



Chế tạo hạt nano nickel ferrite (NiFe_2O_4) bằng phương pháp thủy nhiệt

Synthesis of Nickel Ferrite (NiFe_2O_4) Nanoparticles by the Hydrothermal Method

Nguyễn Nho Dũng^a, Nguyễn Thanh Bình^b, Nguyễn Mậu Thành^{c*}
Nguyen Nho Dung^a, Nguyen Thanh Binh^b, Nguyen Mau Thanh^{c*}

^aTrường Đại học Thể dục Thể thao Đà Nẵng, Việt Nam

^aDa Nang Sport University, 550000, Vietnam

^bViện Nghiên cứu Hạt nhân Đà Lạt, Việt Nam

^bDat lat Nuclear Research Institute, 670000, Vietnam

^cTrường Đại học Quảng Bình, Việt Nam

^cQuang Binh University, 510000, Vietnam

(Ngày nhận bài: 30/07/2025, ngày phản biện xong: 23/12/2025, ngày chấp nhận đăng: 22/01/2026)

Tóm tắt

Trong bài báo này, tinh thể nano nickel ferrite (NiFe_2O_4) với đường kính trung bình 46,01 nm được tổng hợp bằng phương pháp thủy nhiệt. Cấu trúc spinel đơn pha được xác nhận bằng phương pháp nhiễu xạ tia X (XRD). Hình thái được phân tích bằng kính hiển vi điện tử quét (SEM) và phân tích tia X phân tán năng lượng (EDX) được sử dụng để xác định thành phần nguyên tố của vật liệu. Tính chất từ của các hạt nano được nghiên cứu bằng từ kế mẫu rung (VSM) và kết quả cho thấy tính siêu thuận từ ở nhiệt độ phòng với độ từ hoá bão hòa (Ms) là 39,8 emu/g.

Từ khóa: tinh thể nano, nickel ferrite, phương pháp thủy nhiệt

Abstract

In this study, nickel ferrite (NiFe_2O_4) nano-crystallites with an average diameter of 46.01 nm are synthesized via hydrothermal method. The single-phase spinel structure is confirmed by X-ray diffractograms (XRD). Morphology is analysed by scanning electron microscopes (SEM) and energy dispersive X-ray (EDX) analysis was used to determine the elemental composition of the materials. The magnetic properties of the nanoparticles are studied by vibrating sample magnetometer (VSM) and the results exhibited superparamagnetism at room temperature with the magnetic saturation of (Ms) 39.8 emu/g.

Keywords: Nanocrystalline, nickel ferrite, hydrothermal method

1. Mở đầu

Trong những năm gần đây khoa học và công nghệ nano thực sự đã tạo được bước đột phá lớn trong lĩnh vực khoa học vật liệu. Nhờ kích thước nhỏ (1–100 nm) và tỷ lệ diện tích bề mặt trên thể tích lớn nên vật liệu nano thể hiện nhiều đặc tính

ưu việt. Nano ferrite là vật liệu đầy hứa hẹn cho các thiết bị vi sóng, chụp cộng hưởng từ (MRI), xúc tác, từ tính, chất hấp thụ vi sóng, cảm biến sinh học, phân phối thuốc y sinh, chống ăn mòn, máy biến áp điện và các ứng dụng viễn thông, do tính ổn định nhiệt cao và các tính chất như quang

*Tác giả liên hệ: Nguyễn Mậu Thành

Email: thanhnm@quangbinhuni.edu.vn

học, từ tính, điện và độ bền cơ học không giống như ở vật liệu khối [1]. Các ferrite từ tính có công thức chung là MFe_2O_4 , trong đó M đại diện cho Ni, Co, Mn, Mg hoặc Cu. Trong số các ferrite khác nhau, thì các hạt nano nickel ferrite ($NiFe_2O_4$) đã được thừa nhận có nhiều ứng dụng hơn nhờ lực kháng từ thấp, độ từ hóa bão hòa cao, độ ổn định hóa học tốt, nhiệt độ Curie và hiệu suất điện từ cao [2]. $NiFe_2O_4$ có cấu trúc spinel nghịch đảo, cụ thể là các ion kim loại Fe^{+3} chiếm tất cả các vị trí tứ diện và một nửa số vị trí bát diện còn lại, trong khi Ni^{+2} chiếm các vị trí bát diện còn lại của mạng tinh thể [3]. Bên cạnh đó, $NiFe_2O_4$ ở kích thước nano thể hiện tính chất siêu từ nên có nhiều ứng dụng rộng rãi trong chất lỏng từ tính, cảm biến khí, vật liệu quang từ hay trong công nghệ sinh học [4]. Hơn nữa, ưu điểm của việc sử dụng các hạt nano từ tính này là vật liệu composite của chúng có thể dễ dàng được cô lập khỏi môi trường dung dịch bằng từ trường ngoài. Do đó, quá trình tổng hợp nano nickel ferrite được quan tâm rộng rãi. Nhiều nhà nghiên cứu đã tổng hợp thành công các hạt nano $NiFe_2O_4$ bằng nhiều kỹ thuật khác nhau như đồng kết tủa [5], sol-gel [6], phản ứng nghiền [7], phương pháp nhiệt dung môi [8], micelle ngược [9], phóng xung điện [10], thủy nhiệt [11] và các quá trình thủy nhiệt hỗ trợ siêu âm [12] để nghiên cứu các tính chất cấu trúc, quang học, hình thái, điện và từ. Tuy nhiên, phương pháp thủy nhiệt có nhiều ưu điểm so với các phương pháp khác như chi phí chuẩn bị mẫu thấp, độ kết tinh cao, đơn giản và sử dụng nhiệt độ thấp. Vì vậy, trong bài báo này chúng tôi đề cập đến các kết quả tổng hợp vật liệu nano nickel ferrite bằng phương pháp thủy nhiệt.

2. Phương pháp nghiên cứu

2.1. Hóa chất và thiết bị

Các hóa chất sử dụng trong nghiên cứu là các hóa chất tinh khiết được mua từ hãng Merck, Đức gồm: $FeCl_3 \cdot 6H_2O$, $NiCl_2 \cdot 6H_2O$, NaOH; còn methylene blue, CH_3COOH và ethanol

(C_2H_5OH) được mua từ hãng Guangzhou, Trung Quốc. Nước cất hai lần (cát trên thiết bị cát nước Fistream Cyclon, England) được sử dụng để pha chế hóa chất và tráng, rửa các dụng cụ thủy tinh. Cốc thủy tinh chịu nhiệt 100 mL, 250 mL, 500 mL, micropipet các loại, cân phân tích, máy khuấy từ gia nhiệt, cối chày mã nã, lò nung, tủ sấy, bình thủy nhiệt (bộ Autoclave).

Vật liệu tổng hợp được nghiên cứu bằng các phương pháp vật lý hiện đại như: cấu trúc và độ tinh thể của vật liệu nhận dạng bởi sự nhiễu xạ tia X (XRD) đo trên máy D8-Advance, Bruker với tia phát xạ CuK_{α} có bước sóng $\lambda = 1,5406 \text{ \AA}$, công suất 40 KV, góc quét 10° đến 80° . Hình thái của sản phẩm quan sát bằng quét kính hiển vi điện tử (SEM) và thành phần nguyên tố được ghi trên phổ EDX thực hiện trên máy SEM-JEOL-JSM 5410 LV (Nhật) ở 10 kV. Và tính chất từ của vật liệu được đo bằng từ kế mẫu rung (VSM), thực hiện trên máy Micro Sence Easy VSM 20130321-02.

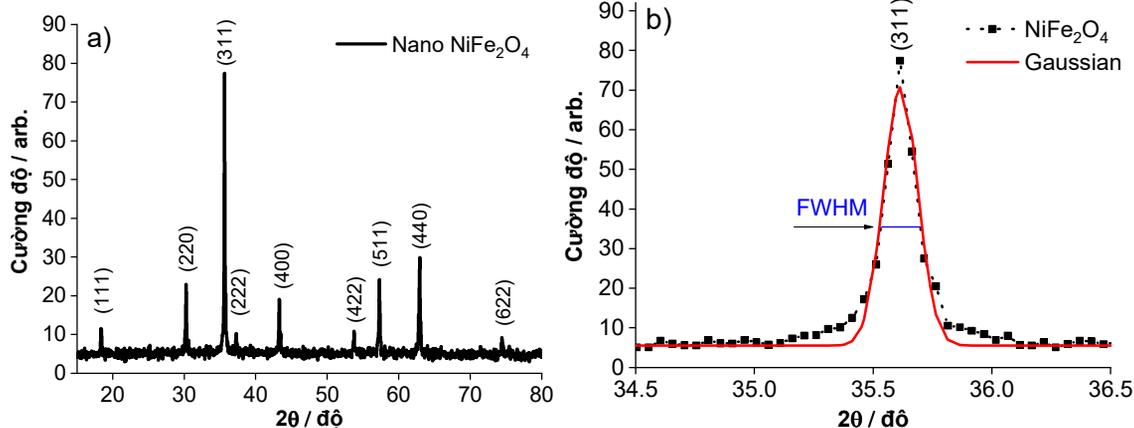
2.2. Tổng hợp nano nickel ferrite

Cân chính xác 0,951 g $NiCl_2 \cdot 6H_2O$ và 2,162 g $FeCl_3 \cdot 6H_2O$ rồi cho vào một cốc thủy tinh 250 mL, thêm 180 mL nước cất, dùng máy khuấy từ khuấy đều thu được dung dịch A. Hòa tan 1,350 g NaOH vào 20 mL nước cất, sau đó nhỏ từng giọt dung dịch NaOH vào bình chứa dung dịch A tiếp tục khuấy đều bằng máy khuấy từ, giữ dung dịch ở nhiệt độ phòng trong thời gian 15 phút, xuất hiện kết tủa màu nâu đen (B). Cho hỗn hợp B vào bình teflon 250 mL đậy nắp rồi đưa vào bộ Autoclave, vặn chặt. Thủy phân hỗn hợp trên bằng cách cho bộ Autoclave có chứa dung dịch B vào lò nung. Tiến hành gia nhiệt ở nhiệt độ là $180^\circ C$ với thời gian 12 giờ [13], sau đó để nguội bình thủy nhiệt đến nhiệt độ phòng, thu được dung dịch chứa kết tủa và các chất hoà tan. Gạn lấy kết tủa rồi rửa bằng ethanol và nước cất nhiều lần đến pH ≈ 7 . Cuối cùng sản phẩm được sấy khô ở $70^\circ C$ rồi nghiền mịn, ta được các hạt nano nickel ferrite.

3. Kết quả và thảo luận

3.1. Đặc trưng vật liệu bằng XRD

Phương pháp nhiễu xạ tia X là một trong những phương pháp thường được sử dụng để nhận dạng cấu trúc và độ tinh thể của vật liệu.



Hình 1. a) Giản đồ XRD của vật liệu NiFe_2O_4 , b) Mô hình FWHM theo hàm Gaussian

Hình 1a mô tả sự thay đổi cường độ theo hàm của góc hai theta (2θ) từ 15° đến 80° đối với các hạt nano NiFe_2O_4 . Mẫu nhiễu xạ của mẫu được chuẩn bị cho thấy sự hình thành một pha của cấu trúc lập phương tâm mặt với độ kết tinh cao, các đường sắc nét. Vị trí của các đường Bragg với sự phản xạ từ các mặt phẳng tinh thể của nickel ferrite là (111), (220), (311), (222), (400), (422), (511), (440) và (622). Tương ứng với các đỉnh nhiễu xạ ở 2θ là $18,32^\circ$; $30,23^\circ$; $35,62^\circ$; $37,27^\circ$; $43,28^\circ$; $45,44^\circ$; $53,70^\circ$; $57,28^\circ$; $62,93^\circ$ và $74,42^\circ$ và phù hợp với thẻ tiêu chuẩn JCPDS 74-2081, cũng như Manikandan V và cộng sự đã công bố khi tổng hợp các tinh thể nano NiFe_2O_4 bằng phương pháp đồng kết tủa hóa học [5]. Để nghiên cứu sâu hơn, chúng tôi sẽ tính kích thước tinh thể, khoảng cách mạng, cũng như ứng suất bề mặt dựa vào phương pháp Scherrer-

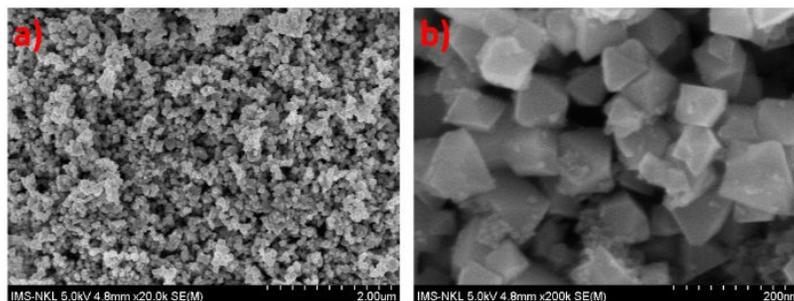
Debye [14]:
$$D = \frac{0,89 \times \lambda}{\rho \times \cos(\theta)} \quad (1).$$
 Trong đó: D

Nó còn cho phép tính toán kích thước hạt và phân tích bán định lượng hàm lượng các chất có trong vật liệu. Kết quả phân tích vật liệu nickel ferrite bằng nhiễu xạ tia X được thể hiện trên Hình 1.

là kích thước tinh thể trung bình, λ là bước sóng tia X là $1,5418 \text{ \AA}$, ρ là độ bán rộng bán chiều cao đỉnh (full-width half-maximum – FWHM), θ là góc nhiễu xạ tương ứng (Góc Bragg). Mặt khác, công thức này thường được áp dụng tính cho đỉnh nhiễu xạ có cường độ mạnh nhất là đỉnh (311) của nano NiFe_2O_4 . Kết quả cho thấy, giá trị FWHM $\approx 0,18$ (Hình 1b) nên kích thước tinh thể trung bình của các hạt nano nickel ferrite sau khi tổng hợp được là khoảng $46,01 \text{ nm}$.

3.2. Đặc trưng các vật liệu bằng ảnh SEM

Để quan sát được hình thái học bề mặt của vật liệu nano nickel oxide, chúng tôi tiến hành khảo sát qua ảnh hiển vi điện tử quét SEM ở các độ phóng đại khác nhau, với thanh tỷ lệ là $2 \mu\text{m}$ và 200 nm và được thể hiện lần lượt trong Hình 2a và 2b.

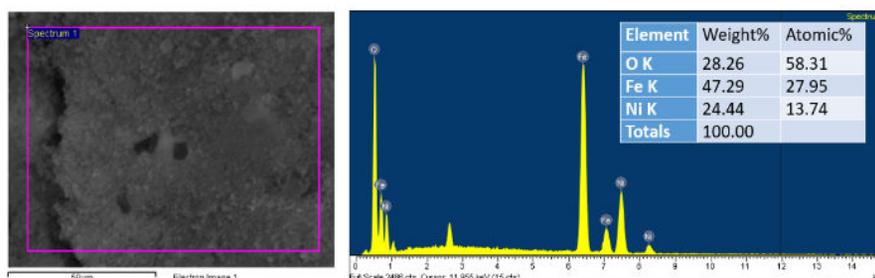
Hình 2. Ảnh SEM của vật liệu NiFe_2O_4

Hình 2a cho thấy, các hạt nano NiFe_2O_4 ở đây phân tán tương đối đồng đều và kích thước hạt tương đối nhỏ. Tuy nhiên, ở độ phóng đại này thì khó có thể xác định chính xác kích thước từng hạt. ở mục Nhưng ở Hình 2b thì có thể thấy rõ các hạt có kích thước trong khoảng vài chục nanomet, điều này cũng phù hợp với kết quả được tính toán 3.1. Hơn nữa hình thái của các hạt nickel ferrite tổng hợp được nhìn thấy rõ ràng, thể hiện hình thái đa diện và có xu hướng là hình khối lập phương phân tán khá tốt và ít có hiện tượng kết tụ

lớn. Những đặc điểm này rất quan trọng và ảnh hưởng trực tiếp đến các tính chất vật lý và hóa học của vật liệu như tính chất từ, xúc tác, hấp phụ hoặc khả năng tương tác với màng tế bào vi khuẩn.

3.3. Đặc trưng các vật liệu bằng ảnh EDX

Phân tích nguyên tố và độ tinh khiết của mẫu tinh thể nano nickel ferrite đã được xác nhận bằng phương pháp EDX và các đỉnh thu được được thể hiện trong Hình 3.



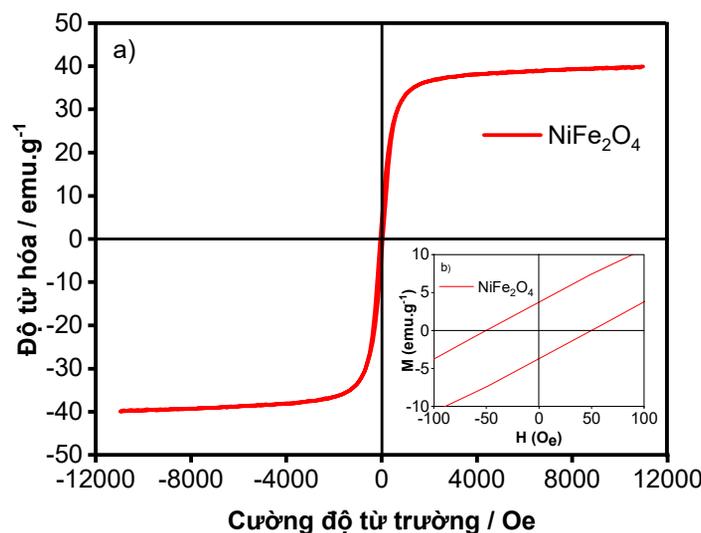
Hình 3. Phổ EDX của vật liệu nickel ferrite

Kết quả EDX ở Hình 3 khẳng định cả tính đồng nhất và sự có mặt của các nguyên tố Ni, Fe và O trong mẫu NiFe_2O_4 . Phần trăm nguyên tử của các nguyên tố Ni, Fe và O lần lượt là 13,74; 27,95 và 58,31 %, chứng tỏ vật liệu tồn tại các nguyên tố niken và sắt trong mẫu xấp xỉ với tỉ lệ mol Ni/Fe ban đầu đưa vào là 1:2, nên ferrite thu được là phù hợp và tương ứng với công thức hóa học NiFe_2O_4 . Kết quả EDX còn cho thấy rõ ràng sự hình thành một pha của cấu trúc nickel ferrite từ việc sử dụng hoàn toàn các tiền chất được sử dụng trong quá trình tổng hợp mà không có tạp chất khác trong mẫu. Ngoài các peak này, có một peak nhỏ cũng được tìm thấy ở 0,26 keV trong

mẫu, điều này cho thấy sự hiện diện của nguyên tố Cl có thể là từ các muối ban đầu đưa vào để tổng hợp mẫu, kết quả này cũng trùng hợp với nghiên cứu của nhóm tác giả Zipare K [15].

3.4. Đặc trưng bằng tính chất từ

Một trong những tính chất quan trọng của vật liệu ferrite spinel là từ tính của chúng. Để xác định từ tính của nano nickel ferrite tổng hợp được, chúng tôi đo độ trễ từ của các mẫu vật liệu ở nhiệt độ phòng và được trình bày trong Hình 4 dưới dạng đường cong từ tính của độ từ hóa - cường độ từ trường (M-H).



Hình 4. Vòng trễ từ của nano NiFe_2O_4

Hình 4a cho thấy, đường cong từ trễ của vật liệu nano nickel ferrite tổng hợp được có dạng chữ S và ở trạng thái liên kết trao đổi tốt giữa hai pha từ cứng và từ mềm trong mẫu bởi các đường từ trễ này tương đối trơn, mịn giống như một pha từ duy nhất [16]. Hơn nữa, các giá trị cường độ từ trường/lực kháng từ ($H_c \approx 50,2 \text{ Oe}$) và độ từ dư ($M_r \approx 3,6 \text{ emu.g}^{-1}$) được xác định từ Hình 4b đều thấp, nhưng giá trị từ hoá bão hòa tương đối cao ($M_s \approx 39,8 \text{ emu.g}^{-1}$). Trong khi đó, tỷ lệ M_r/M_s còn được gọi là tỷ lệ từ dư (R), được sử dụng để xác định vật liệu là từ đơn miền hay từ đa miền, và nó được dùng để cung cấp thông tin về chất lượng của các nano ferrite. Kết quả cho thấy, giá trị $R \approx 0,09$ nhỏ hơn nhiều so với 0,5 nên sự phát triển của các hạt nano NiFe_2O_4 là đơn miền [17]. Hay nói cách khác, vật liệu của chúng tôi tổng hợp được là vật liệu từ mềm và có tính chất siêu thuận từ nên phù hợp với cấu trúc nano của NiFe_2O_4 . Mặt khác, với giá trị độ từ hóa bão hòa cao, các vật liệu này có thể dễ dàng tách ra khỏi dung dịch nước dưới tác dụng của từ trường ngoài. Tính siêu thuận từ của các hạt nano có thể được quy cho kích thước tinh thể của chúng nhỏ, giúp chúng dễ dàng được hoạt hóa nhiệt để khắc phục tính dị hướng từ [18]. Bên cạnh đó, người ta thấy rằng xu hướng thay đổi của các giá trị M_s và H_c phù hợp với sự cải thiện độ kết tinh của các vật liệu được nghiên

cứu. Chẳng hạn, Singhal và Chandra [19] đã chế tạo các hạt Ni-ferrite ở 75 nm bằng phương pháp khí dung và quan sát thấy giá trị từ hóa bão hòa là 47 emu.g^{-1} . Trong khi đó, Alarif A và cộng sự [20] đã tổng hợp các hạt nano NiFe_2O_4 có kích thước khoảng 62 nm bằng phương pháp đốt cháy và đã tính toán được giá trị từ hóa bão hòa là 51 emu.g^{-1} . Do đó, đối với các hạt nano ferrite spinel từ tính, thì cần lưu ý rằng độ từ hóa phụ thuộc rất nhiều vào kích thước hạt của chúng cũng như phương pháp tổng hợp.

4. Kết luận

Những hạt nano nickel ferrite (NiFe_2O_4) đã được tổng hợp thành công bằng phương pháp thủy nhiệt với kỹ thuật đồng kết tủa. Kết quả XRD xác nhận vật liệu này có cấu trúc Spinel lập phương với độ tinh khiết cao, kích thước tinh thể trung bình được tính toán từ phương trình Scherrer-Debye là 46,01 nm. Phân tích ảnh SEM của vật liệu cho thấy các hạt thể hiện hình thái đa diện và có xu hướng là hình khối lập phương, phân tán tương đối đồng đều và ít có hiện tượng kết tụ lớn. Phổ EDX khẳng định tính đồng nhất với sự có mặt của các nguyên tố Ni, Fe và O trong mẫu NiFe_2O_4 và có độ tinh khiết cao. Kết quả phân tích tính chất từ cho thấy, nano NiFe_2O_4 là vật liệu từ mềm và có tính chất siêu thuận từ.

Tài liệu tham khảo

- [1] Rafique M Y, Ellahi M, Iqbal M Z and Pan L. (2016). "Gram scale synthesis of single crystalline nano-octahedron of NiFe₂O₄: Magnetic and optical properties". *Materials Letters*, vol. 162, pp. 269-272. DOI: org/10.1016/j.matlet.2015.10.025.
- [2] Bhosale S, Ekambe P, Bhoraskar S and Mathe V. (2018). "Effect of surface properties of NiFe₂O₄ nanoparticles synthesized by dc thermal plasma route on antimicrobial activity". *Applied Surface Science*, vol. 441, pp. 724-733. DOI: org/10.1016/j.apsusc.2018.01.220.
- [3] Sivakumar P, Ramesh R, Ramanand A, Ponnusamy S and Muthamizchelvan C. (2011). "Synthesis and characterization of nickel ferrite magnetic nanoparticles". *Materials Research Bulletin*, vol. 46, no. 12, pp. 2208-2211. DOI: org/10.1016/j.materresbull.2011.09.009.
- [4] Springer V, Pecini E and Avena M J. (2016). "Magnetic nickel ferrite nanoparticles for removal of dipyrone from aqueous solutions". vol. 4, no. 4, pp. 3882-3890. DOI: org/10.1016/j.jece.2016.08.026.
- [5] Manikandan V, Sikarwar S, Yadav B, Vigneselvan S, Mane R and Chandrasekaran. (2021). "Ultra-sensitive behaviour of ruthenium-doped nickel ferrite thin film humidity sensor". *Journal of Experimental Nanoscience*, vol. 16, no. 1, pp. 43-50. DOI: org/10.1080/17458080.2021.1873385.
- [6] Khairy M. (2014). "Synthesis, characterization, magnetic and electrical properties of polyaniline/NiFe₂O₄ nanocomposite". *Synthetic metals*, vol. 189, pp. 34-41. DOI: org/10.1016/j.synthmet.2013.12.022.
- [7] Marinca T, Chicinaş I, Isnard O, Pop V and Popa F. (2011). "Synthesis, structural and magnetic characterization of nanocrystalline nickel ferrite—NiFe₂O₄ obtained by reactive milling". *Journal of Alloys Compounds*, vol. 509, no. 30, pp. 7931-7936. DOI: org/10.1016/j.jallcom.2011.05.040.
- [8] Zheng H, Ni Y, Xiang N, Ma V and Wan F. (2015). "Solvothermal synthesis of octahedral NiFe₂O₄ nanocrystals and catalytic properties for the reduction of some aromatic nitrocompounds". *Materials Chemistry Physics*, vol. 158, pp. 82-88. DOI: org/10.1016/j.matchemphys.2015.03.040.
- [9] Kale A, Gubbala S and Misra R. (2004). "Magnetic behavior of nanocrystalline nickel ferrite synthesized by the reverse micelle technique". *Journal of Magnetism/Magnetic Materials*, vol. 277, no. 3, pp. 350-358. DOI: org/10.1016/j.jmmm.2003.11.015.
- [10] Kinemuchi Y, Ishizaka K, Suematsu H, Jiang W and Yatsui K. (2002). "Magnetic properties of nanosize NiFe₂O₄ particles synthesized by pulsed wire discharge". *Thin solid films*, vol. 407, no. 1-2, pp. 109-113. DOI: org/10.1016/S0040-6090(02)00021-4.
- [11] Zhou J, Ma J, Sun C, Xie L, Zhao Z, Tian H, Wang T, Tao J and Zhu X. (2005). "Low-Temperature Synthesis of NiFe₂O₄ by a Hydrothermal Method". *Journal of the American Ceramic Society*, vol. 88, no. 12, pp. 3535-3537. DOI: org/10.1111/j.1551-2916.2005.00629.x.
- [12] Meskin P E, Ivanov V K, Barantchikov A E, Churagulov B R and Tretyakov Y D. (2006). "Ultrasonically assisted hydrothermal synthesis of nanocrystalline ZrO₂, TiO₂, NiFe₂O₄ and Ni_{0.5}Zn_{0.5}Fe₂O₄ powders". *Ultrasonics sonochemistry*, vol. 13, no. 1, pp. 47-53. DOI: org/10.1016/j.ultsonch.2004.12.002Get rights and content.
- [13] Guo P, Cui L, Wang Y, Lv M, Wang B and Zhao X. (2013). "Facile synthesis of ZnFe₂O₄ nanoparticles with tunable magnetic and sensing properties". *Langmuir*, vol. 29, no. 28, pp. 8997-9003. DOI: org/10.1021/la401627x.
- [14] Patterson A. (1939). "The Scherrer formula for X-ray particle size determination". *Physical review*, vol. 56, no. 10, pp. 978. DOI: org/10.1103/PhysRev.56.978.
- [15] Zipare K, Dhumal J, Bandgar S, Mathe V and Shahane G. (2015). "Superparamagnetic manganese ferrite nanoparticles: synthesis and magnetic properties". *Journal of Nanoscience Nanoengineering*, vol. 1, no. 3, pp. 178-182.
- [16] Wu W, Jiang C Z and Roy V A. (2016). "Designed synthesis and surface engineering strategies of magnetic iron oxide nanoparticles for biomedical applications". *Nanoscale*, vol. 8, no. 47, pp. 19421-19474. DOI: org/10.1039/C6NR07542H.
- [17] Himakar P, Jayadev K, Parajuli D, Murali N, Tadesse P, Mulushoa S Y, Mammo T W, Kishore Babu B, Veeraiah V and Samatha K. (2021). "Effect of Cu substitution on the structural, magnetic, and dc electrical resistivity response of Co_{0.5}Mg_{0.5-x}Cu_xFe₂O₄ nanoferrites". *Applied Physics A*, vol. 127, no. 5, pp. 371. DOI: org/10.1007/s00339-021-04521-w.
- [18] Chand M, Kumar A, Annveer K S, Shankar A and Pant R. (2011). "Investigations on Mn_xZn_{1-x}Fe₂O₄ (x= 0.1, 0.3 and 0.5) nanoparticles synthesized by sol-gel and co-precipitation methods". *Ind. J. Eng. Mater. Sci*, vol. 18, no. pp. 385-389.
- [19] Singhal S and Chandra K. (2007). "Cation distribution and magnetic properties in chromium-substituted nickel ferrites prepared using aerosol route". *Journal of solid state chemistry*, vol. 180, no. 1, pp. 296-300. DOI: org/10.1016/j.jssc.2006.10.010.
- [20] Alarifi A, Deraz N and Shaban S. (2009). "Structural, morphological and magnetic properties of NiFe₂O₄ nano-particles". *Journal of Alloys Compounds*, vol. 486, no. 1-2, pp. 501-506. DOI: org/10.1016/j.jallcom.2009.06.192.