

Bài báo nghiên cứu

**ĐÁNH GIÁ CÁC ĐẶC TÍNH HÓA LÝ
CỦA HỆ HẠT NANO PEROVSKITE $\text{La}_{1-x}\text{Nd}_x\text{FeO}_3$
HÌNH THÀNH TỪ KỸ THUẬT ĐỒNG KẾT TỦA****Chu Thị Kim Hương¹, Phạm Lê Thanh², Nguyễn Văn Yên³, Nguyễn Anh Tiến^{1*}**¹Trường Đại học Sư phạm Thành phố Hồ Chí Minh, Việt Nam²Trường THPT Nguyễn Hiền, Thành phố Hồ Chí Minh, Việt Nam³Trường Đại học Công nghệ – Đại học Quốc gia Hà Nội, Việt Nam*Tác giả liên hệ: Nguyễn Anh Tiến – Email: tienna@hcmue.edu.vn

Ngày nhận bài: 02-9-2025; Ngày nhận bài sửa: 18-9-2025; Ngày nhận đăng: 05-10-2025

TÓM TẮT

Hệ hạt nano perovskite lanthanum pha tạp neodymium ($\text{La}_{1-x}\text{Nd}_x\text{FeO}_3$ với $x = 0; 0,1; 0,15$ và $0,2$ theo công thức lý thuyết) được hình thành từ kỹ thuật đồng kết tủa với sự thêm vào dung dịch sodium hydroxide 5%. Các đặc tính hóa lý của hệ hạt nano $\text{La}_{1-x}\text{Nd}_x\text{FeO}_3$ tổng hợp được đánh giá bằng các kỹ thuật nhiễu xạ tia X bột (PXRD), kính hiển vi điện tử (SEM, TEM), phổ tán sắc năng lượng tia X (EDX) và hệ đo từ kế mẫu rung (VSM) ở nhiệt độ phòng. Đơn pha tinh thể perovskite $\text{La}_{1-x}\text{Nd}_x\text{FeO}_3$ hình thành sau khi nung các mẫu bột khô ở 800°C trong 60 phút. Kích thước trung bình của tinh thể LaFeO_3 và thể tích ô đơn vị giảm theo hàm lượng ion Nd^{3+} pha tạp ($D_{\text{Scher}} = 30,71\text{--}27,07\text{ nm}$; $V = 242,62\text{--}241,41\text{ Å}^3$). Hệ hạt nano perovskite $\text{La}_{1-x}\text{Nd}_x\text{FeO}_3$ hình thành được có dạng giả cầu với kích thước $\sim 30\text{--}50\text{ nm}$. Mẫu bột nano LaFeO_3 và $\text{La}_{0,8}\text{Nd}_{0,2}\text{FeO}_3$ mang tính chất của vật liệu thuận từ mềm với các giá trị H_c và M_r xấp xỉ bằng 0, còn độ từ hóa M_s lại rất lớn ($\sim 0,13\text{--}0,19\text{ emu}\cdot\text{g}^{-1}$).

Từ khóa: tính chất từ; cấu trúc nano; pha tạp neodymium; perovskite lanthanum**1. Mở đầu**

Vật liệu nano với cấu trúc perovskite dạng LnFeO_3 (trong đó, Ln là các nguyên tố đất hiếm như Dy, Gd, La, Ho, Nd...) đã được tổng hợp và ứng dụng trong một số lĩnh vực như xúc tác quang phân hủy chất màu hữu cơ (Kondrashokova et al., 2018; Martinson et al., 2020), làm vật liệu lưu trữ năng lượng tái tạo (Nguyen et al., 2023; Pena et al., 2001; Tan et al., 2017), làm cảm biến hóa học phát hiện các khí độc (Song et al., 2020), làm vật liệu quang từ và điện tử (Warshi et al., 2018; Tran et al., 2024; H. H. Nguyen et al., 2025).

Trong số vật liệu perovskite thì orthoferrite lanthanum (o-LaFeO_3) là một đại diện được nhiều nhà nghiên cứu quan tâm. Các nghiên cứu chỉ ra rằng LaFeO_3 có cấu trúc orthorhombic,

Cite this article as: Chu, T. K. H., Pham, L. T., Nguyen, V. Y., & Nguyen, A. T. (2025). Physico-chemical characteristics of $\text{La}_{1-x}\text{Nd}_x\text{FeO}_3$ nanoparticles obtained from the co-precipitation technique. *Ho Chi Minh City University of Education Journal of Science*, 22(12), 2131-2141. [https://doi.org/10.54607/hcmue.js.22.12.5221\(2025\)](https://doi.org/10.54607/hcmue.js.22.12.5221(2025))

nhóm không gian $Pbnm$, ổn định từ nhiệt độ phòng đến xấp xỉ 957 °C (Popkov et al., 2017; Pidburtnyi et al., 2021; Pham et al., 2022). Ở điều kiện thường, mỗi ô đơn vị chứa bốn đơn vị cấu trúc ($Z = 4$) với các thông số mạng tinh thể $a = 5.55 \text{ \AA}$, $b = 5.56 \text{ \AA}$, $c = 7.86 \text{ \AA}$ và thể tích ô mạng $V = 242,54 \text{ \AA}^3$ (Pidburtnyi et al., 2021). Trong cấu trúc orthorhombic LaFeO_3 , các ion oxygen chiếm hai vị trí không tương đương về mặt tinh thể học, kí hiệu là O1 và O2. Với bán kính ion $\text{La}^{3+} = 1,061 \text{ \AA}$, $\text{Fe}^{3+} = 0,650 \text{ \AA}$ và hệ số dung sai Goldschmidt $t = 0,8589$ cho thấy perovskite LaFeO_3 có cấu trúc orthorhombic. Sự ổn định của cấu trúc orthorhombic được duy trì nhờ hiện tượng nghiêng đối xứng các bát diện $[\text{FeO}_6]$. Các nghiên cứu xác nhận rằng, đặc tính hóa lí của vật liệu nano perovskite $o\text{-LaFeO}_3$ chịu ảnh hưởng của một số yếu tố như hình thái và kích thước hạt, kích thước tinh thể, độ tinh thể hóa, loại nguyên tố và nồng độ nguyên tố pha tạp (Pham et al., 2022; Popkov et al., 2017; Abbas et al., 2018; Shi et al., 2022; Adline et al., 2024). Thật vậy, nghiên cứu của Adline và cộng sự thể hiện pha tạp 30% ion Nd^{3+} trong perovskite LaFeO_3 làm tăng hằng số điện môi từ 40,74 lên 440 đo ở 50 Hz, giúp vật liệu pha tạp thích hợp cho các ứng dụng trong thiết bị vi sóng và tần số vô tuyến (Adline et al., 2024). Vật liệu nano LaFeO_3 pha tạp Nd thể hiện tính chất bán dẫn và được ứng dụng trong cảm biến nhạy hơi còn dựa trên sự thay đổi điện trở của vật liệu. LaFeO_3 có tính sắt từ yếu do cơ chế phản sắt từ nghiêng. Tuy nhiên, vật liệu gồm LaFeO_3 và LaFeO_3 pha tạp ion Nd^{3+} lại mang bản chất của vật liệu từ cứng với giá trị H_c rất lớn ($H_c = 1409,1$ và $1111,4 \text{ Oe}$ tương ứng đối với các mẫu LaFeO_3 và $\text{La}_{0,9}\text{Nd}_{0,1}\text{FeO}_3$), trong khi độ từ bão hòa vừa phải (RameshKumar et al., 2019). Cả lực kháng từ và độ từ hóa bão hòa đều tăng khi pha tạp neodymium. Trong một nghiên cứu khác, các hạt nano LaFeO_3 được chuẩn bị theo phương pháp đồng kết tủa kết hợp nung sản phẩm ở 800 °C trong 3 giờ và nghiền bằng máy động cơ trong 4 giờ có lực kháng từ $H_c = 1217,6 \text{ Oe}$ (Sasikala et al., 2017). Các đặc tính này cho thấy tiềm năng của LaFeO_3 và $\text{La}_{0,9}\text{Nd}_{0,1}\text{FeO}_3$ trong các ứng dụng thiết bị ghi từ cho các ổ đĩa cứng và các băng từ (Nguyen et al., 2012; Sasikala et al., 2017; RameshKumar et al., 2019).

Vật liệu nano trên cơ sở perovskite lanthanum và pha tạp các nguyên tố đất hiếm khác nhau đã được tổng hợp bằng các kĩ thuật thực nghiệm khác nhau như phản ứng pha rắn, sol-sol, thủy nhiệt hay đồng kết tủa (Nguyen et al., 2012; Sasikala et al., 2017; RameshKumar et al., 2019; Pham et al., 2022). Rõ ràng là mỗi phương pháp tổng hợp đều có những điểm mạnh và hạn chế khác nhau. Do đó, dựa mục tiêu nghiên cứu cũng như điều kiện thí nghiệm, mỗi nhóm nghiên cứu đều có cách tiếp cận phù hợp để tổng hợp đối tượng vật liệu quan tâm. Trong các nghiên cứu trước, các perovskite LnFeO_3 pha tạp các nguyên tố khác nhau đã được tổng hợp bằng kĩ thuật đồng kết tủa các hydroxide kết hợp nhiệt phân ở nhiệt độ cao (Tran et al., 2024; Nguyen et al., 2024; A. T. Nguyen et al., 2025). Sự khác biệt của kĩ thuật đồng kết tủa trong nghiên cứu này so với đồng kết tủa truyền thống là các cation kim loại chuyển tiếp được thủy phân chậm trong nước ở nhiệt độ cao trước, sau đó để nguội đến nhiệt độ phòng rồi mới thêm chất tạo kết tủa thích hợp. Điều này nhằm giảm kích thước hạt vật liệu tổng hợp đến thang nanomet. Theo hiểu biết của chúng tôi, tổng hợp và đánh giá đặc tính hóa lí của hệ hạt nano perovskite lanthanum pha tạp neodymium ($\text{La}_{1-x}\text{Nd}_x\text{FeO}_3$) bằng kĩ thuật đồng kết tủa các

hydroxides tương ứng chưa được báo cáo.

Do đó, nghiên cứu này trình bày kết quả đánh giá các đặc tính hóa lí, bao gồm cấu trúc tinh thể, hình thái, kích thước, thành phần hóa học và đặc tính từ của hệ hạt nano perovskite $\text{La}_{1-x}\text{Nd}_x\text{FeO}_3$ hình thành bằng kỹ thuật đồng kết tủa.

2. Thực nghiệm và kỹ thuật nghiên cứu

Các hóa chất dùng để điều chế hệ hạt nano $\text{La}_{1-x}\text{Nd}_x\text{FeO}_3$ bao gồm $\text{La}(\text{NO}_3)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, $\text{Nd}(\text{NO}_3)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$, NaOH , nước cất hai lần. Các hóa chất sử dụng đều có độ tinh khiết cao ($> 99,9\%$), có xuất xứ từ hãng Sigma-Aldrich. Hệ hạt nano perovskite $\text{La}_{1-x}\text{Nd}_x\text{FeO}_3$ ($x = 0; 0,1; 0,15$ và $0,2$ tính theo công thức lí thuyết dự kiến) được tổng hợp theo qui trình đơn giản như sau (Tran et al., 2024; Nguyen et al., 2024; A. T. Nguyen et al., 2025).

Bước 1. Cân các muối theo tỉ lệ mol tương ứng với từng tỉ lệ x , rồi hòa tan trong 50 mL nước cất, khuấy từ khoảng 10 phút cho các muối tan hết.

Bước 2. Dùng buret nhỏ từng giọt dung dịch chứa hỗn hợp muối vào cốc đựng 500 mL nước nóng ($t^\circ > 95^\circ\text{C}$) và khuấy từ liên tục. Tiếp theo, hệ được gia nhiệt và khuấy thêm trong 10 phút, sau đó để nguội cốc phản ứng về nhiệt độ $\sim 30^\circ\text{C}$.

Bước 3. Nhỏ từng giọt dung dịch NaOH 5% cho đến giá trị pH ~ 10 và khuấy từ liên tục trong khoảng 45 phút (Sasikala et al., 2017; Nguyen et al., 2024). Nhận biết bằng giấy đo pH.

Bước 4. Kết tủa được lọc và rửa sạch bằng nước cất cho đến pH trung tính (rửa khoảng 5 lần). Kết tủa để khô ở nhiệt độ phòng khoảng 3–5 ngày, rồi nghiền thành bột mịn bằng cối và chày sứ, sản phẩm bột hình thành có màu nâu đất (gọi là chất của hệ hạt nano $\text{La}_{1-x}\text{Nd}_x\text{FeO}_3$). Các hạt nano perovskite $\text{La}_{1-x}\text{Nd}_x\text{FeO}_3$ ($x = 0; 0,1; 0,15$ và $0,2$) thu được sau khi nung chất bột tiền chất ở 800°C trong 60 phút. Việc lựa chọn nhiệt độ nung 800°C là dựa vào các công bố (Sasikala et al., 2017; Nguyen et al., 2024), trong đó các perovskite thu được là đơn pha, có độ kết tinh tốt và đạt kích thước nanomet.

Cấu trúc tinh thể của hệ hạt nano $\text{La}_{1-x}\text{Nd}_x\text{FeO}_3$ được xác định bằng kỹ thuật nhiễu xạ tia X bột (PXRD), sử dụng máy phân tích EMPYREAN của hãng PANalytical (Hà Lan). Chế độ đo, bao gồm: cathode bằng đồng với bước sóng $\lambda = 1,54060 \text{ \AA}$, $2\theta = 10\text{--}80^\circ$, tốc độ quét $0,02^\circ/\text{s}$. Kích thước tinh thể trung bình ($D_{\text{Scher.}}$, nm), các thông số ô đơn vị (a , b , c , V) được tính theo các công thức (1), (2) và (3) dưới đây (Sasikala et al., 2017).

$$D = \frac{0,89\lambda}{\beta \cos \theta} \quad (1)$$

$$\frac{1}{d^2} = \frac{h^2}{a^2} + \frac{k^2}{b^2} + \frac{l^2}{c^2} \quad (2)$$

$$V = a \cdot b \cdot c \quad (3)$$

trong đó, β là độ rộng ứng với nửa chiều cao của cực đại nhiễu xạ, θ là góc nhiễu xạ, d là khoảng cách giữa hai mặt phẳng tinh thể, (hkl) là bộ chỉ số Miller ứng với mặt phẳng tinh thể đang xét.

Thành phần các nguyên tố La, Nd, Fe và O trong các mẫu được đo bằng phương pháp EDX, sử dụng kính hiển vi quét xạ trường S-4800 kết hợp với máy phân tích thành phần

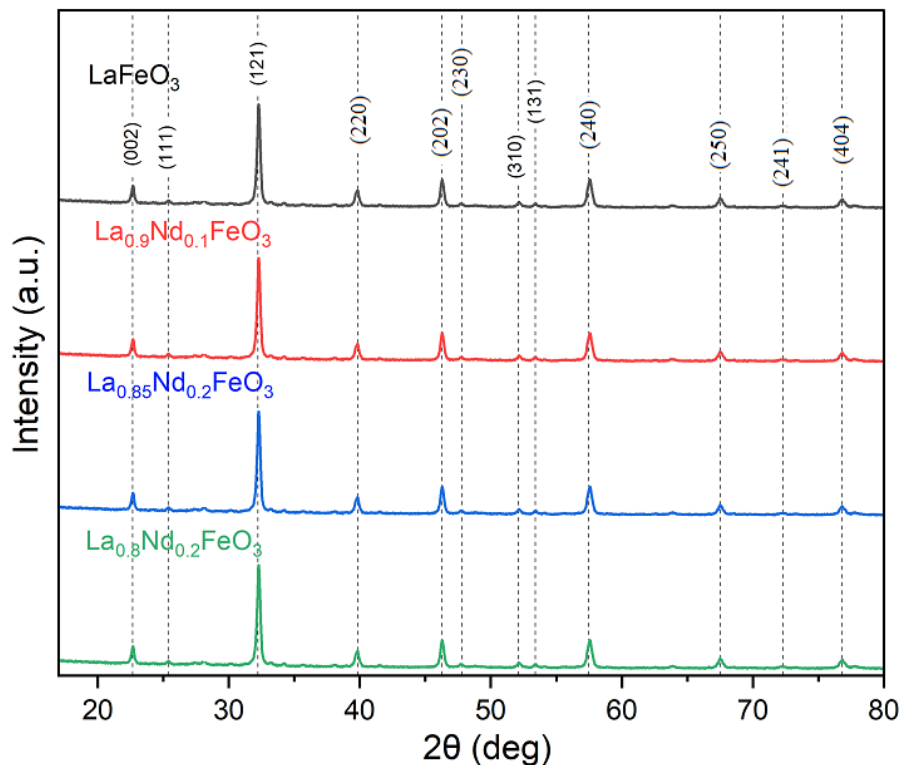
nguyên tố EDX H-7593.

Hình thái và kích thước của hệ hạt nano $\text{La}_{1-x}\text{Nd}_x\text{FeO}_3$ được quan sát dưới kính hiển vi SEM (S-4800) và TEM (Joel JEM-1400).

Các đặc tính từ của hệ hạt nano perovskite $\text{La}_{1-x}\text{Nd}_x\text{FeO}_3$ như H_c (Oe), M_s ($\text{emu}\cdot\text{g}^{-1}$) và M_r ($\text{emu}\cdot\text{g}^{-1}$) được nghiên cứu bằng hệ đo từ kế mẫu rung (VSM), thực hiện ở nhiệt độ phòng ($\sim 30^\circ\text{C}$) dưới từ trường ngoài áp vào từ -15000 Oe đến $+15000$ Oe.

3. Kết quả và thảo luận

Hình 1 là giản đồ PXRD của các mẫu bột sau khi nung ở 800°C trong 60 phút. Kết quả chỉ xuất hiện các peak có cường độ cao, trùng với vị trí các peak của chất chuẩn LaFeO_3 trong Atlas giản đồ phổ (PDF chuẩn số 04-011-7994: LaFeO_3 - Iron Lanthanum Oxide, Hình 2). Trên giản đồ Hình 1, các peak được thể hiện tương ứng với các bộ chỉ số Miller (h, k, l), không quan sát thấy các peak ứng với các pha thứ cấp khác như Fe_2O_3 , La_2O_3 , Nd_2O_3 hay NdFeO_3 , chứng tỏ sự pha tạp ion Nd^{3+} vào cấu trúc perovskite LaFeO_3 thành công. Kết quả tương tự được trình bày trong nghiên cứu về perovskite LaFeO_3 pha tạp samarium và neodymium của Adline cùng cộng sự (Adline et al., 2024) và của RameshKumar cùng cộng sự (RameshKumar et al., 2019).

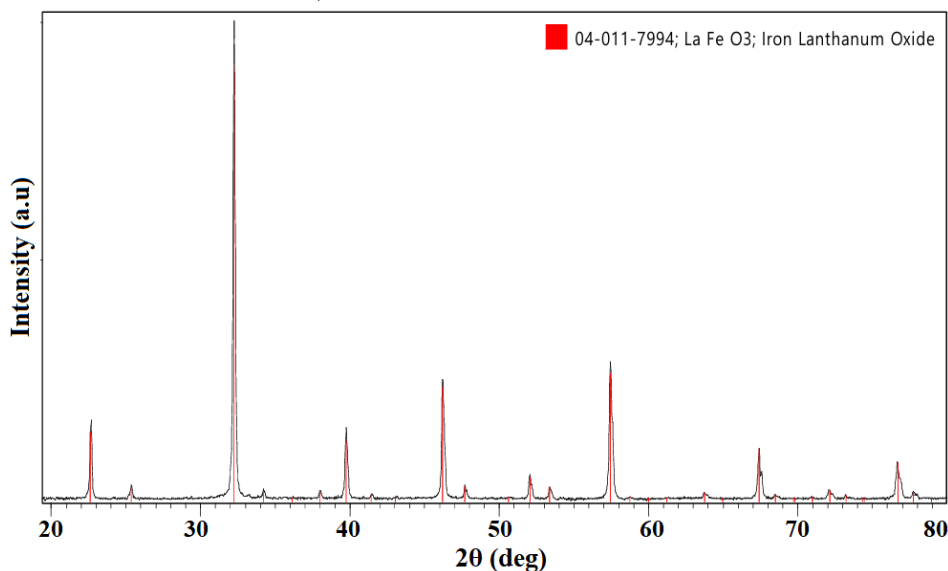


Hình 1. Giản đồ PXRD của hệ hạt nano $\text{La}_{1-x}\text{Nd}_x\text{FeO}_3$

Hình thành bằng kỹ thuật đồng kết tủa nung ở 800°C trong 60 phút

Kích thước trung bình pha tinh thể và các thông số cấu trúc mạng tinh thể perovskite $\text{La}_{1-x}\text{Nd}_x\text{FeO}_3$ ($x = 0; 0,1; 0,15$ và $0,2$) được xác định từ các công thức (1–3) trình bày ở Bảng 1. Kích thước trung bình (D) dao động từ 27,07 đến 30,71 nm, trong khi thể tích ô

mạng tinh thể $V = 241,41\text{--}242,62 \text{ \AA}^3$. Điều thú vị là cả hai giá trị D và V đều giảm dần theo chiều tăng hàm lượng ion Nd^{3+} pha tạp. Điều này được giải thích là do bán kính ion thay thế Nd^{3+} ($r = 0,950 \text{ \AA}$) bé hơn bán kính ion bị thay thế La^{3+} ($r = 1,04 \text{ \AA}$) (Housecroft, et al., 2005; RameshKumar et al., 2019).

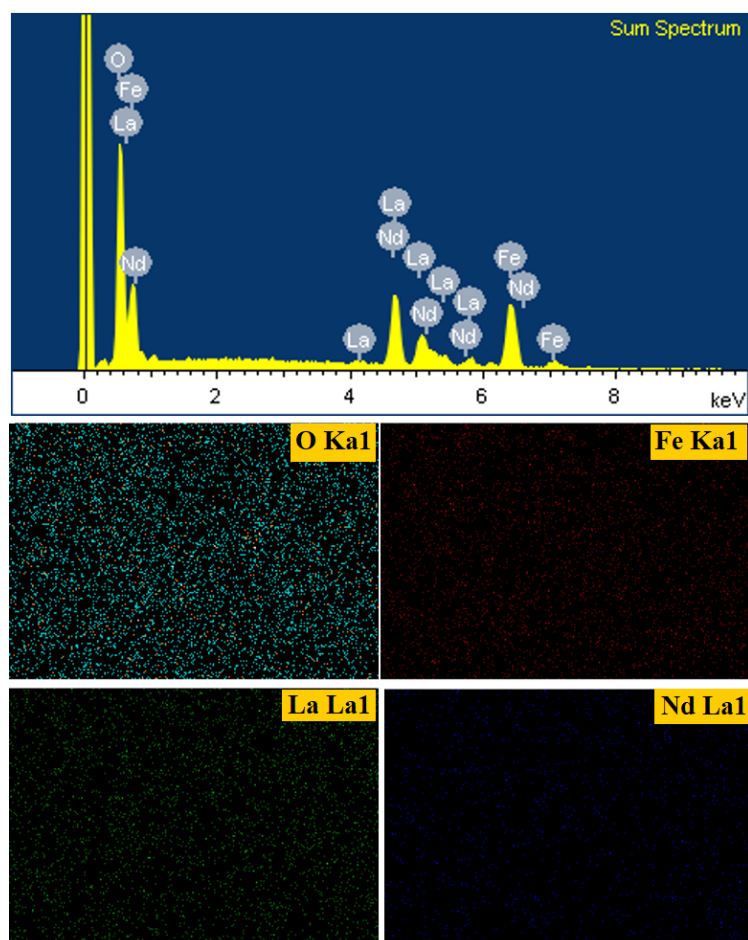


Hình 2. Giản đồ PXRD của hạt nano LaFeO_3 nung ở 800°C đã ghép với phổ chuẩn

Bảng 1. Kích thước trung bình pha tinh thể và các thông số mạng tinh thể perovskite $\text{La}_{1-x}\text{Nd}_x\text{FeO}_3$ nung ở 800°C trong 60 phút

Tham số	LaFeO_3	$\text{La}_{0,9}\text{Nd}_{0,1}\text{FeO}_3$	$\text{La}_{0,85}\text{Nd}_{0,15}\text{FeO}_3$	$\text{La}_{0,8}\text{Nd}_{0,2}\text{FeO}_3$
$a, \text{ \AA}$	5,55146	5,54502	5,54086	5,53786
$b, \text{ \AA}$	5,56369	5,57156	5,56642	5,56717
$c, \text{ \AA}$	7,85618	7,84528	7,83704	7,83030
$\alpha = \beta = \gamma$	90°	90°	90°	90°
$V, \text{ \AA}^3$	242,62	241,93	241,72	241,41
$D, \text{ nm}$	30,71	29,36	28,80	27,07

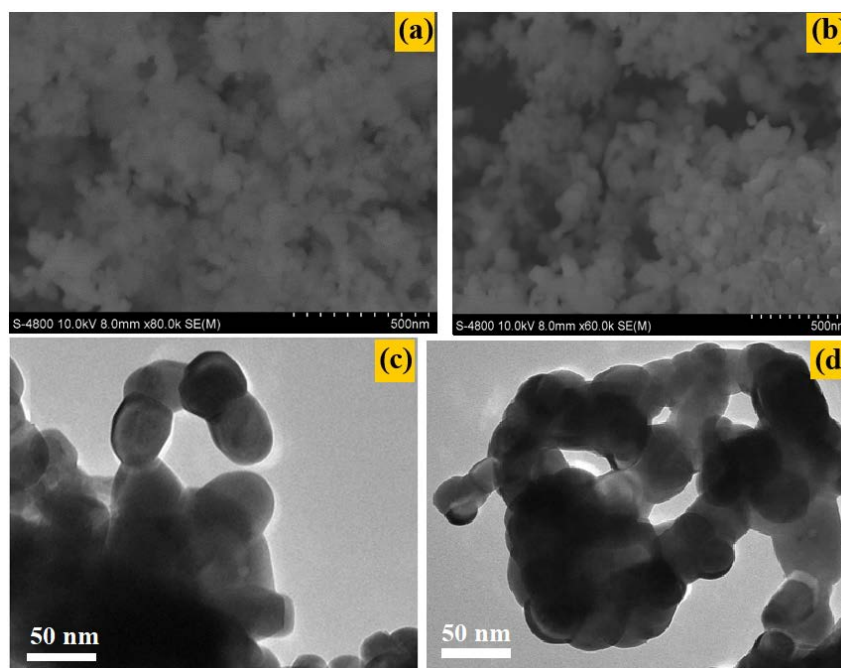
Phổ EDX và bản đồ các nguyên tố lanthanum (La), neodymium (Nd), iron (Fe) và oxygen (O) đối với mẫu $\text{La}_{0,8}\text{Nd}_{0,2}\text{FeO}_3$ được chỉ ra trên Hình 3. Rõ ràng là chỉ ghi nhận được các peak ứng với các nguyên tố có hợp chất tổng hợp ban đầu là La, Nd, Fe và O với % khối lượng và % nguyên tử xấp xỉ so với công thức tính theo lý thuyết. Bản đồ phân bố các nguyên tố La, Nd, Fe và O được cho là đồng đều. Điều này được cho là do không chỉ bán kính cặp ion La^{3+} và Nd^{3+} xấp xỉ nhau mà nguyên tử khối của chúng cũng gần bằng nhau ($\text{La} = 138,91$; $\text{Nd} = 144,24$), nên sự thay thế vị trí giữa chúng trong các nút mạng tinh thể perovskite LaFeO_3 xảy ra thuận lợi (Housecroft et al., 2005; RameshKumar et al., 2019; Nguyen et al., 2025).



Hình 3. Phổ EDX và EDX-mapping

của các hạt nano $\text{La}_{0.8}\text{Nd}_{0.2}\text{FeO}_3$ nung ở 800 °C trong 60 phút

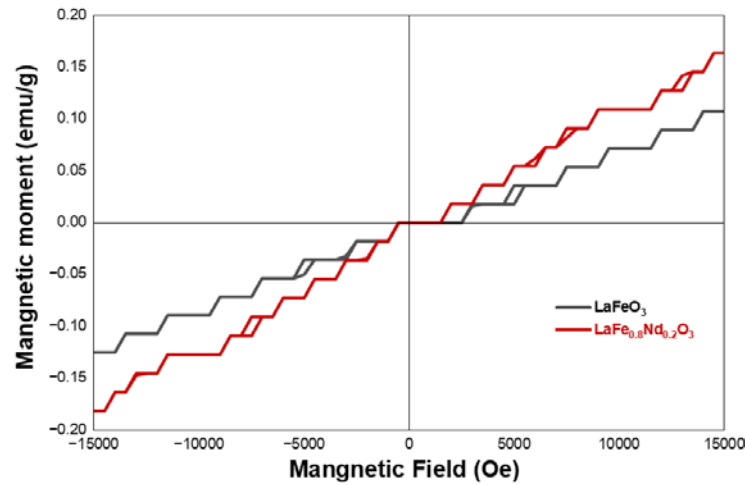
Ảnh SEM và TEM của hệ hạt nano $\text{La}_{1-x}\text{Nd}_x\text{FeO}_3$ ($x = 0$ và 0,2) cho thấy các hạt $\text{La}_{1-x}\text{Nd}_x\text{FeO}_3$ tổng hợp có dạng gần như hình cầu hoặc giả hình cầu với biên cạnh yếu (xét các hạt nano riêng lẻ), kích thước các hạt nano riêng lẻ quan sát được vào khoảng 30–50 nm (Hình 4). Từ Hình 4 cũng dễ dàng quan sát thấy các hạt nano $\text{La}_{1-x}\text{Nd}_x\text{FeO}_3$ ($x = 0$ và 0,2) hình thành có xu hướng kết tụ, hình thành các đám hạt nano xếp chồng lên nhau và có định hướng ngẫu nhiên trong không gian. Sự kết tụ giữa các hạt xảy ra là do năng lượng bề mặt lớn (hiệu ứng nano), nên chúng có xu hướng kết tụ để chuyển về trạng thái bền hơn về mặt nhiệt động. Hiện tượng kết tụ giữa các hạt nano cũng quan sát thấy đối với một số hệ hạt perovskite RFeO_3 thuần và RFeO_3 pha tạp các nguyên tố khác nhau được tổng hợp bằng kỹ thuật hóa ướt như trong các nghiên cứu (Kondrashkova et al., 2018; Martinson et al., 2020; Nguyen et al., 2024; A. T. Nguyen et al., 2025; Pham et al., 2022).



Hình 4. Các ảnh SEM và TEM

của các hạt nano LaFeO_3 (a, c) và $\text{La}_{0.8}\text{Nd}_{0.2}\text{FeO}_3$ (b, d) nung ở 800°C trong 60 phút

Để nghiên cứu ảnh hưởng của ion pha tạp Nd^{3+} đến các đặc tính từ của hệ hạt nano LaFeO_3 , chọn mẫu $x = 0$ và $0,2$ để đánh giá trên hệ đo từ VSM, thực hiện ở nhiệt độ phòng (Hình 5). Từ Hình 5 cho thấy đường cong từ hóa của cả hai mẫu LaFeO_3 thuần và LaFeO_3 pha tạp ion Nd^{3+} ($x = 0,2$) tiếp tục đi lên, chưa có dấu hiệu bão hòa ở từ trường $H = \pm 15000$ Oe. Cả hai mẫu vật liệu đều có các giá trị H_c và M_r là rất thấp (~ 0), trong khi độ từ hóa M_s khá lớn (Bảng 2). Chúng tôi các mẫu vật liệu nano LaFeO_3 và $\text{La}_{0.8}\text{Nd}_{0.2}\text{FeO}_3$ tổng hợp được có tính từ mềm tốt. Tính chất từ của hệ hạt nano perovskite $\text{La}_{1-x}\text{Nd}_x\text{FeO}_3$ hình thành được cho là khác biệt khá lớn so với các mẫu vật liệu nano LaFeO_3 và LaFeO_3 pha tạp titanium tổng hợp bằng các kỹ thuật khác như đồng kết tủa, sol-gel hay thủy nhiệt trong các nghiên cứu (Sasikala et al, 2017; Sasikala et al., 2019; Coban et al., 2020) (Bảng 2). Thật vậy, trong các nghiên cứu này các mẫu vật liệu nano LaFeO_3 và LaFeO_3 pha tạp Ti ($x = 0,2$) có lực kháng từ rất lớn ($H_c \gg 100$ Oe), trong khi độ từ hóa lại rất thấp (Sasikala et al, 2017; Sasikala et al., 2019), chúng mang bản chất của vật liệu từ cứng và rất khó khử từ. Điểm giống nhau trong nghiên cứu của chúng tôi và của các nhóm nghiên cứu khác là sự pha tạp ion Nd^{3+} trong mạng tinh thể perovskite LaFeO_3 làm giảm lực kháng từ và tăng độ từ hóa (trong các nghiên cứu của Sasikala cùng cộng sự là pha tạp ion Ti^{4+}). Điều này được giải thích là do ion bị thay thế La^{3+} là ion nghịch từ, trong khi ion thay thế Nd^{3+} là ion thuận từ (moment từ > 0).



Hình 5. Đường cong VSM của các hạt nano LaFeO_3 và $\text{La}_{0.8}\text{Nd}_{0.2}\text{FeO}_3$ nung ở 800°C

Bảng 2. Các thông số từ của các hệ hạt nano LaFeO_3 và $\text{La}_{0.8}\text{Nd}_{0.2}\text{FeO}_3$ đo ở nhiệt độ phòng và so sánh với TLTK

Vật liệu	Phương pháp tổng hợp	H_c , Oe	M_r , $\text{emu}\cdot\text{g}^{-1}$	M_s , $\text{emu}\cdot\text{g}^{-1}$
LaFeO_3	Đồng kết tủa	0,005	~ 0	0,13
$\text{La}_{0.8}\text{Nd}_{0.2}\text{FeO}_3$	Đồng kết tủa	0,002	~ 0	0,19
LaFeO_3	Đồng kết tủa	1217,6	$542,9 \cdot 10^{-6}$	$6,49 \cdot 10^{-3}$
$\text{La}_{0.8}\text{Ti}_{0.2}\text{FeO}_3$		855,0	$747,2 \cdot 10^{-6}$	$8,25 \cdot 10^{-3}$
LaFeO_3	Sol - gel	79,13	0,06	0,57
LaFeO_3	Thủy nhiệt	1044,79	$369,5 \cdot 10^{-6}$	$3,55 \cdot 10^{-3}$
$\text{La}_{0.8}\text{Ti}_{0.2}\text{FeO}_3$		448,31	$352,5 \cdot 10^{-6}$	$7,44 \cdot 10^{-3}$

Bảng 2 cũng cho thấy các đặc tính từ của vật liệu LaFeO_3 không chỉ phụ thuộc vào hàm lượng và bản chất của ion pha tạp, mà còn phụ thuộc vào phương pháp tổng hợp chúng. Điều này có thể là do sản phẩm hình thành ở điều kiện khác nhau sẽ chịu ảnh hưởng của một số yếu tố khác nhau như độ tinh thể hóa, các khuyết tật bề mặt, độ kết tụ, kích thước và hình thái hạt, diện tích bề mặt...

4. Kết luận

Tóm lại, hệ hạt nano perovskite $\text{La}_{1-x}\text{Nd}_x\text{FeO}_3$ đã được tổng hợp bằng kỹ thuật đồng kết tủa đơn giản. Dung dịch chứa các muối nitrate của lanthanum, neodymium và iron (III) với tỉ lệ mol thích hợp được thủy phân trong nước sôi trước, sau đó để nguội đến nhiệt độ phòng rồi thêm vào dung dịch NaOH 5 %. Kết tủa sau khi khô, nghiền mịn rồi nung ở 800°C trong 60 phút, môi trường nung là không khí khô. Các phương pháp XRD và EDX đã chứng minh sự tương thích giữa kết quả thực nghiệm và tính toán lý thuyết trong việc tổng hợp hệ hạt nano $\text{La}_{1-x}\text{Nd}_x\text{FeO}_3$ ($x = 0; 0,1; 0,15$ và $0,2$). Ảnh SEM/TEM cho thấy hệ hạt $\text{La}_{1-x}\text{Nd}_x\text{FeO}_3$ có kích thước nano (30–50 nm). Sự pha tạp Nd vào trong perovskite LaFeO_3 làm giảm các thông số cấu trúc (D , V), nhưng làm tăng giá trị độ từ hóa cực đại tại từ trường $H = \pm 15000$ Oe. Hệ hạt nano $\text{La}_{1-x}\text{Nd}_x\text{FeO}_3$ hình thành mang bản chất của vật liệu thuận từ mềm, có thể ứng dụng làm vật liệu chế tạo lõi nam châm điện, lõi dẫn từ và cảm biến từ.

❖ **Tuyên bố về quyền lợi:** Các tác giả xác nhận hoàn toàn không có xung đột về quyền lợi.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- Abbas, Y. M., Ali, S. E., Mansour, A. B., & Abdel-Hamid, A. H. I. (2018). Synthesis, structure and magnetic characterization of orthoferrite LaFeO₃ nanoparticles. *Journal of Advances in Physics*, 14(3), 5664-5681. <https://doi.org/10.24297/jap.v14i3.7693>
- Adline, S. B., & Ferby, V. A. (2024). Envisioning the structural, morphological, optical, dielectrical and electrical properties of Nd³⁺ ions doped LaFeO₃ nanoparticles – study on effect of Nd³⁺ doping concentration. *Materials Science and Engineering: B*, 309, 117630. <https://doi.org/10.1016/j.mseb.2024.117630>
- Çoban, D. Ö., Türk, A., & Çelik, E., (2020). Synthesis and characterizations of sol–gel derived LaFeO₃ perovskite powders. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 3, 22789-22809. <https://doi.org/10.1007/s10854-020-04803-8>.
- Housecroft, C. E., & Sharpe, A. G. (2005). *Inorganic chemistry* (2nd ed.). Pearson Prentice Hall.
- Kondrashkova, I. S., Martinson, K. D., Zakharova, N. V., & Popkov, V. I. (2018). Synthesis of nanocrystalline HoFeO₃ photocatalyst via heat treatment of products of glycine-nitrate combustion. *Russian Journal of General Chemistry*, 88, 2465-2471. <https://doi.org/10.1134/S107036321812002>
- Martinson, K. D., Kondrashkova, I. S., Omarov, S. O., Sladkpvskiy, D. A., Kiselev, A. S., Kiseleva, T. Yu., & Popkov, V. I. (2020). Magnetically recoverable catalyst based on porous nanocrystalline HoFeO₃ for processes of n-hexane conversion. *Advanced Powder Technology*, 31(1), 402-408. <https://doi.org/10.1016/j.apl.2019.10.033>
- Nguyen, T. K. C., Tran, D. T., Mittova, V. O., Tomina, E. V., Mittova, I. Ya., Vu, T. N. A., Nguyen, A. T., Bui, T. H., & Bui, X. V. (2024). Physicochemical characteristics of DyFeO₃ perovskite nanoparticles synthesized by a simple co-precipitation method at room temperature. *Emergent Materials*, 7, 2767-2775. <https://doi.org/10.1007/s42247-024-00768-0>
- Nguyen, H. H., Nguyen, T. T. T., Mittova, V. O., Tomina, E. V., Vu, T. N. A., & Nguyen, A. T. (2025). Structural, thermal, optical, and magnetic behavior of the nanosized perovskite-like GdFeO₃ synthesized by modified co-precipitation method. *Journal of Materials Science: Materials in Electronic*, 36, 710. <https://doi.org/10.1007/s10854-025-14805-z>
- Nguyen, A. T., Nguyen, T. H. N., Tran, T. T. N., Truong, C. H., Nguyen, T. N., Nguyen, T. L., Tran, V. M., Pham, T. L., Tran, T. K. N., & Kim, Il T. (2025). Synthesis and characterization of HoMn_xFe_{1-x}O₃ perovskite nanoparticles anode for Li-ion batteries, *Inorganic Chemistry Communications*, 179, 114725. <https://doi.org/10.1016/j.inoche.2025.114725>
- Nguyen, T. T., & Dang, L. M. (2012). Size effect on the structural and magnetic properties of nanosized perovskite LaFeO₃ prepared by different methods. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2012, 380306. <https://doi.org/10.1155/2012/380306>.
- Pena, P., & Fierro, J. (2001). Chemical structures and performance of perovskite oxide. *Chemical Reviews*, 101(7), 1981-2018. <https://doi.org/10.1021/cr980129f>

- Pidburtnyi, M., Zanca, B., Coppex, C., Villegas, S. J., & Thangadurai, V. (2021). A review on perovskite-type LaFeO₃ based electrodes for CO₂ reduction in solid oxide electrolysis cells: current understanding of structure-functional property relationships. *Chemistry of Materials*, 33, 4249-4268. <https://doi.org/10.1021/acs.chemmater.1c00771>
- Pham, T. H. D., Nguyen, A. T., & Bui, X. V. (2022). Optical and magnetic characteristics of LaFeO₃ nanoparticles synthesized by simple co-precipitation method. *Asian Journal of Chemistry*, 34(5), 1279-1283. <https://doi.org/10.14233/ajchem.2022.23606>
- Popkov, V. I., Tugova, E. A., Bachina, A. K., & Almyasheva, O. V. (2017). The formation of nanocrystalline orthoferrites of rare-earth elements XFeO₃ (X = Y, La, Gd) via heat treatment of coprecipitated hydroxides. *Russian Journal of General Chemistry*, 87, 2516-2524. <https://doi.org/10.1134/S1070363217110020>
- RameshKumar, R., Ramachandran, T., Natarajan, K., Muralidharan, M., Hamed, F., & Kurapati, V. (2019). Fraction of rare-earth (Sm/Nd)-lanthanum ferrite-based perovskite ferroelectric and magnetic nanopowders. *Journal of Electronic Materials*, 48(3), 1694-1703. <https://doi.org/10.1007/s11664-018-06897-7>.
- Warshi, M. K., Mishra, V., Sagdeo, A., Mishra, V., Kumar, R., & Sagdeo, P. R. (2018). Structural, optical and electronic properties of RFeO₃. *Ceramics International*, 44(7), 8344-8349. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2018.02.023>
- Sasikala, C., Durairaj, N., Baskaran, I., Sathyaseelan, B., Henini, M., & Manikandan, E. (2017). Transition metal titanium (Ti) doped LaFeO₃ nanoparticles for enhanced optical structural and magnetic properties. *Journal of Alloys and Compounds*, 712, 870-877. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2017.04.133>.
- Sasikala, C., Suresh, G., Durairaj, N., Baskaran, I., Sathyaseelan, B., Manikandan, E., Srinivasan, R., & Moodley, K. M. (2019). Chemical, morphological, structural, optical, and magnetic properties of transition metal titanium (Ti)-doped LaFeO₃ nanoparticles. *Journal of Superconductivity and Novel Magnetism*, 32(6), 1791-1797. <https://doi.org/10.1007/s10948-018-4879-1>.
- Shi, Z., Li, H., Zhang, L., & Cao, Y. (2022). Improved photocatalytic activity of LaFeO₃ with doping Mn³⁺ ions and modifying Pd²⁺ ions for photoreduction of CO₂ into CH₄. *Journal of Power Sources*, 519, 230738. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2021.230738>
- Song, Y., Zhang, Y., Ma, M., Ren, J., Liu, C., & Tan, J. (2020). Visible light-assisted formaldehyde sensor based on HoFeO₃ nanoparticles with sub-ppm detection limit. *Ceramics International*, 46(10), 16337-16344. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2020.03.191>
- Tan, P., Liu, M., Shao, Z., & Ni, M. (2017). Recent advances in perovskite oxides as electrode materials for nonaqueous lithium-oxygen batteries. *Advanced Energy Materials*, 7(13), 1602674. <https://doi.org/10.1002/aenm.201602674>
- Tran, D. T., Nguyen, H. C. H., Le, T. T. T., & Nguyen, A. T. (2024). Effect of annealing temperature and precipitation agent on the structure, optical and magnetic characteristics of dysprosium orthoferrite nanoparticles. *Materials Today Commnunications*, 40, 109733. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2024.109733>

PHYSICO-CHEMICAL CHARACTERISTICS OF $\text{La}_{1-x}\text{Nd}_x\text{FeO}_3$ NANOPARTICLES OBTAINED FROM THE CO-PRECIPITATION TECHNIQUE

Chu Thi Kim Huong¹, Pham Le Thanh², Nguyen Van Yen³, Nguyen Anh Tien^{1*}

¹Ho Chi Minh City University of Education, Vietnam

²Nguyen Hien High School, Ho Chi Minh City, Vietnam

³VNU University of Engineering and Technology, Vietnam

*Corresponding author: Nguyen Anh Tien – Email: tienna@hcmue.edu.vn

Received: September 02, 2025; Revised: September 18, 2025; Accepted: October 05, 2025

ABSTRACT

In this study, a series of neodymium-doped lanthanum perovskite nanoparticles ($\text{La}_{1-x}\text{Nd}_x\text{FeO}_3$, with $x = 0, 0.1, 0.15$, and 0.2 based on theoretical stoichiometry) were synthesized using a simple co-precipitation method. The structural and magnetic properties of the synthesized samples were characterized by powder X-ray diffraction (PXRD), energy-dispersive X-ray spectroscopy (EDX), scanning and transmission electron microscopy (SEM and TEM), and vibrating sample magnetometry (VSM). Single-phase perovskite structures of $\text{La}_{1-x}\text{Nd}_x\text{FeO}_3$ were formed after calcination of the dried precipitate at 800°C for 60 minutes. The average crystallite size and unit cell volume were found to decrease with increasing Nd^{3+} doping ($D_{\text{Scher}} = 30.71\text{--}27.07\text{ nm}$; $V = 242.62\text{--}241.41\text{ \AA}^3$). The synthesized nanoparticles exhibited spherical to near-spherical morphology with particle sizes ranging from 30 to 50 nm. Both LaFeO_3 and $\text{La}_{0.8}\text{Nd}_{0.2}\text{FeO}_3$ samples exhibited soft ferromagnetic behavior, characterized by nearly-zero coercivity (H_c , Oe) and remanent magnetization (M_r , $\text{emu}\cdot\text{g}^{-1}$), while showing relatively high saturation magnetization ($M_s = 0.13\text{--}0.19\text{ emu}\cdot\text{g}^{-1}$).

Keywords: Magnetic properties; nanostructure; Nd-doping; perovskite lanthanum