

EFFECT OF SIZE ON MAGNETIC AND OPTICAL PROPERTIES OF Fe₃O₄ NANOPARTICLES

Luu Huu Nguyen^{1,2}, Nguyen Thi Ngoc Anh³, Nguyen Thanh Huong³,
Do Khanh Tung³, Pham Quang Ngan³, Pham Hong Nam^{3*}

¹Science and Technology Advanced Institute - Van Lang University, ²School of Technology - Van Lang University

³Institute of Materials Science - Vietnam Academy of Science and Technology

| ARTICLE INFO | | ABSTRACT |
|--|------------|---|
| Received: | 24/12/2022 | In this paper, the influence of nanoparticle size on magnetic properties (saturation magnetization M_s , effective magnetic anisotropy K_{eff}) and optical properties (energy band gap E_g) were investigated. Magnetic nanoparticles Fe ₃ O ₄ (FO) were synthesized by co-precipitation with different reaction temperatures of 50°C, 60°C, 70°C, and 80°C. They had sizes of 8.7 nm, 10.1 nm, 10.4 nm, and 11.9 nm, respectively. While the value of saturation magnetization M_s increased from 51.65 emu/g to 64.56 emu/g, their magnetic anisotropy value decreased from 18.26 kJ/m ³ to 12.49 kJ/m ³ when the value of diameter of magnetic nanoparticles Fe ₃ O ₄ changed from 8.7 nm to 11.9 nm. In addition, the changing of the energy band gap E_g from 2.23 eV (~ 11.9 nm) to 2.75 eV (~ 8.7 nm) indicated the effect of nanoparticle size on optical properties for magnetic nanoparticles FO. The nanoparticle size is an important factor affecting the magnetic and optical properties of FO magnetic nanoparticles. |
| Revised: | 08/02/2023 | |
| Published: | 08/02/2023 | |
| KEYWORDS | | |
| Fe ₃ O ₄ nanoparticles | | |
| Co-precipitation | | |
| Nanoparticle size | | |
| Magnetic properties | | |
| Optical properties | | |

ẢNH HƯỞNG CỦA KÍCH THƯỚC HẠT LÊN TÍNH CHẤT TỪ VÀ QUANG CỦA HỆ HẠT NANO Fe₃O₄

Luu Hữu Nguyễn^{1,2}, Nguyễn Thị Ngọc Anh³, Nguyễn Thanh Hương³,
Đỗ Khánh Tùng³, Phạm Quang Ngan³, Phạm Hồng Nam^{3*}

¹Viện Tiên tiến Khoa học và Công nghệ - Trường Đại học Văn Lang

²Trường Công nghệ Văn Lang - Trường Đại học Văn Lang

³Viện Khoa học vật liệu - Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam

| THÔNG TIN BÀI BÁO | | TÓM TẮT |
|---|------------|---|
| Ngày nhận bài: | 24/12/2022 | Trong bài báo này, ảnh hưởng của kích thước hạt lên tính chất từ (từ độ M_s , dị hướng từ hiệu dụng K_{eff}) và tính chất quang (độ rộng vùng cấm) của các hạt nano từ Fe ₃ O ₄ (FO) được khảo sát. Các hạt FO được tổng hợp bằng phương pháp đồng kết tủa với các nhiệt độ phản ứng khác nhau 50°C, 60°C, 70°C và 80°C, và kích thước tương ứng lần lượt là 8,7 nm, 10,1 nm, 10,4 nm và 11,9 nm. Trong khi từ độ M_s của hạt FO tăng từ 51,65 emu/g xuống 64,56 emu/g thì giá trị dị hướng từ của chúng giảm từ 18,26 kJ/m ³ đến 12,49 kJ/m ³ theo chiều tăng của kích thước hạt từ 8,7 nm đến 11,9 nm. Bên cạnh đó, sự thay đổi độ rộng vùng cấm từ 2,23 eV (~ 11,9 nm) đến 2,75 eV (~ 8,7 nm) thể hiện ảnh hưởng của kích thước lên tính chất quang của mẫu FO. Kích thước hạt là yếu tố quan trọng ảnh hưởng đến tính chất từ và tính chất quang của các hạt nano từ FO. |
| Ngày hoàn thiện: | 08/02/2023 | |
| Ngày đăng: | 08/02/2023 | |
| TỪ KHÓA | | |
| Hạt nano Fe ₃ O ₄ | | |
| Đồng kết tủa | | |
| Kích thước hạt | | |
| Tính chất từ | | |
| Tính chất quang | | |

DOI: <https://doi.org/10.34238/tnu-jst.7162>

* Corresponding author. Email: namph.ims@gmail.com

1. Giới thiệu

Hạt nano từ ferit spinel đã và đang được giới khoa học đặc biệt quan tâm nghiên cứu trong nhiều lĩnh vực như xử lý môi trường, cảm biến hoặc y sinh như phân phối thuốc, làm tác nhân tương phản trong chụp cộng hưởng từ hoặc nhiệt từ trị ung thư [1] – [3]. Trong các hạt nano từ ferit spinel, hạt nano từ Fe_3O_4 (FO) được đặc biệt quan tâm do những đặc tính hấp dẫn như moment từ mạnh, nhiệt độ Curie thấp, tính tương thích sinh học cao, độ ổn định tốt dưới dạng chất lỏng từ [1]. Đối với khả năng ứng dụng rộng rãi của các hạt nano từ FO, việc kiểm soát kích thước hạt là rất quan trọng đối với tính chất từ, tính chất quang cũng như khả năng ứng dụng của chúng [4] – [8].

Đến nay, sự phụ thuộc vào kích thước hạt của một số tính chất vật lý như từ độ bão hòa, độ rộng vùng cấm của hạt FO đã được khảo sát trong nhiều công bố trước đây. Sự phụ thuộc tính chất vật lý của các hạt nano từ FO vào kích thước hạt có ảnh hưởng rất lớn đến khả năng ứng dụng của FO trong nhiều lĩnh vực. Ví dụ, trong lĩnh vực nhiệt từ trị ung thư, công trình nghiên cứu của nhóm tác giả A. E. Deatsch và cộng sự cho thấy hạt nano từ FO có khả năng sinh nhiệt tối ưu ứng với kích thước 19 nm [4]. Bên cạnh đó, một số nghiên cứu cho thấy các hạt nano từ FO có kích thước nhỏ hơn 20 nm thể hiện trạng thái siêu thuận từ, có khả năng phản ứng mạnh hơn, nhanh hơn với từ trường ngoài giúp nâng cao khả năng ứng dụng của chúng trong lĩnh vực nhiệt từ trị [9]. Tuy nhiên, sự suy giảm từ độ bão hòa (M_S) của FO khi kích thước hạt giảm được công bố trong các công trình của các nhóm tác giả Y.-W. Jun [10], F. Ozel [11], và Y. Dong [12], trong khi một số ứng dụng trong y sinh đòi hỏi FO có từ độ bão hòa phải đủ lớn [9]. Bên cạnh đó, giá trị kích thước tối hạn để hạt nano từ đạt hiệu năng đốt nóng cảm ứng từ tối đa thay đổi theo giá trị dị hướng từ (K) được quan sát thấy trong các công trình của nhóm tác giả A. E. Deatsch và cộng sự [4], nhóm tác giả A. H. Habib và cộng sự [13]. Do đó, sự phụ thuộc M_S hoặc dị hướng từ K vào kích thước hạt cần được làm sáng tỏ để cải thiện khả năng ứng dụng của hạt FO trong lĩnh vực nhiệt từ trị. Trong khi đó, kết quả nghiên cứu của nhóm tác giả M. E. Sadat và cộng sự cho thấy hạt nano từ FO với năng lượng vùng cấm 1,8 – 2,2 eV có khả năng ứng dụng trong quang nhiệt trị [14]. Mặt khác, sự phụ thuộc của năng lượng vùng cấm (energy band gap E_g) của hạt FO vào kích thước hạt cũng được tìm thấy trong công trình của nhóm tác giả A. Radon và cộng sự [15]. Kết quả nghiên cứu cho thấy giá trị E_g tăng từ 2,52 eV đến 3,01 eV khi kích thước tinh thể của hạt FO giảm từ 12,2 nm xuống 2,9 nm [15]. Các kết quả trên cho thấy sự phụ thuộc mạnh vào kích thước hạt của tính chất từ hay tính chất quang đối với hệ FO. Điều này ảnh hưởng đến khả năng ứng dụng của chúng trong những lĩnh vực liên quan như nhiệt từ trị [4], [13] hoặc quang nhiệt trị [14]. Do đó, đây vẫn là mối quan tâm đối với giới nghiên cứu cơ bản và ứng dụng.

Trong bài báo này, các hạt FO được tổng hợp bằng phương pháp đồng kết tủa với các nhiệt độ phản ứng khác nhau. Các hạt nano từ FO có kích thước nằm trong khoảng từ 8 – 12 nm và có giá trị từ độ nằm trong khoảng 51,65 emu/g đến 64,56 emu/g. Mối quan hệ giữa tính chất từ (từ độ, dị hướng từ) và tính chất quang (độ rộng vùng cấm) với kích thước hạt cho thấy vai trò của kích thước đến các tính chất vật lý cũng như khả năng ứng dụng của chúng. Khi kích thước hạt tăng từ 8,7 nm đến 11,9 nm thì giá trị từ độ tăng nhưng giá trị dị hướng từ giảm. Mặt khác, hạt FO với kích thước tinh thể nhỏ (~ 8 nm) có giá trị E_g (2,55 – 2,75 eV) lớn trong khi hạt FO với kích thước tinh thể lớn (~ 9 nm) có giá trị E_g nhỏ, 2,23 eV. Kết quả nghiên cứu này đóng góp những thông tin cần thiết về mối liên hệ giữa kích thước hạt với tính chất từ và tính chất quang của hạt FO.

2. Phương pháp nghiên cứu

2.1. Tổng hợp vật liệu FO

Các hệ hạt nano FO được tổng hợp bằng phương pháp đồng kết tủa. Các hóa chất được sử dụng trong quá trình tổng hợp bao gồm: FeCl_2 (độ sạch $\geq 98\%$), FeCl_3 (độ sạch $\geq 97\%$) và NH_4OH (độ sạch $\geq 98\%$) của hãng sigma-Aldrich. Quy trình tổng hợp hệ hạt nano FO được tiến hành bằng cách hòa tan 0,254 g FeCl_2 và 0,352 g FeCl_3 trong 50 ml nước cất hai lần, có sử dụng máy khuấy từ. Sau đó, hỗn hợp trên được khuấy trộn đều trên máy khuấy từ, gia nhiệt đến các

nhệt độ khác nhau là 50°C, 60°C, 70°C và 80°C. Tiếp theo, nhỏ từ từ 50 ml NH₄OH (nồng độ 2M) trong thời gian 10 phút vào dung dịch ở trên và giữ hỗn hợp này trong thời gian 1 giờ (độ pH 11 – 13), có sử dụng khuấy từ với tốc độ khuấy là 600 vòng/phút. Sau khi kết thúc phản ứng, hỗn hợp này được để nguội tự nhiên đến nhiệt độ phòng, sản phẩm được tách khỏi dung dịch và rửa sạch bằng nước cất hai lần. Cuối cùng, các hạt nano FO được thu hồi bằng nam châm. Các mẫu được tổng hợp ở các nhiệt độ khác nhau 50°C, 60°C, 70°C và 80°C được ký hiệu tương ứng là S1, S2, S3 và S4.

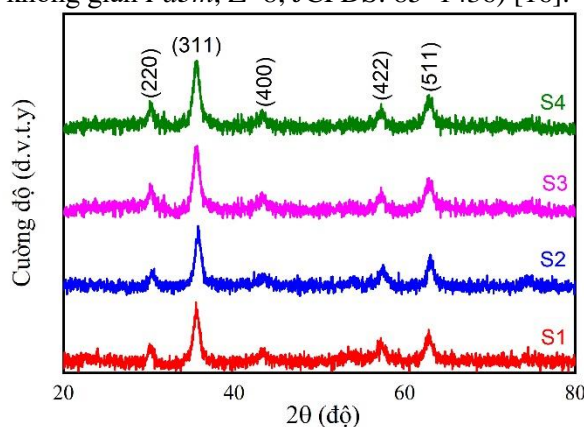
2.2. Các phương pháp đặc trưng

Các đặc trưng cấu trúc của các mẫu được khảo sát bằng cách sử dụng thiết bị nhiễu xạ tia X (XRD) (hệ nhiễu xạ tia X Bruker D8-Advance instrument), với bức xạ Cu - K α với bước sóng $\lambda = 1,5406$ Å. Kích thước hạt được đánh giá bằng kính hiển vi điện tử truyền qua (Transmission Electron Microscope – TEM, JEOL JEM-1010). Tính chất từ của các mẫu được khảo sát bằng thiết bị từ kế mẫu rung (Vibrating Sample Magnetometer, VSM) tại nhiệt độ phòng với cường độ từ trường thay đổi từ -11 kOe đến 11 kOe. Tính chất quang được khảo sát bằng quang phổ hấp thụ của các mẫu thu được trên máy quang phổ UV-Vis (Cary 5000 UV-Vis-NIR spectrophotometer) với bước sóng trong khoảng 300 – 600 nm.

3. Kết quả và bàn luận

3.1. Giảm đồ nhiễu xạ tia X

Hình 1 trình bày giảm đồ nhiễu xạ tia X của các hệ mẫu S1, S2, S3, và S4. Các đỉnh nhiễu xạ xuất hiện tại các vị trí (220), (311), (400), (422), và (511) đặc trưng cho pha ferrite chứng tỏ các hệ mẫu này đều đơn pha. Giảm đồ nhiễu xạ tia X trong Hình 1 khớp với thẻ chuẩn của mẫu Fe₃O₄ (khối lập phương, mạng không gian $Fd\bar{3}m$, Z=8; JCPDS: 85-1436) [16].



Hình 1. Giảm đồ nhiễu xạ tia X của các mẫu S1, S2, S3 và S4

Dựa trên dữ liệu của đỉnh nhiễu xạ (311), kích thước tinh thể của toàn bộ hệ mẫu được xác định bằng công thức Scherrer [16]:

$$D_{XRD} = \frac{k\lambda}{\beta \cos\theta} \quad (1)$$

trong đó, D_{XRD} là kích thước tinh thể, λ là bước sóng của nguồn phát xạ tia X được dùng, β là bề rộng vạch ở 1/2 giá trị cường độ cực đại, và θ là góc Bragg.

Các giá trị D_{XRD} được trình bày ở Bảng 1. Hình 1 cho thấy đỉnh nhiễu xạ (311) thu hẹp khi nhiệt độ phản ứng tăng, dẫn đến các hệ mẫu có độ kết tinh tốt hơn và giá trị kích thước tinh thể lớn hơn. Bảng 1 cho thấy kích thước D_{XRD} của các hệ mẫu tăng từ 7,9 nm đến 9,1 nm khi nhiệt độ phản ứng tăng từ 50°C đến 80°C. Các kết quả này phù hợp với các công trình đã được công bố của các nhóm tác giả Z. J. Zhang và cộng sự [17], nhóm tác giả J. Liang và cộng sự [18]. Với sự

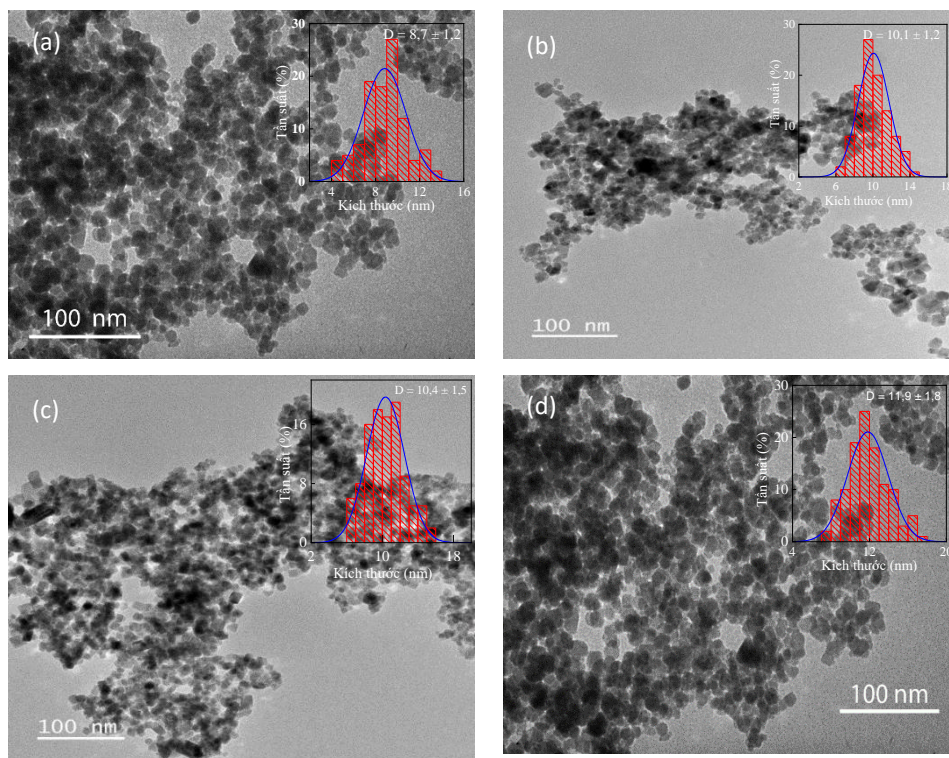
thay đổi nhiệt độ phản ứng trong quá trình tổng hợp mẫu; các hệ mẫu có kích thước khác nhau được tổng hợp nhằm khảo sát sự ảnh hưởng của kích thước hạt lên tính chất từ và tính chất quang của hệ FO.

Bảng 1. Giá trị D_{XRD} và D_{TEM} của các mẫu S1, S2, S3, và S4

| Ký hiệu mẫu | D_{XRD} (nm) | D_{TEM} (nm) |
|-------------|----------------|----------------|
| S1 | 7,9 | 8,7 |
| S2 | 8,1 | 10,1 |
| S3 | 8,2 | 10,4 |
| S4 | 9,1 | 11,9 |

3.2. Hình thái kích thước hạt

Hình 2 là ảnh TEM của các hệ mẫu S1, S2, S3 và S4. Có thể nhìn thấy trên Hình 2, kích thước hạt FO nhận được khoảng 8 - 12 nm. Giá trị kích thước D_{TEM} (Bảng 1) của các mẫu S1, S2, S3 và S4 lần lượt là 8,7 nm, 10,1 nm, 10,4 nm và 11,9 nm. Kết quả này hoàn toàn phù hợp với kết quả kích thước tinh thể D_{XRD} của các hệ mẫu ở phần 3.1.



Hình 2. Ảnh TEM và phân bố kích thước hạt của các mẫu (a) S1, (b) S2, (c) S3 và (d) S4

3.3. Tính chất từ

Đường cong từ trễ $M(H)$ của các mẫu S1, S2, S3 và S4 được đo tại nhiệt độ phòng trên thiết bị từ kế mẫu rung (VSM) (Hình 3). Hình 3 cho thấy các mẫu trên đều có giá trị lực kháng từ và từ dư bằng không nên chúng đều thể hiện trạng thái siêu thuận từ.

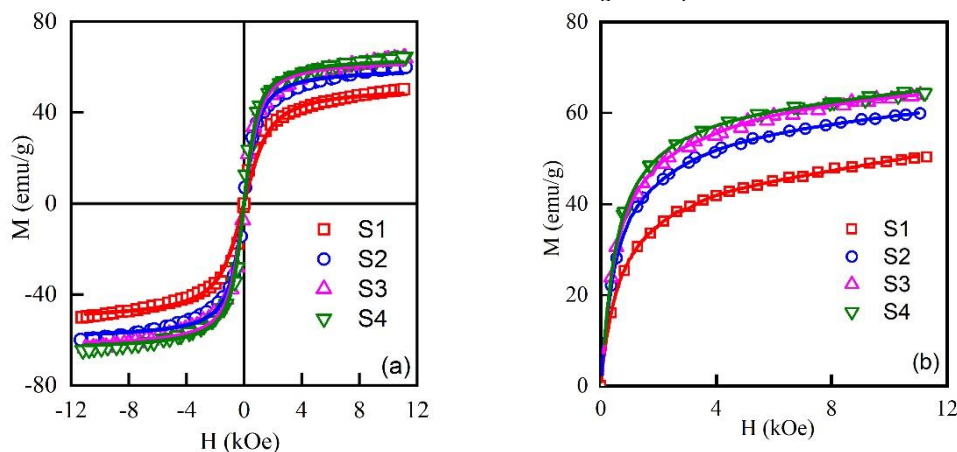
Bên cạnh đó, chúng tôi tiến hành tính toán đường kính siêu thuận từ tối hạn D_{SPM} của các hệ hạt nano FO dựa vào phương trình (2) [6] và so sánh giá trị này với các giá trị D_{XRD} và D_{TEM} .

$$D_{SPM} = \left(\frac{6 \cdot 25k_B T}{\pi K} \right) \quad (2)$$

trong đó, k_B là hằng số Boltzman, T là nhiệt độ, và K là giá trị dị hướng từ.

Đối với các hạt nano từ FO với $K = 9 \text{ kJ/m}^3$ thì giá trị D_{SPM} là 28 nm. Tất cả các giá trị D_{XRD} và D_{TEM} của 4 mẫu đều nhỏ hơn 28 nm. Các hệ mẫu này đều thể hiện trạng thái siêu thuận từ. Do vậy, chúng tôi tiến hành làm khớp dữ liệu đường cong từ trễ $M(H)$ của các mẫu theo hàm Langevin (phương trình (3)) để xác định giá trị từ độ bão hòa (M_S), momem từ (μ). Các giá trị này được thể hiện ở Bảng 2.

$$M = M_S \left[\coth \left(\frac{\mu H}{k_B T} \right) - \frac{k_B T}{\mu H} \right] \quad (3)$$



Hình 3. (a) Đường cong từ trễ $M(H)$ và đường làm khớp theo hàm Langevin; (b) Đường cong từ hóa ban đầu và đường làm khớp theo định luật tiệm cận tới bão hòa (the law of approach to saturation); Đường làm khớp là đường liền nét trong hình (a) và (b)

Tất cả các giá trị M_S của 4 mẫu (Bảng 2) đều nhỏ hơn giá trị của hệ FO dạng khối (90 emu/g) [19]. Ngoài ra, giá trị M_S tăng từ 51,65 emu/g (mẫu S1) đến 64,56 emu/g (mẫu S4). Kết quả này cho thấy giá trị M_S tăng khi kích thước tăng. Tương tự, mẫu S4 có giá trị moment từ cỡ $11,92 \times 10^3 \mu_B$ trong khi mẫu S1 có giá trị moment từ cỡ $6,52 \times 10^3 \mu_B$. Sự suy giảm giá trị M_S theo chiều giảm của kích thước cũng được tìm thấy trong các công trình đã công bố trước đây [20]. Nghiên cứu của nhóm tác giả Goya và cộng sự cho thấy từ độ bão hòa của các hạt nano FO suy giảm đáng kể khi kích thước giảm từ 150 nm xuống 5 nm [20]. Đến nay, nguyên nhân của sự suy giảm này được lý giải bởi sự tồn tại của lớp vỏ không từ (lớp chết từ hoặc lớp spin nghiêng) trên bề mặt hạt [21]. Khi kích thước hạt giảm thì sự đóng góp của lớp vỏ không từ tăng, dẫn đến sự suy giảm của moment từ của hạt nano FO. Điều này dẫn đến sự suy giảm tổng cộng giá trị từ độ bão hòa của hạt FO.

Tính chất từ của hệ hạt nano từ được thể hiện qua giá trị từ độ bão hòa và dị hướng từ hiệu dụng của chúng. Do đó, chúng tôi cũng tiến hành tính toán giá trị dị hướng từ hiệu dụng cho các mẫu trên. Hình 3 (b) đồng thời thể hiện dữ liệu đường cong từ hóa ban đầu và đường làm khớp theo định luật tiệm cận tới bão hòa (the law of approach to saturation) [6] để xác định giá trị dị hướng từ hiệu dụng của các mẫu S1, S2, S3, và S4. Các giá trị này cũng được trình bày ở Bảng 2.

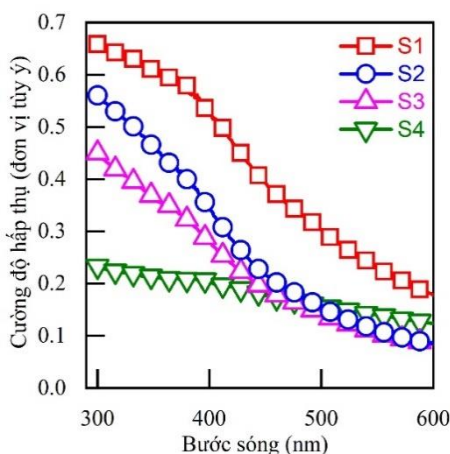
Bảng 2. Giá trị M_S , μ , K_{eff} , và E_g của các mẫu S1, S2, S3, và S4

| Ký hiệu mẫu | M_S (emu/g) | μ (μ_B) | K_{eff} (kJ/m^3) | E_g (eV) |
|-------------|---------------|---------------------|-------------------------------|------------|
| S1 | 51,65 | $6,52 \times 10^3$ | 18,26 | 2,55 |
| S2 | 59,67 | $10,71 \times 10^3$ | 15,31 | 2,75 |
| S3 | 63,76 | $10,85 \times 10^3$ | 14,92 | 2,74 |
| S4 | 64,56 | $11,92 \times 10^3$ | 12,49 | 2,23 |

Ngược lại mối quan hệ giữa từ độ bão hòa và kích thước hạt, giá trị K_{eff} của các hệ mẫu đều lớn hơn giá trị mẫu khối tương ứng là 9 kJ/m^3 [19]. Mặt khác, giá trị K_{eff} của các hạt FO có xu hướng suy giảm khi kích thước tăng. Giá trị dị hướng từ hiệu dụng của mẫu S1 là 18,26

kJ/m^3 , lớn gấp gần 1,5 lần so với mẫu S4 ($12,49 \text{ kJ/m}^3$) trong khi kích thước mẫu S1 nhỏ cỡ 0,73 lần kích thước của mẫu S4. Xu hướng này trùng khớp với kết quả của các công trình đã công bố trước đây [6], [22]. Nguyên nhân của hiện tượng này liên quan đến dị hướng từ bề mặt. Khi giảm kích thước hạt, tỉ số các nguyên tử trên bề mặt hạt so với bên trong hạt tăng dẫn đến sự đóng góp đáng kể của dị hướng từ bề mặt, góp phần tăng giá trị dị hướng từ hiệu dụng ở vùng kích thước nhỏ.

3.4. Phổ UV-Vis

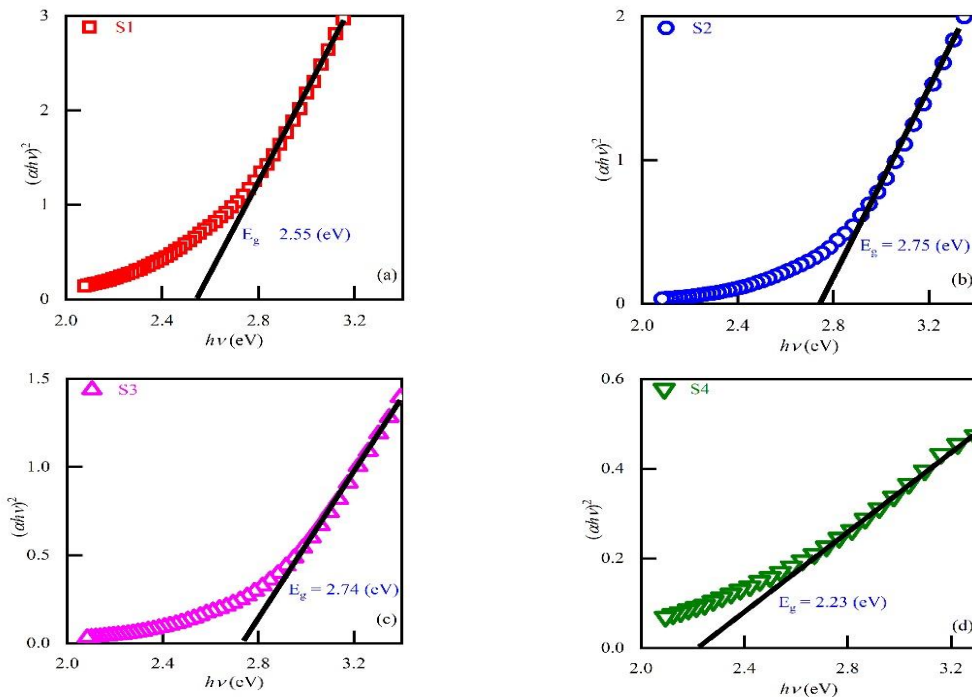


Hình 4. Phổ UV-Vis của các mẫu S1, S2, S3, và S4

Tính chất quang của hạt FO được khảo sát dựa vào quang phổ UV-Vis với bước sóng từ 300 nm đến 600 nm (Hình 4). Từ dữ liệu của Hình 4, độ rộng vùng cấm E_g của các hạt FO được tính theo phương trình Tauc [23]:

$$(\alpha h\nu)^2 = A(h\nu - E_g) \tag{4}$$

trong đó, A là hằng số, $h\nu$ là năng lượng photon ứng với bước sóng, và α là hệ số hấp thụ.



Hình 5. Sự phụ thuộc của $(\alpha h\nu)^2$ vào $(h\nu)$ của các mẫu (a) S1, (b) S2, (c) S3, và (d) S4

Hình 5 thể hiện sự phụ thuộc của $(ah\nu)^2$ của hạt FO vào năng lượng photon ($h\nu$). Từ dữ liệu Hình 5, giá trị E_g được xác định lần lượt bằng 2,55 eV, 2,74 eV, 2,75 eV và 2,23 eV đối với các mẫu S1, S2, S3, và S4. Do kích thước tinh thể (D_{XRD}) của các hệ mẫu S1, S2, và S3 gần giá trị 8 nm, giá trị trung bình E_g của 3 hệ mẫu này cỡ 2,68 eV, lớn hơn giá trị E_g (2,23 eV) của mẫu S4 ($D_{XRD} = 9,1$ nm). Kết quả này cho thấy giá trị E_g có xu hướng giảm khi kích thước tinh thể tăng. Xu hướng này khá phù hợp với các công trình đã công bố trước đây [14], [15]. Nhóm tác giả A. Radon và cộng sự tìm thấy E_g tăng từ 2,52 eV đến 3,01 khi kích thước tinh thể của hạt FO giảm từ 12,2 nm xuống 2,9 nm [15].

4. Kết luận

Các hạt nano từ Fe_3O_4 đã được tổng hợp thành công bằng phương pháp đồng kết tủa. Các hạt nano từ này có kích thước thay đổi từ 8,7 nm đến 11,9 nm. Giá trị từ độ bão hòa (M_s) và moment từ của các hạt nano Fe_3O_4 tăng theo chiều tăng của kích thước hạt. Ngược lại, giá trị dị hướng từ hiệu dụng (K) của chúng có xu hướng giảm khi kích thước hạt tăng. Mặt khác, độ rộng vùng cấm của hạt FO thay đổi từ 2,23 eV ($D_{XRD} \sim 8$ nm) đến 2,55 – 2,75 eV ($D_{XRD} \sim 9$ nm).

Lời cảm ơn

Nghiên cứu này được thực hiện với sự hỗ trợ về kinh phí bởi nhiệm vụ KH&CN theo Nghị định thư của Bộ Khoa học và Công nghệ, mã số: NĐT.88.JP/20. Tác giả L. H. Nguyễn cảm ơn sự hỗ trợ của Trường Đại học Văn Lang.

TÀI LIỆU THAM KHẢO/ REFERENCES

- [1] K. K. Kefeni, T. A. M. Msagati, T. T. Nkambule, and B. B. Mamba, "Spinel ferrite nanoparticles and nanocomposites for biomedical applications and their toxicity," *Mater. Sci. Eng. C*, vol. 107, 2020, Art. no. 110314(19).
- [2] K. K. Kefeni and B. B. Mamba, "Photocatalytic application of spinel ferrite nanoparticles and nanocomposites in wastewater treatment," *SM&T*, vol. 23, 2020, Art. no. E00140(18).
- [3] K. Kalantari, M. B. Ahmad, H. R. F. Masoumi, K. Shameli, M. Basri, and R. Khandanlou, "Rapid Adsorption of Heavy Metals by Fe_3O_4 /Talc Nanocomposite and Optimization Study Using Response Surface Methodology," *Int. J. Mol. Sci.*, vol. 15, pp. 12913-12927, 2014.
- [4] A. E. Deatsch and B. A. Evans, "Heating efficiency in magnetic nanoparticle hyperthermia," *J. Magn. Magn. Mater.*, vol. 354, pp. 163-172, 2014.
- [5] F. Chen, N. Ilyas, X. Liu, Z. Li, S. Yan, and H. Fu, "Size Effect of Fe_3O_4 Nanoparticles on Magnetism and Dispersion Stability of Magnetic Nanofluid," *Front. Energy Res.*, vol. 9, 2021, Art. 780008.
- [6] L. H. Nguyễn, V. T. K. Oanh, P. H. Nam, D. H. Doan, N. X. Truong, N. X. Ca, P. T. Phong, L. V. Hong, and T. D. Lam, "Increase of magnetic hyperthermia efficiency due to optimal size of particles: theoretical and experimental results," *J. Nanopart. Res.*, vol. 22, 2020, Art. no. 258(16).
- [7] C. Bai, P. Hu, N. Liu, G. Feng, D. Liu, Y. Chen, M. Ma, N. Gu, and Y. Zhang, "Synthesis of Ultrasmall Fe_3O_4 Nanoparticles as T_1 - T_2 Dual-Modal Magnetic Resonance Imaging Contrast Agents in Rabbit Hepatic Tumors," *ACS Appl. Nano Mater.*, vol. 3, pp. 3585-3595, 2020.
- [8] Y. Li, W. Duan, X. Lu, S. Yang, and X. Wen, "Synthesis of strawberry-like $Fe_3O_4@SiO_2@Ag$ composite colloidal particles for constructing responsive photonic crystals," *Opt.*, vol. 94, pp. 423-429, 2019.
- [9] I. M. Obaidat, B. Issa, and Y. Haik, "Magnetic properties of magnetic nanoparticles for efficient hyperthermia," *Nanomaterials*, vol. 5, pp. 63-89, 2015.
- [10] Y.-w. Jun, Y.-M. Huh, J.-s. Choi, J.-H. Lee, H.-T. Song, S. Kim, S. Yoon, K.-S. Kim, J.-S. Shin, and J.-S. Suh, "Nanoscale size effect of magnetic nanocrystals and their utilization for cancer diagnosis via magnetic resonance imaging," *J. Am. Chem. Soc.*, vol. 127, pp. 5732-5733, 2005.
- [11] F. Ozel, H. Kockar, and O. Karaagac, "Growth of iron oxide nanoparticles by hydrothermal process: effect of reaction parameters on the nanoparticle size," *J. Supercond. Nov. Magn.*, vol. 28, pp. 823-829, 2015.

- [12] Y. Dong, B. Wen, Y. Chen, P. Cao, and C. Zhang, "Autoclave-free facile approach to the synthesis of highly tunable nanocrystal clusters for magnetic responsive photonic crystals," *RSC Adv.*, vol. 6, pp. 64434-64440, 2016.
- [13] A. H. Habib, C. L. Ondeck, P. Chaudhary, M. R. Bockstaller, and M. E. McHenry, "Evaluation of iron-cobalt/ferrite core-shell nanoparticles for cancer thermotherapy," *J. Appl. Phys.*, vol. 103, pp. 07A307-1-07A307-3, 2008.
- [14] M. E. Sadat, M. K. Baghbador, A. W. Dunn, H. P. Wagner, R. C. Ewing, J. Zhang, H. Xu, G. M. Pauletti, D. B. Mast, and D. Shi, "Photoluminescence and photothermal effect of Fe₃O₄ nanoparticles for medical imaging and therapy," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 105, 2014, Art. no. 091903.
- [15] A. Radoń, A. Drygała, Ł. Hawełek, and D. Łukowiec, "Structure and optical properties of Fe₃O₄ nanoparticles synthesized by co-precipitation method with different organic modifiers," *Mater. Charact.*, vol. 131, pp. 148-156, 2017.
- [16] L. T. Dat, L. H. Nguyen, N. H. Nam, T. D. Van, N. X. Truong, V.-Q. Nguyen, P. T. Phong, and P. H. Nam, "Dependence of specific absorption rate on concentration of Fe₃O₄ nanoparticles: from the prediction of Monte Carlo simulations to experimental results," *J. Nanopart. Res.*, vol. 24, pp. 1-13, 2022.
- [17] Z. J. Zhang, X. Y. Chen, B. N. Wang, and C. W. Shi, "Hydrothermal synthesis and self-assembly of magnetite (Fe₃O₄) nanoparticles with the magnetic and electrochemical properties," *J. Cryst. Growth.*, vol. 310, pp. 5453-5457, 2008.
- [18] J. Liang, L. Li, M. Luo, J. Fang, and Y. Hu, "Synthesis and properties of magnetite Fe₃O₄ via a simple hydrothermal route," *Solid State Sci.*, vol. 12, pp. 1422-1425, 2010.
- [19] R. E. Rosensweig, "Heating magnetic fluid with alternating magnetic field," *J. Magn. Magn. Mater.* vol. 252, pp. 370-374, 2002.
- [20] G. F. Goya, T. S. Berquo, F. C. Fonseca, and M. P. Morales, "Static and dynamic magnetic properties of spherical magnetite nanoparticles," *J. Appl. Phys.*, vol. 94, pp. 3520-3528, 2003.
- [21] R. H. Kodama, S. A. Makhlof, and A. E. Berkowitz, "Finite size effects in antiferromagnetic NiO nanoparticles," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 79, 1997, Art. no. 1393.
- [22] R. Yanes, O. Chubykalo-Fesenko, H. Kachkachi, D. A. Garanin, R. Evans, and R. W. Chantrell, "Effective anisotropies and energy barriers of magnetic nanoparticles with Néel surface anisotropy," *Phys. Rev. B*, vol. 76, 2007, Art. no. 064416(6).
- [23] J. Tauc, R. Grigorovici, and A. Vancu, "Optical properties and electronic structure of amorphous germanium," *Phys. Status Solidi B*, vol. 15, pp. 627-637, 1966.