TRƯỜNG ĐẠI HỌC SÀI GÒN
TẠP CHÍ KHOA HỌC
ĐẠI HỌC SÀI GÒN
ISSN 1859 - 3208
Số 85 (02/2023)

SAIGON UNIVERSITY
SCIENTIFIC JOURNAL
OF SAIGON UNIVERSITY
No. 85 (02/2023)

Email: tcdhsg@sgu.edu.vn ; Website: http://sj.sgu.edu.vn/

ĐIỀU CHẾ $CoFe_2O_4$ BẰNG PHƯƠNG PHÁP SOL-GEL CÓ POLYETHYLEN GLYCOL HỖ TRỢ

Synthesis of $CoFe_2O_4$ by polyethylen glycol-assisted sol-gel method

Hoàng Ngô Tương Phúc[(1)*], Bùi Mạnh Hà[(2)]

[(1)]Trường Đại học An Giang – ĐHQG TP.HCM

[(2)]Trường Đại học Sài Gòn

TÓM TẮT

Nghiên cứu này tổng hợp vật liệu $CoFe_2O_4$ bằng phương pháp sol-gel có polyethylene glycol hỗ trợ. $CoFe_2O_4$ được tổng hợp gồm hai bước: điều chế precursor của citrate kim loại và quá trình phân hủy nhiệt precursor để thu được oxide kim loại. Thành phần của vật liệu $CoFe_2O_4$ được xác định bằng các phương pháp XRD (nhiễu xạ tia X), SEM (kính hiển vi điện tử quét), BET (diện tích bề mặt riêng). Vật liệu tổng hợp được có mức độ tinh thể hóa cao, kích thước hạt đồng đều, từ tính tốt, hàm lượng phủ tốt và ít tạp chất. $CoFe_2O_4$ gần đây được đánh giá là vật liệu xúc tác có tính hiệu quả và thu hồi cao song giá thành điều chế khá cao so với những xúc tác khác, polyethylene glycol là hợp chất phổ biến, giá thành rẻ lại tạo ra năng lượng tốt và đồng nhất.

Từ khóa: *bột từ tính, $CoFe_2O_4$, phương pháp sol-gel, Polyethylen glycol, xúc tác Photo-Fenton*

ABSTRACT

This study investigates the synthesis of $CoFe_2O_4$ materials by sol-gel method supported by polyethylene glycol. $CoFe_2O_4$ is synthesized in two steps: preparation of precursor of metal citrate and thermal decomposition of precursor to obtain metal oxide. The composition of $CoFe_2O_4$ materials was determined by XRD (X-ray diffraction), SEM (scanning electron microscope), and BET (specific surface area) methods. The synthesized material has a high degree of crystallinity, uniform particle size, good magnetism, good coating content and few impurities.

$CoFe_2O_4$ has recently been evaluated as a catalyst material with high efficiency and recovery, but the preparation cost is quite high compared to other catalysts, polyethylene glycol is a common compound, low cost and produces good energy and uniform.

Keywords: *smagnetic powder, $CoFe_2O_4$, sol-gel method, Polyethylen glycol, Photo-Fenton catalysis*

1. Đặt vấn đề

Việc ứng dụng xúc tác dị thể trong xử lý môi trường là một xu hướng nhận được nhiều quan tâm gần đây do tính hiệu quả, tái sử dụng và thu hồi cao [1]. Vật liệu được tổng hợp có công thức hóa học là AB_2X_4 (X là một anion- thường là O^{2-}) thường được ứng dụng để xử lý nước thải, có từ tính và khả năng tái sử dụng cao, tiết kiệm công sức và chi phí cho người sử dụng. Trong số các xúc tác dị thể vật liệu ferit được ứng dụng khá phổ biến nhờ điều

*Tác giả liên hệ: hntphuc@agu.edu.vn

chế từ các nguồn nguyên liệu rẻ và phổ biến. Vật liệu này thường được điều chế bằng nhiều phương pháp, bao gồm đồng kết tủa [2], nhiệt rắn [3] và tiền chất polyme [4]. Tuy vậy các phương pháp này vẫn còn nhiều hạn chế do tạo ra lượng chất thải lớn, tốn nhiều nhiệt lượng và thời gian lâu. Gần đây phương pháp sol-gel có sự hỗ trợ của polyethylene glycol (PEG) được ứng dụng cho tổng hợp một số loại xúc tác [5] cho thấy ưu thế vượt trội. Chúng có những ưu điểm của phương pháp tổng hợp đơn giản, sử dụng tiền chất rẻ tiền và tạo ra năng lượng tốt và đồng nhất. Trong các phương pháp này, PEG đóng nhiều vai trò như chất hoạt động bề mặt, chất tạo phức, chất tạo keo, tạo khuôn mẫu và nhiên liệu cho quá trình đốt cháy. Trong các vật liệu Ferrit thì $CoFe_2O_4$ có cấu trúc spinel đảo và nhận được nhiều quan tâm của các nhà khoa học do ứng dụng trong rất nhiều lĩnh vực như: lõi biến áp, đầu ghi, sợi antena, bộ nhớ, cảm biến, y sinh, v.v. [6]. Vào năm 2014, M. Houshiar và các cộng sự đã tiến hành tổng hợp $CoFe_2O_4$ bằng ba phương pháp khác nhau: phương pháp thông qua phản ứng cháy, đồng kết tủa, và kết tủa [2]. Sau đó tiến hành so sánh kích thước, cấu trúc và các tính chất từ của các mẫu thu được. Kết quả cho thấy cả ba phương pháp đều tổng hợp thành công $CoFe_2O_4$, với cấu trúc spinel đảo, nhóm không gian Fd3m. Kích thước hạt tinh thể trung bình cho sản phẩm từ phương pháp cháy là 69.5nm, đồng kết tủa là 49.5nm và kết tủa là 34.7nm.

Vào năm 2014, Wang và các cộng sự (2014)[7] đã tổng hợp thành công vật liệu $CoFe_2O_4$ bằng kỹ thuật nanocasting. Vật liệu có cấu trúc xốp, diện tích bề mặt lớn $122m^2/g$, kích thước lỗ xốp 9,2nm, phân hủy gần như hoàn toàn 10mg/L imidacloprid sau 5 giờ, hoạt tính ổn định trong 5 lần sử dụng liên tục, ít tan cả trong điều kiện acid (< 1ppm).

Mặc dầu có một số nghiên cứu đã tổng hợp $CoFe_2O_4$ việc điều chế xúc tác này bằng phương pháp thủy nhiệt có sự hỗ trợ của PEG chưa được tìm thấy. Nghiên cứu này tiến hành điều chế $CoFe_2O_4$ bằng phương pháp sol-gel với sự hỗ trợ của polyethylen glycol với các yếu tố nhiệt độ, tỷ lệ PEG và tiền chất kim loại đến quá trình tổng hợp. Tính chất xúc tác tạo thành được kiểm tra thông qua phân tích nhiễu xạ tia X (XRD), kính hiển vi điện tử quét (SEM) và diện tích bề mặt riêng (BET).

2. Phương pháp nghiên cứu

2.1. Hóa chất và dụng cụ

Dung dịch $Fe(NO_3)_3$, $Co(NO_3)_2$, axit nitric HNO_3, polyethylene glycol 400 (PEG-400)… đều đạt độ sạch cho phân tích (>98%, Sigma-Aldrich, Đức).

2.2. Điều chế vật liệu

Cân 23,28 g $Co(NO_3)_2.6H_2O$ và 64,64 g $Fe(NO_3)_3$. $9H_2O$ (tương ứng với tỷ lệ mol $n_{Co^{2+}}$: $n_{Fe^{3+}}$ =1:2) sau đó hòa tan trong 200 ml nước đã được acid hóa, thu được dung dịch X gồm Co^{2+} 0,4 M và Fe^{3+} 0,8 M. Cân một lượng cần thiết polyetylen glycol (PEG) tương ứng với điều kiện cần khảo sát.

Qui trình tổng hợp các mẫu xúc tác được tiến hành như sau:

Cân một lượng cần thiết polyetylen glycol (PEG) cho vào cốc 500mL, sau đó đổ tiếp dung dịch chứa 2 muối trên vào becher 500mL. Đặt becher vào bể điều nhiệt, ủ ở nhiệt độ 60^0C và khuấy liên tục trong 1 giờ bằng máy khuấy trục. Sau 1 giờ, điều chỉnh nhiệt độ lên 80^0C, đến khi nhiệt độ ổn định và khuấy tiếp trong 3 giờ. Rót hỗn hợp vào chén sứ, đem sấy ở nhiệt độ 150^0C, trong vòng 7 giờ, thu được hỗn

hợp chất rắn. Nghiền hỗn hợp chất rắn trong cối sứ, sau đó lọc, rửa và sấy 150^0C trong 1 giờ. Tiến hành đốt hỗn hợp trong 2 giờ. Sau khi đốt, chất rắn được nghiền và trộn đều cẩn thận rồi đem nung ở nhiệt độ khảo sát (600 đến 900^{o}C) dựa theo nghiên cứu của Deng và cộng sự (2013) [8]. Mẫu sau khi nung được nghiền mịn và xác định tính chất.

Bảng 1: Khối lượng các tiền chất

Mẫu có tỉ lệ mol Co^{2+} : Fe^{3+} : PEG	m(g) PEG
1:2:2	9,92
1:2:3	14.88
1:2:4	19,84
1:2:6	29,76

2.3. Phương pháp phân tích

Thành phần của vật liệu tổng hợp đươc phân tích bằng phương pháp XRD (X-ray diffraction), đo trên thiết bị BRUKER XRD-D2, ADVANCE, Đức, tại Trường Cao đẳng Hải quan, sử dụng nguồn bức xạ CuKα, (λ = 1.5406 Å) với góc quét 2θ từ 10°–80°, bước nhảy 0.020, điện áp và cường độ cài đặt tương ứng là 40kV và 40mA. Hình thái cấu trúc của vật liệu được quan sát trên kính hiển vi điện tử quét SEM (Scanning Electron Microscope) được đo bằng máy FE–SEM S4800 - Hitachi (Nhật Bản) ở 15kV, tại phòng thí nghiệm Công nghệ Nano - ĐH Quốc gia TP.HCM. Diện tích bề mặt BET (Brunauer–Emmet–Teller) được xác định bằng máy phân tích NOVA 1000e (Quantachrome Instruments), Viện Công nghệ Hóa học TP.HCM.

3. Kết quả và thảo luận

3.1. Ảnh hưởng của nhiệt độ nung

Điều chế các mẫu với tỉ lệ mol Co^{2+} : Fe^{3+} : PEG = 1:2:4; nhiệt độ nung: 600, 700, 800 và 900^{o}C trong 2 giờ. Kết quả XRD (Hình 1) cho thấy tất cả các mẫu xúc tác CoFeO-4-600, CoFeO-4-700, CoFeO-4-800 và CoFeO-4-900 đều có sự xuất hiện của những mũi nhiễu xạ tại các vị trí 18.31^o, 30.12^o, 35.57^o, 43.10^o, ứng với cấu trúc spinel lập phương tâm diện của pha $CoFe_2O_4$ (nhóm không gian Fd3m, JCPDS No.22-1086). Đồng thời, các mũi tín hiệu ở 24.15^o, 33.16^o, 40.69^o, đặc trưng cho pha hematite Fe_2O_3 (nhóm không gian R-3c, JCPDS No. 86-0550). Khi nhiệt độ nung thay đổi, mức độ tinh thể hóa và hàm lượng các pha này đều có sự thay đổi. Cụ thể, khi nhiệt độ nung tăng từ 600 đến 900^{o}C, độ nhiễu đường nền trong các giản đồ XRD đều giảm, các mũi tín hiệu trở nên đối xứng hơn, cho thấy mức độ tinh thể hóa ngày càng được gia tăng, càng thúc đẩy cho quá trình hình thành pha spinel lập phương $CoFe_2O_4$. Ngoài ra, chúng tôi cũng tiến hành phân tích định lượng các mẫu xúc tác nung ở các nhiệt độ khác nhau (Bảng 2).

Bảng 2: Kết quả định lượng thành phần pha của các mẫu CoFeO-4-600, CoFeO-4-700, CoFeO-4-800 và CoFeO-4-900

Pha	**Thành phần (%)**			
	CoFeO-4-600	CoFeO-4-700	CoFeO-4-800	CoFeO-4-900
$CoFe_2O_4$ (Fd3m)	40.75	53.01	71.12	89.91
Hematite (R-3c)	59.25	46.99	28.88-	10.09-

Từ Bảng 2, khi tăng dần nhiệt độ nung từ 600 đến 900°C thì hàm lượng pha $CoFe_2O_4$ Fd3m cũng tăng dần và hàm lượng các pha oxide giảm dần.

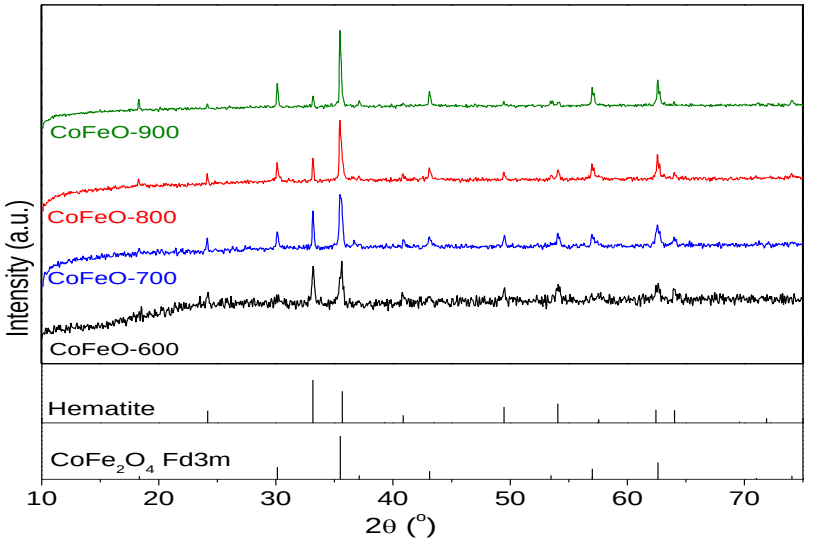
Các kết quả trên cho thấy nhiệt độ nung có ảnh hưởng đến sự hình thành pha tinh thể $CoFe_2O_4$, pha spinel được hình thành với độ tinh thể hóa cao và lẫn ít tạp chất ở các nhiệt độ nung cao là 800 và 900°C. Kích thước tinh thể tăng khi nhiệt độ nung tăng từ 600 đến 900°C, điều này có thể được giải thích bằng hiện tượng thiêu kết ở nhiệt độ cao.

Hình thái bề mặt và kích thước hạt của xúc tác được nghiên cứu thông qua phương pháp kính hiển vi điện tử quét (SEM) (Hình 2).

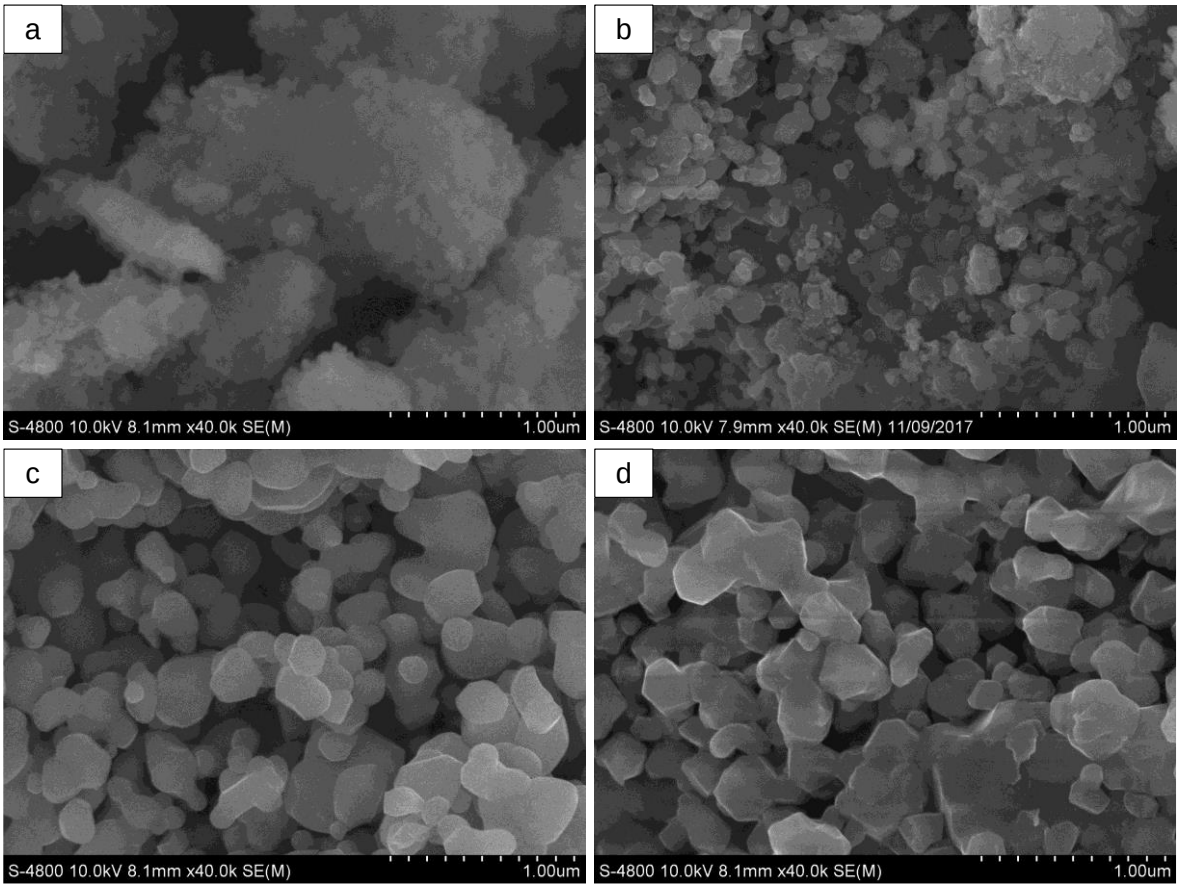
Bảng 3: Kích thước hạt của mẫu CoFeO-4-600, CoFeO-4-700, CoFeO-4-800 và CoFeO-4-900

Mẫu xúc tác	**CoFeO-4-600**	**CoFeO-4-700**	**CoFeO-4-800**	**CoFeO-4-900**
Kích thước hạt (nm)	50 - 100	70 - 150	100 - 250	200 - 300
Diện tích bề mặt riêng (m^2/g)	6.966	5.120	4.282	2.095

Từ Bảng 3, các mẫu xúc tác đều ở dạng hệ đa phân tán, có sự tụ hợp giữa các hạt đa diện với nhau. Ở nhiệt độ nung 600°C, các hạt thể hiện mức độ tụ hợp cao, với kích thước dao động từ 50 – 100nm. Khi nhiệt độ nung tăng lên 700 và 800°C, kích thước hạt cũng lần lượt tăng lên 70 – 150nm và 100 – 250nm. Nằm trong xu hướng đó, ảnh kính hiển vi của mẫu CoFeO-4-900 thể hiện các hạt lớn nhất với kích thước 200 – 300nm. Sự gia tăng kích thước hạt này có thể đến từ quá trình thiêu kết cũng như đến từ sự nóng chảy cục bộ của các hạt ở nhiệt độ cao. Bảng 3 cũng trình bày diện tích bề mặt riêng của các mẫu được xác định thông qua quá trình hấp phụ đẳng nhiệt khí N_2 với mô hình BET. Theo đó, diện tích bề mặt của các mẫu giảm dần theo nhiệt độ nung, phù hợp với sự gia tăng kích thước hạt.



Hình 1: *Giản đồ XRD của các mẫu CoFeO-4-600, CoFeO-4-700, CoFeO-4-800 và CoFeO-4-900*



Hình 2: *Ảnh FE-SEM của các mẫu CoFeO-4-600 (a), CoFeO-4-700 (b), CoFeO-4-800 (c) và CoFeO-4-900 (d)*

Kết quả này tương đồng với Deng và cộng sự (2013) [8], khi điều chế $CoFe_2O_4$ ở nhiệt độ thay đổi, tác giả thu được kết quả đồng nhất và tốt nhất ở nhiệt độ 800^0C.

3.2. Ảnh hưởng của tỉ lệ PEG

Điều chế các mẫu với tỉ lệ mol Co^{2+} : Fe^{3+} : PEG = 1:2:2; 1:2:3; 1:2:4: 1:2:6; nhiệt độ nung: 800^0C trong 2 giờ. Kết quả XRD (hình 3) cho thấy tất cả các mẫu xúc tác CoFeO-2-800, CoFeO-3-800, CoFeO-4-800 và CoFeO-6-800 đều có sự xuất hiện của những mũi nhiễu xạ tại các vị trí 18.30^o, 30.11^o, 35.46^o, 43.10^o, ứng với cấu trúc spinel lập phương tâm diện của pha $CoFe_2O_4$ (nhóm không gian Fd3m, JCPDS No.22-1086). Đồng thời, các mũi tín hiệu ở 24.15^o, 33.16^o, 40.69^o, đặc trưng cho pha hematite Fe_2O_3 (nhóm không gian R-3c, JCPDS No. 86-0550). Khi hàm lượng PEG thay đổi, hàm lượng các pha này đều có sự thay đổi. Cụ thể, khi tỷ lệ Co^{2+} : Fe^{3+} : PEG tăng từ 1:2:2 đến 1:2:6, cường độ các mũi tín hiệu tương ứng với pha $CoFe_2O_4$ đều có dấu hiệu tăng, hàm lượng PEG càng cao sẽ càng thúc đẩy cho quá trình hình thành pha spinel lập phương $CoFe_2O_4$. Ngoài ra, chúng tôi cũng tiến hành phân tích định lượng các mẫu xúc tác điều chế với các hàm lượng tiền chất khác nhau (Bảng 4).

Bảng 4: Kết quả định lượng thành phần pha của các mẫu CoFeO-2-800, CoFeO-3-800, CoFeO-800 và CoFeO-6-800

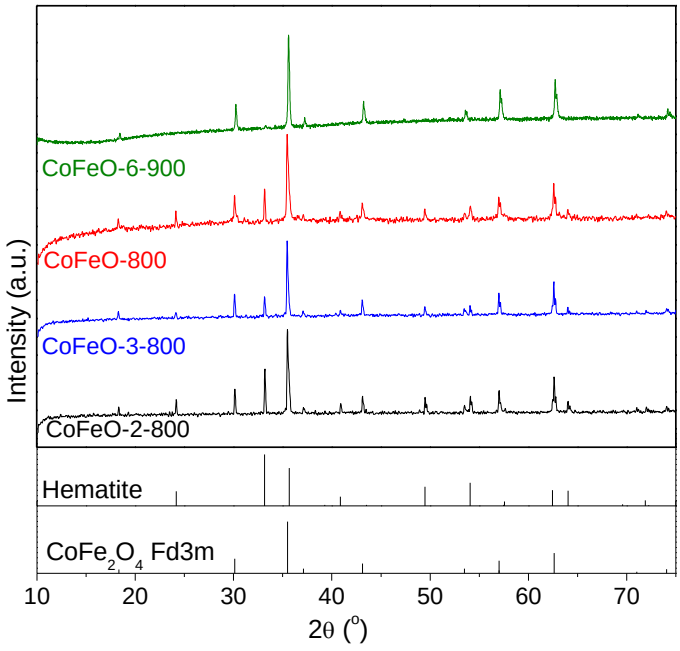
Pha	Thành phần (%)			
	CoFeO-2-800	CoFeO-3-800	CoFeO-4-800	CoFeO-6-800
$CoFe_2O_4$ (Fd3m)	57.34	73.62	71.12	95.62
Hematite (R-3c)	42.66	26.38	28.88-	4.38

Từ Bảng 4, nhận thấy rằng khi tăng dần hàm lượng PEG, hàm lượng pha $CoFe_2O_4$ Fd3m cũng tăng dần và hàm lượng các pha oxide giảm dần.

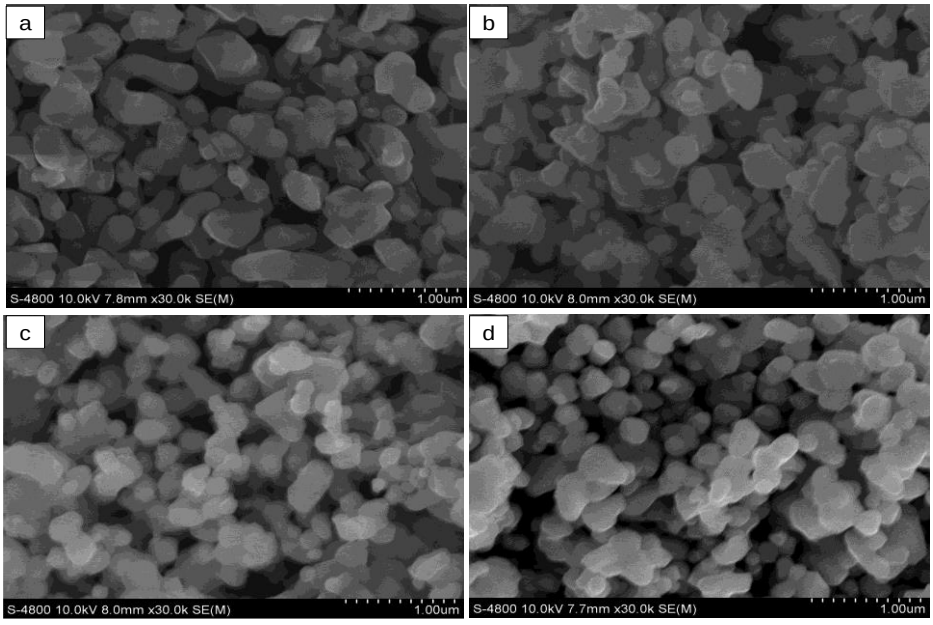
Các kết quả trên cho thấy hàm lượng PEG có ảnh hưởng đến sự hình thành pha tinh thể $CoFe_2O_4$, pha spinel được hình thành với độ tinh thể hóa cao và lẫn ít tạp chất ở hàm lượng PEG gấp 6 lần so với Co^{2+}.

Hình thái bề mặt và kích thước hạt của xúc tác được nghiên cứu thông qua phương pháp kính hiển vi điện tử quét (SEM) (Hình 4). Qua đó, ta thấy các mẫu xúc tác đều ở dạng hệ đa phân tán, có sự tụ hợp giữa các hạt đa diện với nhau. Ở hàm lượng PEG thấp, các hạt thể hiện mức độ tụ hợp cao, với kích thước dao động từ 200 – 300nm. Tuy nhiên khi hàm lượng PEG tăng lên gấp 4 lần hoặc 6 lần so với Co^{2+}, kích thước hạt có xu hướng giảm, chỉ còn 100 – 250nm.

Kết quả này tương đồng với Wu và cộng sự (2016) [5], khi điều chế $CoFe_2O_4$ có tỉ lệ mol PEG thay đổi, tác giả thu được kết quả đồng nhất và tốt nhất ở hàm lượng PEG cao, nhiệt độ nung 800^0C.



Hình 3: *Giản đồ XRD của các mẫu CoFeO-2-800, CoFeO-3-800, CoFeO-4-800 và CoFeO-6-800*



Hình 4: *Ảnh FE-SEM của các mẫu CoFeO-2-800 (a), CoFeO-3-800 (b), CoFeO-4-800 (c) và CoFeO-6-800 (d)*

3.3. Ảnh hưởng của tiền chất kim loại

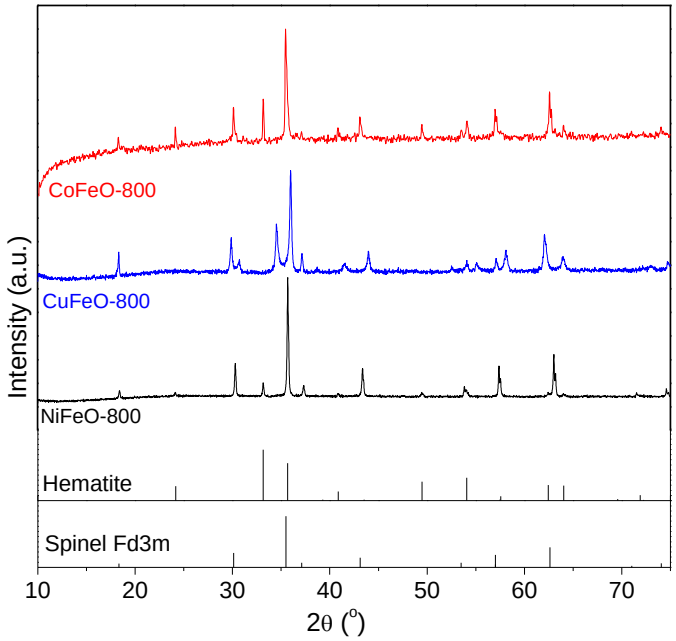
Điều chế các mẫu với tỉ lệ mol M^{2+} : Fe^{3+} : PEG = 1:2:4; thay đổi nguyên tố M: Co, Cu, Ni; nhiệt độ nung: 800^0C trong 2 giờ. Kết quả XRD (hình 5) cho thấy trong khi các mẫu xúc tác CoFeO-4-800 và NiFeO-4-800 đều có sự xuất hiện của những mũi nhiễu xạ tại các vị trí 18.30º, 30.11º, 35.46º, 43.10º, ứng với cấu trúc spinel lập phương (nhóm không gian Fd3m), mẫu CuFeO-4-800 lại thể hiện các mũi nhiễu xạ ở 34.32º, 36.00º ứng với cấu trúc spinel tứ phương (nhóm không gian I41/amd). Đồng thời, hai mẫu CoFeO-4-800 và NiFeO-800 cũng thể hiện các mũi tín hiệu ở 24.15º, 33.16º, 40.69º, đặc trưng cho pha hematite Fe_2O_3 (nhóm không gian R-3c, JCPDS No. 86-0550). Do xuất phát từ các tiền chất kim loại khác nhau, dù trong cùng điều kiện điều chế, hàm lượng các pha trong ba mẫu đều có sự khác biệt. Hàm lượng pha tạp Fe_2O_3 có khuynh hướng giảm dần khi đi từ mẫu CoFeO-4-800, NiFeO-4-800 đến mẫu CuFeO-4-800 (Bảng 5).

Bảng 5: Kết quả định lượng thành phần pha của các mẫu CoFeO-4-800, NiFeO-4-800 và CuFeO-4-800

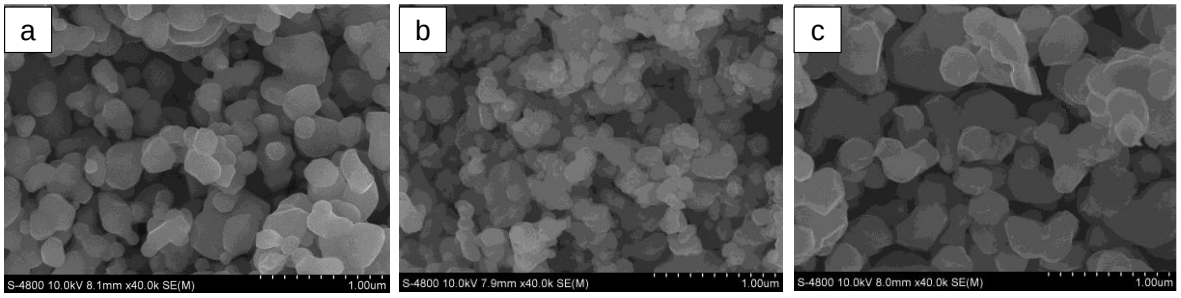
Pha	**Thành phần (%)**		
	CoFeO-4-800	NiFeO-4-800	CuFeO-4-800
Spinel Fd3m	71.12	89.09	
Spinel I41/amd			100
Hematite (R-3c)	28.88	10.91	

Từ Bảng 5, ta thấy các mẫu xúc tác đều ở dạng hệ đa phân tán, có sự tụ hợp giữa các hạt đa diện với nhau. Hai mẫu CoFeO-4-800 và CuFeO-4-800 có kích thước hạt khá tương đồng nhau trong khi mẫu NiFeO-4-800 có kích thước hạt nhỏ hơn (khoảng 100nm).

Kết quả này tương đồng với Tran và cộng sự (2016) [4], khi điều chế $CoFe_2O_4$ có sự thay đổi tiền chất kim loại, tác giả thu được hàm lượng các pha trong các mẫu đều có sự khác biệt.



Hình 5: *Giản đồ XRD của các mẫu CoFeO-4-800, NiFeO-4-800 và CuFeO-4-800*



Hình 6: *Ảnh FE-SEM của các mẫu CoFeO-4-800 (a), NiFeO-4-800 (b) và CuFeO-4-800 (c)*

4. Kết luận

Tổng hợp thành công vật liệu $CoFe_2O_4$ bằng phương pháp sol-gel với sự hỗ trợ của PEG ; nhiệt độ nung tăng đến 800°C, hàm lượng pha spinel $CoFe_2O_4$ tăng, đồng thời hàm lượng các ion Fe^{3+} trên bề mặt cũng tăng. Đối với yếu tố tỷ lệ các tiền chất, hàm lượng PEG càng tăng cũng đồng biến với sự gia tăng hàm lượng pha spinel và hàm lượng Fe^{3+} trên bề mặt vật liệu. Khi thay đổi tiền chất kim loại, CoFeO-4-800 vẫn luôn là mẫu tối ưu, cho thấy ion M^{2+} trong pha spinel vẫn có một vai trò quan trọng

trong việc điều chế vật liệu. $CoFe_2O_4$ điều chế bằng phương pháp sol-gel đáp ứng đầy đủ tính chất so với các phương pháp điều chế kinh điển và có tiềm năng ứng dụng tốt khi làm xúc tác trong các phản ứng xử lý môi trường.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] K. Rusevova, F. D. Kopinke, A.Georgi, "Nano-sized magnetic iron oxides as catalysts for heterogeneous Fenton-like reactions - Influence of Fe(II)/Fe(III) ratio on catalytic performance", *Materials*, 241(30), 433– 440, 2012.

[2] M. Houshiar, F. Zebhi, Z.J. Razi, A. Alidoust, Z. Askari, "Synthesis of cobalt ferrite ($CoFe_2O_4$) nanoparticles using combustion, coprecipitation, and precipitation methods: A comparison study of size, structural, and magnetic properties", *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 371, 43 – 48, 2014.

[3] H. L. Yuan, Y. Q. Wang, S. M. Zhou, L. S. Liu, X. L. Chen, S. Y. Lou, R. J. Yuan, Y. M. Hao, N. Li, "Low-temperature preparation of superparamagnetic CoFe2O4 microspheres with high saturation magnetization", *Nanoscale Res Lett,* 5, 1817–1821, 2010.

[4] D. H. Tran, L. T. Khoa, "Precursor chain length dependence of polymeric precursor method for the preparation of mangnetic Fenton-like $CuFe_2O_4$-based catalyst", *Journal of Sol-Gel Science and Technology,* 80, pp. 160 –167, 2016.

[5] X. Wu, W. Wang, F. Li, S. Khaimanov, N. Tsidaeva, M. Lahoubi, "PEG-assisted hydrothermal synthesis of $CoFe_2O_4$ nano- particles with enhanced selective adsorption properties for different dyes", *Applied Surface Science,* 389, pp. 1003 – 1011, 2016.

[6] D. S. Mathew, R. S. Juang, "An overview of the structure and magnetism of spinel ferrite nanoparticles and their synthesis in microemulsions", *Chemical Engineering Journal*, 129, 51 – 65, 2007.

[7] Y. Wang, H. Zhao, M. Li, J. Fan, G. Zhao, "Magnetic ordered mesoporous copper ferrite as a heterogeneousFenton catalyst for the degradation of imidacloprid", *Applied Catalysis B: Environmental,* 147, 534 – 545, 2014.

[8] J. Deng, Y. Shao, N. Gao, C. Tan, S. Zhou, X. Hu, "$CoFe_2O_4$ magnetic nanoparticles as a highly active heterogeneous catalyst of oxone for the degradation of diclofenac in water", *Journal of Hazardous Materials,* 262, 836 – 844, 2013.

Ngày nhận bài: 04/04/2022 Biên tập xong: 14/11/2022 Duyệt đăng: 14/12/2022