

Bài báo nghiên cứu**TÍNH CHẤT TỪ CỦA CÁC HỆ VẬT LIỆU NANO SPINEL MFe_2O_4
($M = Fe, Co$) TỔNG HỢP BẰNG PHƯƠNG PHÁP ĐỒNG KẾT TỬA***Trương Chí Hiền, Nguyễn Ngọc Thu Ngân,**Nguyễn Châu Chí Lập, Nguyễn Minh Khánh, Trần Thị Tố Nga***Trường Đại học Sư phạm Thành phố Hồ Chí Minh, Việt Nam***Tác giả liên hệ: Trần Thị Tố Nga – Email: ngattto@hcmue.edu.vn**Ngày nhận bài: 06-5-2022; ngày nhận bài sửa: 13-6-2022; ngày duyệt đăng: 30-6-2022***TÓM TẮT**

Trong nghiên cứu này, các hạt nano spinel ferrite MFe_2O_4 ($M = Fe, Co$) được tổng hợp thành công bằng phương pháp đồng kết tủa đơn giản với tác nhân kết tủa là dung dịch $NaOH$ 5%. Các hạt nano đơn pha spinel $FeFe_2O_4$ tạo thành ngay ở nhiệt độ phòng, còn $CoFe_2O_4$ thu được sau khi nung tiền chất bột khô ở $800^\circ C$ trong 1 giờ. Kết quả nghiên cứu bằng kính hiển vi điện tử truyền qua (TEM) cho thấy các hạt nano $FeFe_2O_4$ có dạng hình cầu với kích thước hạt 5-10 nm, còn các hạt nano $CoFe_2O_4$ có dạng hình khối lập phương với kích thước hạt 20-30 nm. Mẫu vật liệu nano $FeFe_2O_4$ tổng hợp được có tính chất của vật liệu siêu thuận từ với độ từ hoá bão hoà rất lớn ($M_s = 85,75$ emu/g), còn mẫu vật liệu nano $CoFe_2O_4$ thể hiện tính chất của vật liệu từ cứng với độ từ dư và lực kháng từ lớn ($M_r = 63,58$ emu/g; $H_c = 1092,17$ Oe). Cả hai mẫu vật liệu spinel ferrite MFe_2O_4 đều bị hút mạnh bởi nam châm đất hiếm.

Từ khóa: đồng kết tủa; $FeFe_2O_4$; $CoFe_2O_4$; kích thước nano; tính chất từ

1. Mở đầu

Trong các oxides bán dẫn kích thước nanomet thì vật liệu ferrite với cấu trúc spinel dạng MFe_2O_4 ($M = Fe, Zn, Mn, Co, Ni$) nhận được sự quan tâm cả về nghiên cứu cơ bản lẫn nghiên cứu ứng dụng, cũng như phương pháp tổng hợp (Lixia et al., 2012; Nguyen et al., 2016). Các đặc trưng về cấu trúc và tính chất của vật liệu nano spinel ferrite phụ thuộc vào nhiều yếu tố khác nhau như bản chất hoá học của các nguyên tố tạo nên spinel, sự phân bố các cation trong mạng tinh thể, hình thái và kích thước hạt, sự pha tạp và cả phương pháp tổng hợp (Dang et al., 2021; Hoang et al., 2022; Ngo et al., 2018; Nguyen et al., 2016). Hai trong số các spinel ferrite được nghiên cứu nhiều có thể kể đến là $FeFe_2O_4$ (Fe_3O_4) và $CoFe_2O_4$. Fe_3O_4 là một ferrite siêu thuận từ có độ từ hoá bão hoà lớn ($M_s = 60,8-90,8$ emu/g), lực kháng từ nhỏ ($H_c = 10-42$ Oe) (Lixia et al., 2012; Bui et al., 2019). $CoFe_2O_4$ là một ferrite

Cite this article as: Trương Chí Hiền, Nguyễn Ngọc Thu Ngân, Nguyễn Châu Chí Lập, Nguyễn Minh Khánh, & Trần Thị Tố Nga (2022). Magnetic properties of spinel ferrite MFe_2O_4 ($M = Fe, Co$) nanomaterials synthesized by co-precipitation method. *Ho Chi Minh City University of Education Journal of Science*, 19(9), 1431-1440.

từ cứng có lực kháng từ lớn ($H_c = 495,72-979,20$ Oe) và độ bão hoà từ trung bình ($M_s = 32,67-67,37$ emu/g) (Ngo et al., 2018). Tùy thuộc vào mục đích ứng dụng khác nhau mà có những yêu cầu khác nhau về thuộc tính từ của ferrite. Một trong các phương pháp có thể điều khiển tính chất từ của spinel ferrite mà nhiều tác giả đã và đang thực hiện là điều chỉnh kích thước hạt nano thông qua phương pháp tổng hợp (Duong et al., 2011; Zi et al., 2019; Rachidi et al., 2019).

Để tổng hợp các hệ vật liệu spinel ferrite MFe_2O_4 kích thước nanomet các nhóm nghiên cứu thường sử dụng kỹ thuật hoá ướt như phương pháp sol-gel (Maaz et al., 2007; Ngo et al., 2018), phương pháp thủy nhiệt (Lixia et al., 2012), phương pháp đồng kết tủa có hoặc không thêm polymer tạo gel (Zi et al., 2009; Duong et al., 2011) hay phương pháp nhiệt dung môi (Bui et al., 2019). Như đã biết, mỗi phương pháp tổng hợp vật liệu nano spinel ferrite đều có những ưu và nhược điểm khác nhau. Tùy thuộc vào điều kiện thiết bị của mỗi phòng thí nghiệm và mục tiêu nghiên cứu cụ thể mà các nhóm nghiên cứu có những lựa chọn về phương pháp tổng hợp phù hợp. Trong các nghiên cứu (Nguyen et al., 2016a; 2021; Hoang et al., 2022) các hạt nano spinel từ tính $NiFe_2O_4$, $CuFe_{2-x}Ho_xO_4$ và perovskite $HoFeO_3$ đã được tổng hợp thành công bằng phương pháp đồng kết tủa đơn giản thông qua quá trình thủy phân các cation kim loại trong nước nóng trước, sau đó để nguội rồi mới thêm vào tác nhân kết tủa thích hợp (không thêm polymer tạo gel). Sự thủy phân từ từ các cation trong nước nóng trước rồi để nguội sẽ tạo thành các hạt kết tủa bền, hạn chế sự phát triển tinh thể (Nguyen et al., 2016a; 2016b; 2021).

Do đó, mục tiêu của nghiên cứu này là tổng hợp các hệ hạt nano spinel MFe_2O_4 ($M = Fe, Co$) bằng phương pháp đồng kết tủa kể trên, đồng thời nghiên cứu cấu trúc và tính chất từ của các hệ vật liệu nano spinel tổng hợp được.

2. Thực nghiệm và phương pháp nghiên cứu

2.1. Hoá chất, dụng cụ, thiết bị

Các hoá chất được sử dụng để tổng hợp các hệ vật liệu nano spinel ferrite ($FeFe_2O_4$ và $CoFe_2O_4$) bao gồm $FeCl_2 \cdot 4H_2O$, $FeCl_3 \cdot 6H_2O$, $Fe(NO_3)_3 \cdot 9H_2O$, $Co(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$, NaOH, nước cất hai lần, giấy lọc băng xanh, giấy phenolphthalein, giấy cân, giấy đo pH. Các hoá chất đều có độ tinh khiết phân tích nên được sử dụng ngay mà không cần tinh chế thêm. Các muối chứa các ion M^{2+} và Fe^{3+} được cân theo tỉ lệ mol là 1:2 và hoà tan vào cốc chứa 50 mL nước cất.

Các dụng cụ cần cho thực nghiệm bao gồm cốc thủy tinh dung tích các loại 50 mL, 100 mL, 1000 mL, buret dung tích 25 mL, máy lọc hút chân không, đĩa thủy tinh, muỗng xúc hoá chất, bình tia nước cất, cối sứ và chày sứ.

Các máy móc thiết bị được sử dụng bao gồm cân phân tích 4 số lẻ, máy khuấy từ gia nhiệt và con cá từ, máy lọc hút chân không, bếp điện và tủ sấy.

2.2. Phương pháp thực nghiệm

Các hệ hạt nano MFe_2O_4 được tổng hợp bằng phương pháp đồng kết tủa đơn giản dựa

trên các nghiên cứu tổng hợp vật liệu nano spinel NiFe_2O_4 , $\text{CuFe}_{2-x}\text{Ho}_x$ và HoFeO_3 (Nguyen et al, 2016a; 2021; Hoang et al., 2022). Nhỏ từ từ từng giọt 50 mL dung dịch chứa hỗn hợp muối của các ion M^{2+} và Fe^{3+} (tỉ lệ mol $\text{M}^{2+}/\text{Fe}^{3+} = 1/2$) vào cốc chứa 400 mL nước nóng ($t^\circ > 95^\circ\text{C}$) trên máy khuấy từ gia nhiệt. Sau khi cho hết dung dịch chứa hỗn hợp muối, hệ được gia nhiệt thêm 15 phút rồi để nguội đến nhiệt độ phòng ($\sim 30^\circ\text{C}$). Tiếp theo, nhỏ từ từ dung dịch NaOH 5% vào hệ thu được ở trên và tiếp tục khuấy từ. Lượng dung dịch NaOH 5% được thêm vào vừa đủ để kết tủa hết các cation M^{2+} và Fe^{3+} (thử hệ bằng giấy phenolphthalein hoá hồng). Tiếp tục khuấy từ thêm 45-60 phút để các hạt kết tủa phân tán đều và ổn định trong nhau, sau đó để lắng trong khoảng 30 phút rồi tiến hành lọc lấy kết tủa trên máy lọc hút chân không và rửa nhiều lần bằng nước cất đến giá trị pH = 7 (thử nước lọc bằng giấy đo pH).

Kết tủa được để khô tự nhiên ở nhiệt độ phòng khoảng 3-5 ngày, rồi nghiền mịn bằng cối sứ và chày sứ thu được bột mịn màu nâu.

2.3. Các phương pháp nghiên cứu

Cấu trúc và thành phần pha tinh thể của các mẫu vật liệu nano MFe_2O_4 được nghiên cứu bằng phương pháp nhiễu xạ tia X bột (PXRD) trên máy EMPYREAN (Hãng PANalytical) với nguồn bức xạ $\text{Cu K}\alpha$ có $\lambda = 1,54184 \text{ \AA}$, bước đo $0,02^\circ$, $2\theta = 10-80^\circ$.

Hình thái và kích thước hạt của các mẫu vật liệu nano spinel ferrite MFe_2O_4 được xác định dựa vào ảnh hiển vi điện tử quét (SEM) trên máy HITACHI S-4800 (Nhật Bản) và ảnh hiển vi điện tử truyền qua (TEM) trên máy JEOL-1400 (Nhật Bản).

Hàm lượng các nguyên tố (Co, Fe và O) được xác định dựa vào phương pháp phổ tán sắc năng lượng tia X (EDX) trên máy FE SEM S-4800, xác định tại 4 vị trí khác nhau rồi lấy giá trị trung bình.

Các đặc trưng từ tính của các mẫu vật liệu nano spinel như đường cong từ hoá, lực kháng từ (H_c , Oe), độ từ hoá hoả hoà (M_s , emu/g) và độ từ dư (M_r , emu/g) được nghiên cứu trên từ kế mẫu rung MICRSENE EV11 (Nhật Bản), đo ở nhiệt độ phòng (300 K).

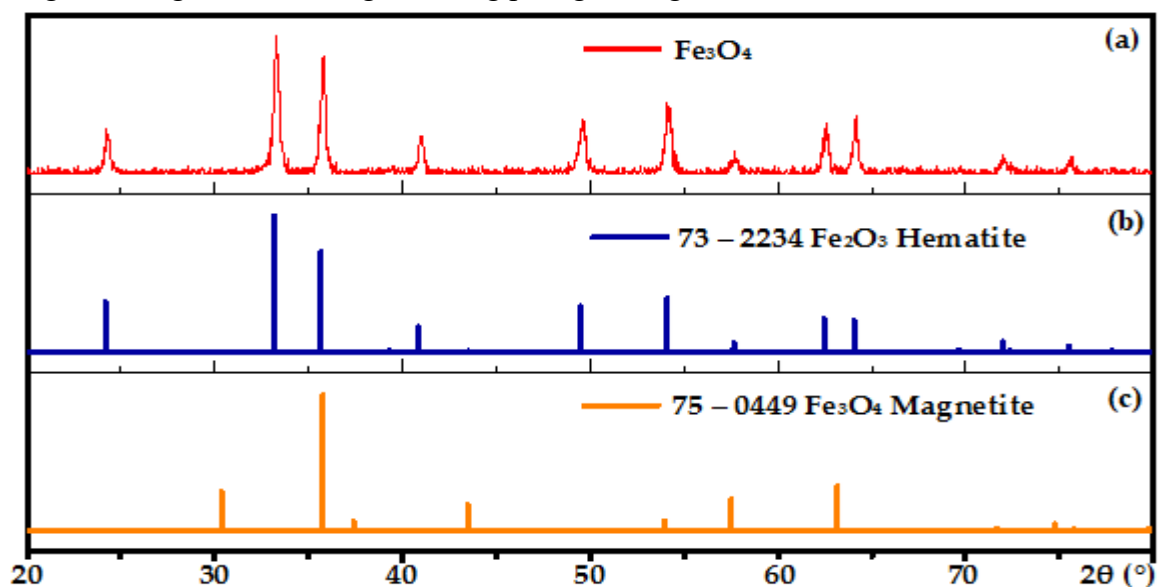
3. Kết quả và thảo luận

Theo các nghiên cứu (Bui et al, 2019; Lixia et al., 2012), các hạt nano FeFe_2O_4 dễ dàng hình thành ngay khi cho dung dịch NaOH vào dung dịch chứa hỗn hợp các ion Fe^{2+} và Fe^{3+} theo phương trình hoá học (1). Điều này có thể là do sự kết hợp giữa các cation (Fe^{2+} và Fe^{3+}) của cùng một nguyên tố là Fe để tạo thành cấu trúc spinel Fe_3O_4 là thuận lợi về mặt nhiệt động.

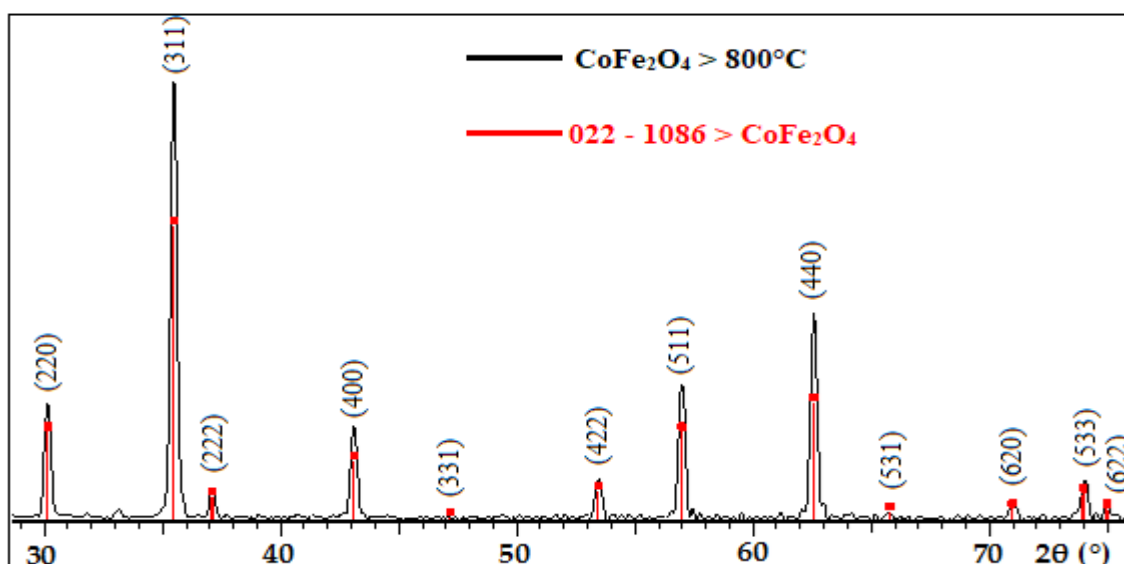


Thật vậy, giản đồ PXRD của mẫu bột khô nghiền mịn thể hiện trên Hình 1 cho thấy các pic nhiễu xạ thu được đều trùng với vị trí các pic của chất chuẩn FeFe_2O_4 (PDF > 75-0449: Fe_3O_4 Magnetite). Không xuất hiện các pic của bất kì pha tinh thể tạp chất nào khác như Fe_2O_3 hay FeO. Hình 1a cũng cho thấy các pic đều có cường độ cao, đường nền phẳng mịn, chứng tỏ các hạt nano Fe_3O_4 tổng hợp được có độ tinh thể hoá cao.

Giản đồ PXRD của mẫu kết tủa khô tổng hợp các hạt nano spinel cobalt ferrite (CoFe_2O_4) nung ở 800°C trong 1 giờ được trình bày trên Hình 2. Điều kiện nung (800°C trong 1 giờ) được lựa chọn dựa vào các nghiên cứu (Ngo et al., 2018; Hoang, et al., 2022). Kết quả cho thấy đã thu được đơn pha tinh thể spinel CoFe_2O_4 với các pic được đặc trưng bởi các bộ chỉ số Miller (hkl) như trên Hình 2. Các pic nhiễu xạ của mẫu vật liệu nano CoFe_2O_4 đều trùng với vị trí các pic của chất chuẩn CoFe_2O_4 (PDF > 022-1086: Cobalt Iron Oxide). Tương tự như mẫu vật liệu FeFe_2O_4 , các pic nhiễu xạ của mẫu vật liệu CoFe_2O_4 cũng có cường độ cao, đường nền bằng phẳng, chứng tỏ mức độ tinh thể hoá tốt.

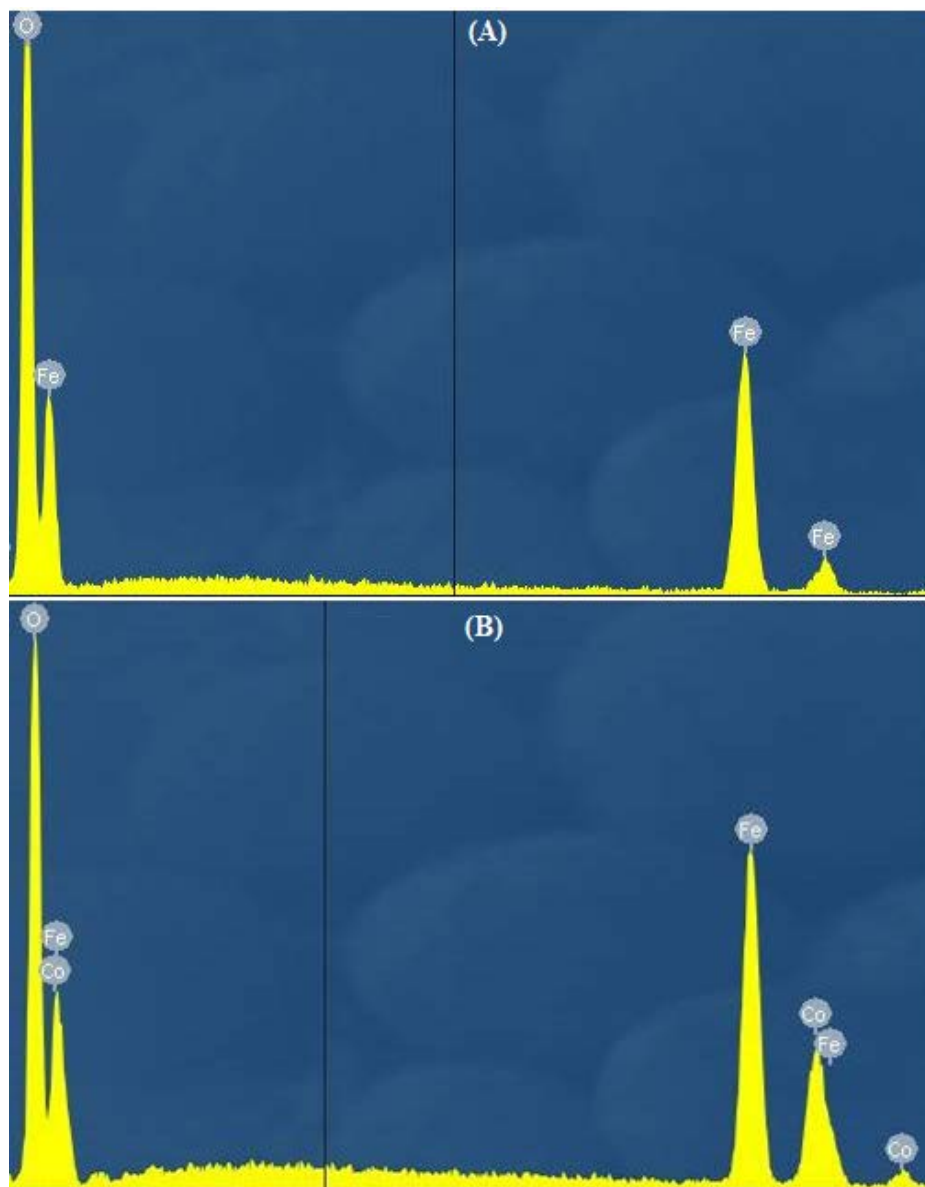


Hình 1. Giản đồ PXRD của mẫu vật liệu nano spinel FeFe_2O_4 ở nhiệt độ phòng (a), của chất chuẩn Fe_2O_3 (b) và Fe_3O_4 (c)



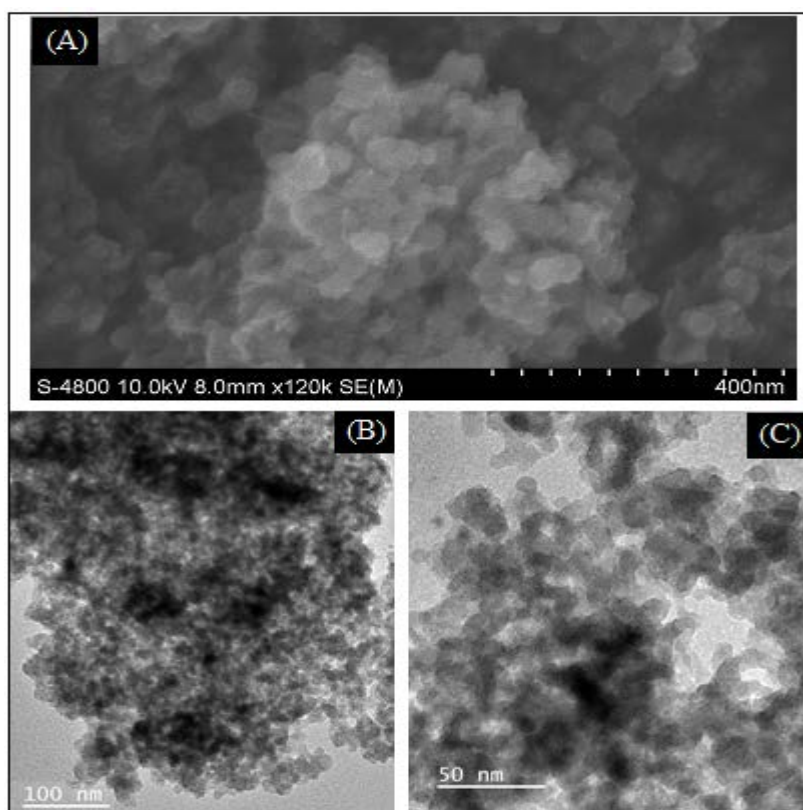
Hình 2. Giản đồ PXRD của mẫu vật liệu nano spinel CoFe_2O_4 nung ở 800°C trong 1 giờ đã ghép với PDF của chất chuẩn CoFe_2O_4

Phân tích hai mẫu vật liệu bằng phương pháp phổ tán sắc năng lượng tia X (EDX) cho thấy chỉ xuất hiện các pic ứng với các nguyên tố Co, Fe và O; không xuất hiện pic của nguyên tố tạp chất (Hình 3). Phần trăm khối lượng và phần trăm nguyên tử trong mỗi mẫu gần giống với tỉ lệ hợp thức dự kiến ban đầu, công thức thực nghiệm tính được tương ứng là $\text{Fe}_3\text{O}_{4.13}$ và $\text{CoFe}_{2.03}\text{O}_{4.21}$.



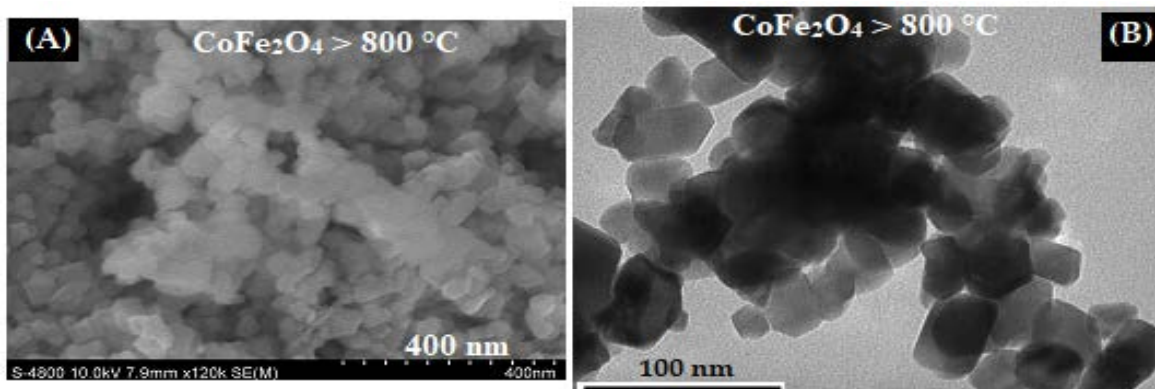
Hình 3. Phổ EDX của mẫu vật liệu nano spinel FeFe_2O_4 (A) và spinel CoFe_2O_4 (B)

Nghiên cứu ảnh SEM và TEM cho thấy các hạt FeFe_2O_4 tổng hợp được có hình thái và kích thước tương đối đồng nhất, chủ yếu là các hạt hình cầu với đường kính hạt dao động trong khoảng 5-10 nm (Hình 4). Kích thước này là nhỏ hơn nhiều so với các hạt nano FeFe_2O_4 tổng hợp bằng phương pháp thủy nhiệt (40-400 nm) (Lixia et al., 2012) và nhiệt dung môi (32-100 nm) (Bui et al., 2019).



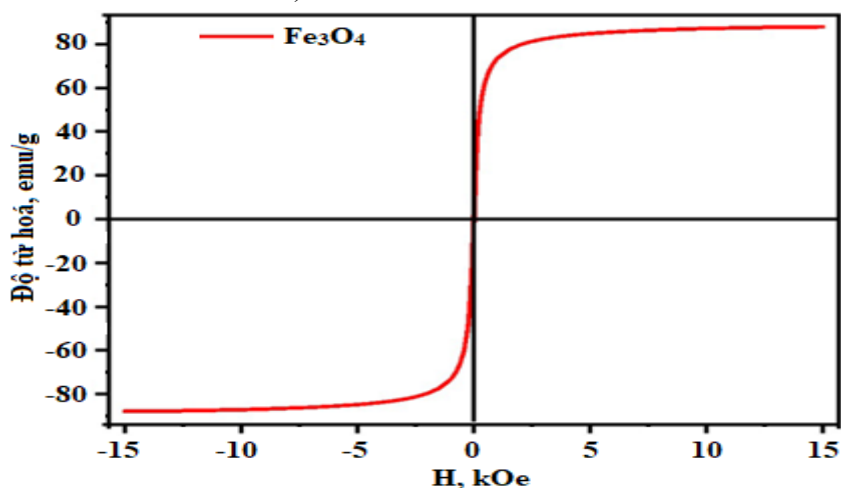
Hình 4. Ảnh SEM (A) và TEM (B, C) của mẫu vật liệu nano spinel $FeFe_2O_4$

Trong khi đó, mẫu vật liệu nano spinel $CoFe_2O_4$ nung ở $800^\circ C$ trong 1 giờ có cấu tạo gồm các hạt hình khối lập phương với kích thước trong khoảng 20-30 nm (Hình 5), hơi nhỏ hơn so với các hạt nano $CoFe_2O_4$ tổng hợp bằng phương pháp thủy nhiệt (Lixia et al., 2012), nhưng nhỏ hơn nhiều so với các hạt nano $CoFe_2O_4$ tổng hợp bằng phương pháp sol-gel (100-250 nm) (Ngo et al., 2019). Sự khác nhau về kích thước các hạt nano MFe_2O_4 trong nghiên cứu này so với các công trình đã công bố rất có thể sẽ ảnh hưởng đến các đặc trưng từ tính của chúng (Duong et al., 2011). Hình 4 và 5 cũng cho thấy các hạt nano MFe_2O_4 tổng hợp được có sự kết đám tạo thành các lớp hạt nano xếp chồng lên nhau, điều này có thể là do chúng có từ tính mạnh nên hút nhau.



Hình 5. Ảnh SEM (A) và TEM (B) của mẫu vật liệu nano spinel $CoFe_2O_4$

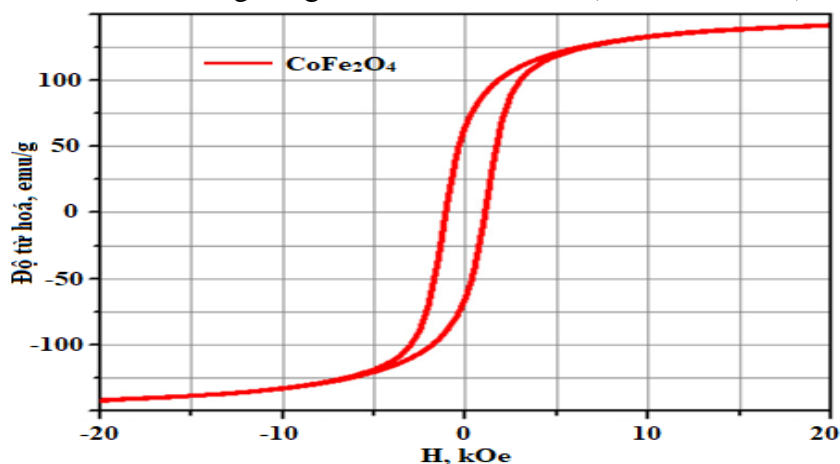
Hình 6 và 7 thể hiện đường cong từ hoá của các hệ hạt nano spinel FeFe_2O_4 (Hình 6) và CoFe_2O_4 (Hình 7) đo ở nhiệt độ phòng (300 K). Kết quả cho thấy hệ hạt nano spinel FeFe_2O_4 tổng hợp được trong nghiên cứu này có độ từ hoá bão hoà $M_s = 85,75 \text{ emu/g}$, lớn hơn rất nhiều so với các hệ hạt nano FeFe_2O_4 tổng hợp bằng phương pháp thuỷ nhiệt (Lixia et al., 2012) hay phương pháp đồng kết tủa và nhiệt dung môi (Bui et al., 2019) (Bảng 1). Điều này được cho là kích thước các hạt nano FeFe_2O_4 tổng hợp được trong nghiên cứu này là rất bé (xem ảnh TEM trên Hình 4), do đó thể hiện tính chất của vật liệu siêu thuận từ.



Hình 6. Đường cong từ hoá của mẫu vật liệu nano spinel FeFe_2O_4

Tương tự, đối với hệ hạt nano spinel cobalt ferrite (CoFe_2O_4) cả ba giá trị đặc trưng từ tính đo ở từ trường cực đại $H = \pm 20 \text{ kOe}$ đều rất lớn ($M_s = 140,73 \text{ emu/g}$; $M_r = 63,58 \text{ emu/g}$ và $H_c = 1092,17 \text{ Oe}$) (Bảng 1). Chúng thể hiện tính chất của vật liệu từ cứng ở nhiệt độ phòng.

Điểm thú vị đối với cả hai hệ hạt nano spinel MFe_2O_4 ($M = \text{Fe, Co}$) tổng hợp được trong nghiên cứu này là chúng đều bị hút mạnh bởi nam châm đất hiếm. Điều này mở ra tiềm năng ứng dụng hệ vật liệu nano spinel tổng hợp được trong nghiên cứu hấp phụ các ion gây ô nhiễm và thu hồi nhánh chóng bằng nam châm đất hiếm (Bui et al., 2021).



Hình 7. Đường cong từ hoá của mẫu vật liệu nano spinel CoFe_2O_4

Bảng 1. Các đặc trưng từ tính ở 300 K của các hệ hạt nano MFe_2O_4 ($M = Fe, Co$)

Vật liệu	$M_r, \text{emu}\cdot\text{g}^{-1}$	H_c, Oe	$M_s, \text{emu}\cdot\text{g}^{-1}$
$FeFe_2O_4$	6,85	22,18	85,75
$CoFe_2O_4$	63,58	1092,17	140,73
$CoFe_2O_4$ (Ngo et al., 2018)	15,51÷23,24	495,72÷979,20	32,67÷67,37
$FeFe_2O_4$ (Lixia et al., 2012)	11,9÷13,9	104,6÷124,7	64,8÷90,8
$CoFe_2O_4$ (Lixia et al., 2012)	9,40	162,30	86,10
$FeFe_2O_4$ (Bui et al., 2019)	-	10-42	60,02
$FeFe_2O_4$ (Duong, et al., 2011)	-	-	57 emu/g

4. Kết luận

Trong công trình này, đã tổng hợp thành công các hệ vật liệu nano spinel ferrite MFe_2O_4 ($M = Fe, Co$) bằng phương pháp đồng kết tủa đơn gian thông qua sự thủy phân các cation trong nước nóng trước, sau đó để nguội rồi thêm vào tác nhân kết tủa là dung dịch NaOH 5%. Mẫu vật liệu nano đơn pha spinel $FeFe_2O_4$ hình thành ngay ở nhiệt độ phòng, còn mẫu đơn pha spinel $CoFe_2O_4$ thu được sau khi nung kết tủa khô ở 800°C trong 1 giờ. Các hạt nano $FeFe_2O_4$ tổng hợp được có dạng hình cầu với kích thước hạt khoảng 5-10 nm, là vật liệu siêu thuận từ với độ từ bão hòa lớn ($M_s = 85,7 \text{ emu/g}$). Còn mẫu vật liệu nano spinel $CoFe_2O_4$ có cấu tạo gồm các khối hạt hình lập phương với kích thước khoảng 20-30 nm, thể hiện tính chất của vật liệu từ cứng với lực kháng từ và độ từ dư lớn.

- ❖ **Tuyên bố về quyền lợi:** Các tác giả xác nhận hoàn toàn không có xung đột về quyền lợi.
- ❖ **Lời cảm ơn:** Nghiên cứu này được tài trợ bởi Nguồn ngân sách khoa học và công nghệ Trường Đại học Sư phạm Thành phố Hồ Chí Minh trong đề tài mã số mã số: CS.2021.19.26.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- Bui, T. T., Pham, H. V., & Tran, H. H. (2019). Synthesis of magnetite nanoparticles with different sizes for application in DNA extraction from biological sample. *Science and Technology Development Journal – Natural Sciences*. <https://doi.org/10.32508/stdjns.v3i1.726>
- Dang, T. H., Bui, T. H., Ngo, T. M. T., Nguyen, A. T., Nguyen, V. L., Le, H. P., & Bui, X. V. (2021). Isothermal models of chromium (VI) adsorption by using Fe_3O_4 nanoparticles. *Metallurgical and Materials Engineering, Assosiation of Metaalurgical Engineering of Serbia AMES*. <https://doi.org/10.30544/489>
- Duong, H. D., Lam, V. N., Le, M. T., & Tran H. H. (2011). The synthesis of superparamagnetic nanoparticles Fe_3O_4 . *Journal of Science, Can Tho University*, 54(5), 52-58.

- Hoang, B. K., Mittova, V. O., Nguyen, A. T., & Pham, T. H. D. (2022). Structural and magnetic properties of Ho-doped CuFe_2O_4 nanoparticles prepared by a simple co-precipitation method. *Kondensirobannye Sredy Mezhfaznye Granitsy*. <https://doi.org/10.17308/kcmf.2022.24/9061>
- Lixia, W., Jianchen, L., Yingqi, W., Lijun, Zh., & Qing, J. (2012). Adsorption capability for Congo red on nanocrystalline MFe_2O_4 ($\text{M} = \text{Mn, Fe, Co, Ni}$) spinel ferrites. *Chemical Engineering Journal*. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2011.10.088>
- Maaz, K., Mumtaz, A., Hasanain, S. K., & Ceylan, A. (2007). Synthesis and magnetic properties of cobalt ferrite (CoFe_2O_4) nanoparticles prepared by wet chemical route. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2006.003>
- Ngo, H. T. P., & Le, T. K. (2018). Polyethylene glycol-assisted sol-gel synthesis of magnetic CoFe_2O_4 powder as photo-fenton catalysts in the presence of oxalic acid. *Journal of Sol-Gel Science and Technology*. <https://doi.org/10.1007/s10971-018-4783-y>
- Nguyen, T. T. L., Nguyen, D. M. K., Nguyen, A. T., & Kwangsoo, No. (2021). The synthesis of zinc ferrite spinel: Determination of pH value in the co-precipitation step. *Ceramics International*. <https://doi.org/10.1016/J.ceramint.2021.10.199>
- Nguyen, A. T., Truong, C. H., & Bui, X. V. (2021). Synthesis of holmium orthoferrite nanoparticles by the co-precipitation method at high temperature. *Metallurgical and Materials Engineering, Association of Metallurgical Engineering of Serbia AMES*. <https://doi.org/10.30544/489>
- Nguyen, A. T., Phan, P. H. N., Mittova, I. Ya., Knurova, M. V., & Mittova, V. O. (2016). The characterization of nanosized ZnFe_2O_4 material prepared by coprecipitation. *Nanosystems: Physics, Chemistry, Mathematics*. <https://doi.org/10.17586/2220-8054-2016-7-3-459-463>
- Nguyen, A. T., & Nguyen, T. D. (2016). Synthesis of nanosized magnetic NiFe_2O_4 material by a co-precipitation method. *Science and technology development journal*, 19(4), 137-143.
- Rachidi, L., Omar, M., Salmani, E., Mohammed, H., Abdelilah, B., & Hamid, E. Z. (2019). Size effect of the magnetic properties of CoFe_2O_4 nanoparticles: a monte carlo study. *Ceramics International*. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2019.12.035>
- Zi, Z., Sun, Y., Zhu, X., Yang, Z., Dai, J., & Song, W. (2009). Synthesis and magnetic properties of CoFe_2O_4 ferrite nanoparticles. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2008.11.004>

**MAGNETIC PROPERTIES OF SPINEL FERRITE MFe_2O_4 ($M = Fe, Co$)
NANOMATERIALS SYNTHESIZED BY CO-PRECIPIATION METHOD**

Truong Chi Hien, Nguyen Ngoc Thu Ngan,

*Nguyen Chau Chi Lap, Nguyen Minh Khanh, Tran Thi To Nga**

Ho Chi Minh City University of Education, Vietnam

**Corresponding author: Tran Thi To Nga – Email: tienna@hcmue.edu.vn*

Received: May 06, 2022; Revised: June 13, 2022; Accepted: June 30, 2022

ABSTRACT

In this study, spinel ferrite MFe_2O_4 ($M = Fe, Co$) nanoparticles were successfully synthesized by a simple co-precipitation method with 5% NaOH solution as the precipitating agent. The single-phase spinel $FeFe_2O_4$ nanoparticles were formed at room temperature, while $CoFe_2O_4$ nanoparticles were obtained after annealing the corresponding precursor at $800^\circ C$ for one hour. Transmission electron microscopy (TEM) images show that the $FeFe_2O_4$ nanoparticles have a spherical shape with a particle size of 5–10 nm, while the $CoFe_2O_4$ nanoparticles have a cubic shape with a particle size of 20–30 nm. The synthesized $FeFe_2O_4$ nanomaterial had superparamagnetic properties with very high saturation magnetization ($M_s = 85.7$ emu/g) while the $CoFe_2O_4$ nanomaterial exhibited the properties of hard magnetic material with high remanent magnetization and coercivity ($M_r = 63.58$ emu/g, $H_c = 1092.17$ Oe). Both two spinel ferrite MFe_2O_4 nanomaterials were strongly attracted by rare earth magnets.

Keywords: $FeFe_2O_4$; $CoFe_2O_4$; co-precipitation method; nanomaterial; magnetic properties