít có độ tinh khiết cao.



Hình 3. Kết quả phân tích EDX muối oxalate đất hiếm thu hồi được.

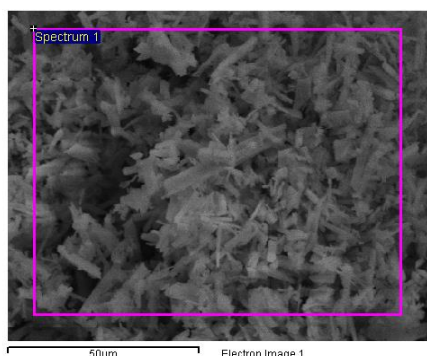


Hình 4. Giản đồ phân tích nhiệt TGA muối oxalate đất hiếm.

Muối oxalate đất hiếm được nung ở  $750^\circ\text{C}$  trong 5h với chu trình tăng nhiệt  $5^\circ\text{C}/\text{phút}$  và được để nguội từ từ trong lò đến nhiệt độ phòng. Hỗn hợp ôxít đất hiếm thu được đem phân tích EDX, ICP-MS và XRD để đánh giá thành phần, độ tinh khiết và cấu trúc của sản phẩm.

Kết quả phân tích EDX của hỗn hợp ôxít (hình 5) cho thấy, các ôxít thu hồi được hoàn toàn là các ôxít của kim loại đất hiếm. Bên cạnh đó, kết quả phân tích thành phần đất hiếm thu hồi được bằng ICP-MS (Bảng 2) cũng cho thấy ôxít thu hồi được hoàn toàn là các ôxít của đất hiếm. Hàm lượng đất hiếm lớn nhất là nguyên tố Nd chiếm 83,87%, tiếp đó là Pr với hàm

lượng 14,37% và nhỏ nhất là nguyên tố Tb chiếm 0,21%.

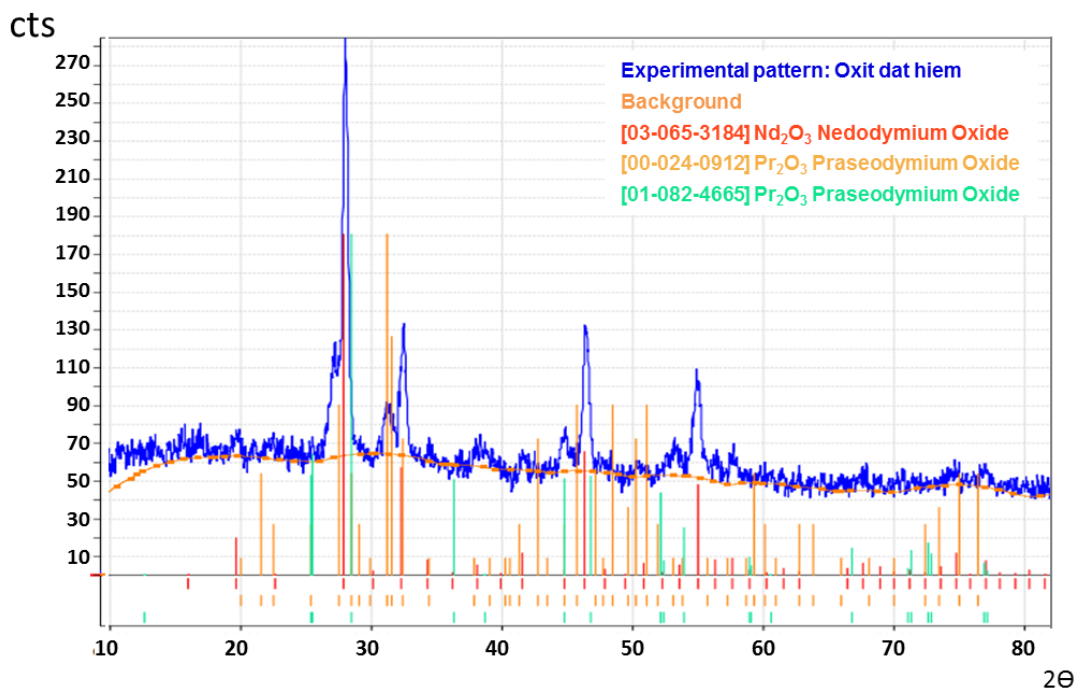


Kim loại	% Khối lượng	% Nguyên tử
O	26,87	76,81
Pr	10,04	3,26
Nd	60,99	19,34
Tb	0,44	0,13
Dy	1,66	0,47

Hình 5. Kết quả EDX của hỗn hợp ôxít đất hiếm thu hồi được.

Bảng 2. Thành phần kim loại đất hiếm thu hồi được bằng kết quả phân tích ICP-MS.

Kim loại	Nồng độ (mg/L)	Nồng độ (%)
Pr	28,728	14,37
Nd	167,616	83,87
Tb	0,421	0,21
Dy	3,096	1,55



Hình 6. Giảm đồ XRD hỗn hợp ôxít đất hiếm thu được sau khi nung muối oxalate đất hiếm.

Để khẳng định sự tồn tại và xác định được cấu trúc pha của các ôxít đất hiếm, phân tích

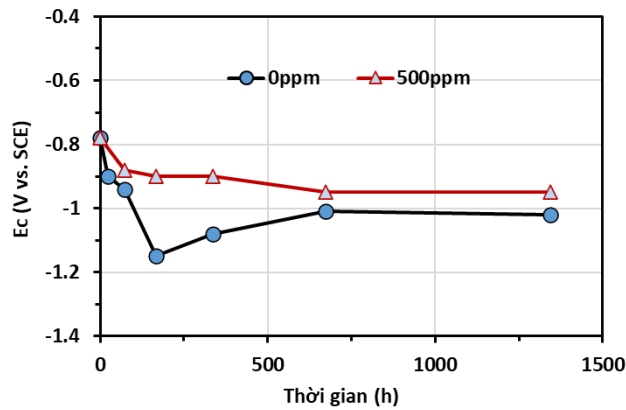


XRD được tiến hành và cho kết quả như trên hình 6. Hình 6 cho thấy, sự tồn tại các pic nhiễu xạ của  $\text{Nd}_2\text{O}_3$  và  $\text{Pr}_2\text{O}_3$  là hai trong bốn ôxít có hàm lượng cao trong hỗn hợp ôxít đất hiếm. Trên phổ không xuất hiện các pic nhiễu xạ của ôxít Tb và Dy là do hàm lượng các ôxít này quá nhỏ, không thể phát hiện được nhờ XRD.

Như vậy, với qui trình thu hồi và chế độ nung chuyên hóa ôxít đất hiếm tiến hành như thực nghiệm đã thu hồi được hỗn hợp ôxít đất hiếm có độ tinh khiết rất cao.

### 3.2. Thăm dò khả năng ức chế ăn mòn của hợp chất muối đất hiếm chế tạo được

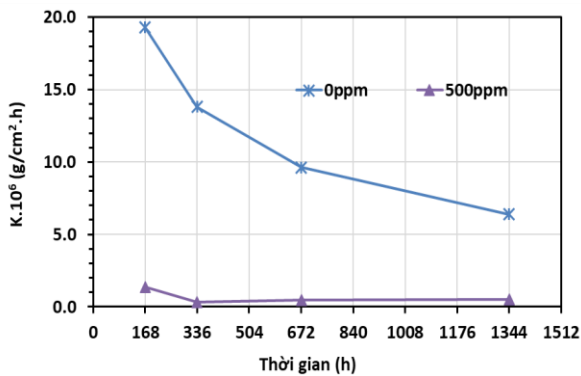
Việc thăm dò khả năng ức chế ăn mòn hợp kim nhôm trong NaCl 3,5% được tiến hành bằng phương pháp đo điện thế ăn mòn mạch hở và tổn hao khối lượng theo thời gian.



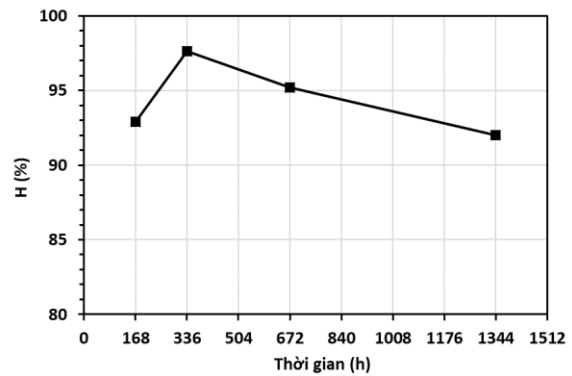
Hình 7. Sự phụ thuộc điện thế ăn mòn của hợp kim nhôm trong dung dịch NaCl 3,5% khi không và khi có 500 ppm hỗn hợp muối clorua đất hiếm theo thời gian.

Điện thế ăn mòn mạch hở  $E_c$  (hình 7) có xu hướng giảm nhẹ và đi vào ổn định theo thời gian.  $E_c$  của mẫu hợp kim nhôm trong dung dịch NaCl 3,5% có thêm 500ppm hỗn hợp muối clorua đất hiếm đều dương hơn trung bình khoảng 100 mV so với dung dịch so sánh. Điều này có nghĩa là hỗn hợp chất ức chế đất hiếm đã làm dịch chuyển điện thế ăn mòn của hợp kim nhôm về phía dương hơn.

Tốc độ ăn mòn nhôm khi không và khi có chất ức chế muối đất hiếm đã chế tạo được trình bày trên hình 8.



Hình 8. Tốc độ ăn mòn theo thời gian của hợp kim nhôm trong môi trường NaCl 3,5% khi có và không có hỗn hợp muối clorua kim loại đất hiếm.



Hình 9. Hiệu quả ức chế ăn mòn theo thời gian của hỗn hợp muối kim loại đất hiếm chế tạo được đối với quá trình ăn mòn của hợp kim nhôm trong môi trường NaCl 3,5%.

Hình 8 cho thấy, tốc độ ăn mòn nhôm trong dung dịch NaCl 3,5% có giá trị lớn hơn rất nhiều so với khi dung dịch có thêm 500ppm hỗn hợp muối đất hiếm. Điều này chứng tỏ, hỗn hợp muối đất hiếm chế tạo được đã làm giảm đáng kể ( $13 \div 45$  lần) tốc độ ăn mòn nhôm trong dung dịch NaCl 3,5%. Tốc độ ăn mòn có xu hướng giảm theo thời gian bởi vì nhôm có xu hướng hình thành màng ôxít trên bề mặt, theo thời gian lớp ôxít càng dày sẽ làm giảm quá trình xâm nhập các tác nhân gây ăn mòn đối với bề mặt nhôm.

Hiệu quả ức chế ăn mòn tính được và hiệu quả ức chế theo thời gian được trình bày như trên hình 9. Kết quả cho thấy, hiệu quả ức chế ăn mòn nhôm của hỗn hợp muối đất hiếm đều đạt trên 92%. Điều đó chứng tỏ, hỗn hợp muối đất hiếm chế tạo được từ ôxít đất hiếm thu hồi có khả năng ức chế hiệu quả, là chất ức chế tiềm năng đối với quá trình ăn mòn nhôm trong dung dịch NaCl 3,5%.

#### 4. KẾT LUẬN

Bằng phương pháp thủy luyện kim, đã thu hồi thành công hỗn hợp ôxít đất hiếm từ nam châm ổ cứng máy tính thải. Kết quả phân tích thành phần cho thấy, ôxít đất hiếm thu hồi được có độ tinh khiết cao, thành phần chính là ôxít của neodymium (>80%), tiếp đến là praseodymium với hàm lượng >10%, còn lại là ôxít của Dy và Tb.

Đã chế tạo được hỗn hợp muối clorua đất hiếm có khả năng ức chế ăn mòn cho hợp kim nhôm trong môi trường NaCl 3,5%. Hiệu quả ức chế ăn mòn đạt cao (>92% khi có 500ppm hỗn hợp muối clorua đất hiếm), giá trị này ổn định trong vòng 1344 giờ thử nghiệm. Như vậy, việc thu hồi hợp chất đất hiếm từ nam châm ổ cứng máy tính thải và chế tạo thành chất ức chế ăn mòn cho hợp kim nhôm trong môi trường ăn mòn khắc nghiệt là hướng nghiên cứu ứng dụng có triển vọng, có ý nghĩa lớn trong bảo vệ môi trường và phát triển bền vững.

#### LỜI CẢM ƠN

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Trường đại học Giao thông vận tải trong đề tài mã số T2020-CB-003. Tác giả xin chân thành cảm ơn các đồng nghiệp trong Bộ môn Hóa học – Lãnh đạo Khoa KHCB - Trường ĐHGTVT đã hỗ trợ trong quá trình thực hiện nghiên cứu thực nghiệm.

#### TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. V.Prakash, Z.H.I. Sun, J. Sietsma, Y. Yang, Electrochemical Recovery of Rare Earth Elements from Magnet Scraps – A Theoretical Analysis, ERES2014: 1st European Rare Earth Resources Conference|Milos|04-07/09/2014, 163-170.
- [2]. Min Hee Joo, So Jeong Park, Sung Min Hong, Choong Kyun Rhee, Youngku Sohn, Electrochemical Recovery and Behaviors of Rare Earth (La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, and Yb) Ions on Ni Sheets, Materials, 13 (2020) 5314. <https://doi.org/10.3390/ma13235314>
- [3]. Yufeng Wu, Xiaofei Yin, Qijun Zhang, Wei Wang, Xianzhong Mu, The recycling of rare earths from waste tricolor phosphors in fluorescent lamps: A review of processes and technologies, Resources, Conservation and Recycling, 88 (2014) 21–31. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2014.04.007>
- [4]. T.H. Muster, H. Wrubel, D. Lau, N. Sherman, S.J. Garcia, T.G. Harvey, T. Markley, A.E. Hughes, P.A. Corrigan, A.M. Glenn, P.A. White, S.G. Hardin, J. Mardel, J.M.C. Mol, A combinatorial

matrix of rare earth chloride mixtures as corrosion inhibitors of AA2024-T3 - Part I: a comparison between potentiodynamic and EIS measurements, *Electrochimica Acta*, 67 (2012) 95-103. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2012.02.004>

[5]. M. El-desoky, A. S. Fouda, D. M. Eid, Neodymium Nitrate and Yttrium Nitrate as Environmentally Friendly Corrosion Inhibitors for Carbon Steel Used in Petroleum Equipments, *International Journal of Scientific & Engineering Research*, 7 (2016) 1226-1236. [https://www.researchgate.net/publication/309359129\\_Neodymium\\_Nitrate\\_and\\_Yttrium\\_Nitrate\\_as\\_Environmentally\\_Friendly\\_Corrosion\\_Inhibitors\\_for\\_Carbon\\_Steel\\_Used\\_in\\_Petroleum\\_Equipments](https://www.researchgate.net/publication/309359129_Neodymium_Nitrate_and_Yttrium_Nitrate_as_Environmentally_Friendly_Corrosion_Inhibitors_for_Carbon_Steel_Used_in_Petroleum_Equipments)

[6]. Barbara Volaric, Ingrid Milosev, Rare earth chloride and nitrate salts as individual and mixed inhibitors for aluminium alloy 7075-T6 in chloride solution, *Corrosion Engineering, Science and Technology*, 52 (2017) 201-211. <http://dx.doi.org/10.1080/1478422X.2016.1245957>

[7]. D. M. Martinez de la Escalera, J. J. Ramos-Hernandez, E. Porcayo-Palafox, J. Porcayo-Calderon, J. G. Gonzalez-Rodriguez, L. Martinez-Gomez, Effect of Nd<sup>3+</sup> Ion Concentration on the Corrosion Resistance of API X70 Steel in Chloride-Rich Environments, *Advances in Materials Science and Engineering*, 2018 (2018) 1-15. <https://doi.org/10.1155/2018/9328317>

[8]. B. Zhou, Z. Li, C. Chen, Global potential of rare earth resources and rare earth demand from clean technologies, *Minerals*, 7 (2017) 1-14. <https://doi.org/10.3390/min7110203>

[9]. C. P. Balde, F. Wang, R. Kuehr, J. Huisman, E-Waste Monitor. United Nations University, IAS – SCYCLE, Bonn, Germany, 2014.

[10]. C. P. Balde, V. Forti, V. Gray, R. Kuehr, P. Stegmann, The Global Ewaste Monitor 2017. Quantities, Flows, and Resources. United Nations University (UNU), International Telecommunication Union (ITU) & International Solid Waste Association (ISWA), Bonn/Geneva/Vienna.

[11]. C. V. Chung, P. V. Duc, D. D. Hai, The development of e-waste inventory in Vietnam Part 3: Final Report. URENCO Environment Vietnam, 2007.

[12]. N. D. Quang, E. Yamasue, H. Okumura, K. N. Ishihara, Use and disposal of large home electronic appliances in Vietnam, *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 11 (2009) 358-366. <https://doi.org/10.1007/S10163-009-0264-2>

[13]. H. T. Hai, H. V. Hung, N. D. Quang, An overview of electronic waste recycling in Vietnam, *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 19 (2017) 536-544. <https://doi.org/10.1007/s10163-015-0448-x>

[14]. Mehmet Ali Recai Önal, Chenna Rao Borra, Muxing Guo, Bart Blanpain, Tom Van Gerven, Recycling of NdFeB magnets using sulfation, selective roasting and water leaching, *The Minerals, Metals & Materials Society*, 1 (2015) 199-215. <https://doi.10.1007/s 40831-015-0021-9>

[15]. Pham Khanh Huy, Nguyen Thi Thu Huyen, Tran Thi Thanh Thuy, Huynh Trung Hai, Mai Thanh Tung, Recovery Rare Earth Oxide from NdFeB Magnet of Waste HDDs by Leaching and Selective Precipitation Methods, *Vietnam Journal of Science and Technology*, 55 (2017) 257-264. <https://doi.org/10.15625/2525-2518/55/5B/12233>