

## Sintesis dan Karakterisasi Nanopartikel Magnetit ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) Menggunakan Metode Kopresipitasi

Oktavia Rahmi Wulandari<sup>1</sup>, Amanda Natania Gracia<sup>1</sup>, Yuneta<sup>1</sup>, Tina Sugiyani<sup>1</sup>, Yuni Damayanti Nainggolan<sup>1</sup>, Marsya Imelya<sup>1</sup>, Miranti Maya Sylvani<sup>1</sup>, Siti Unvaresi Misonia Beladona<sup>1</sup> & Riandy Putra<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> Program Studi Kimia, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Palangka Raya, Palangka Raya, 73111, Indonesia

\*Corresponding author: [riandy@mipa.upr.ac.id](mailto:riandy@mipa.upr.ac.id)

### Article history

Received: 22 June 2024

Received in revised form: 26 June 2024

Accepted: 28 June 2024

DOI:

10.17977/um0260v8i12024p021

### Kata-kata kunci:

Nanopartikel

Magnetit

XRD

SEM

### Abstrak

Nanopartikel magnetit merupakan salah satu mineral besi oksida dengan sifat magnet paling kuat di alam dan struktur kristal spinel berbentuk kubus. Nanopartikel ini termasuk kedalam material magnetik yang memiliki satu domain magnetik (*single domain*). Penelitian ini menggunakan metode kopresipitasi untuk mensintesis nanopartikel  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  dari bahan baku prekursor  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  dan  $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ , dan  $\text{NaOH}$  sebagai zat pengendap. Karakterisasi hasil sintesis yang dilakukan menggunakan XRD dan SEM untuk mengetahui struktur kristalinitas dan morfologi dari nanopartikel  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ . Berdasarkan hasil analisis XRD ukuran kristalit nanopartikel  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  yang diperoleh dari persamaan Debye-Scherrer sebesar 55,39 nm dengan kristalinitas sebesar 27,10%. Sedangkan hasil analisis SEM menunjukkan bahwa nanopartikel  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  memiliki morfologi yang kasar dan teratur dengan rata-rata distribusi ukuran partikel sebesar  $\pm 35,2$  nm. Nanopartikel  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  memiliki permukaan yang berpori-pori karena terdapat celah dan rongga pada partikel-partikelnya.

### Abstract

*Magnetite nanoparticles are one of the iron oxide minerals with the strongest magnetic properties in nature and a cubic spinel crystal structure. These nanoparticles belong to the category of magnetic materials with a single magnetic domain. This study used the coprecipitation method to synthesize  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  nanoparticles using  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  and  $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  as precursors and  $\text{NaOH}$  as a precipitating agent. The synthesized nanoparticles were characterized using XRD and SEM to determine their crystallinity structure and morphology. Based on XRD analysis, the crystallite size of the  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  nanoparticles calculated using the Debye-Scherrer equation was 55.39 nm, with a crystallinity of 27.10%. SEM analysis revealed that the  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  nanoparticles had a rough and uniform morphology with an average particle size distribution of approximately 35.2 nm. The  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  nanoparticles exhibited a porous surface due to the presence of gaps and voids among the particles.*

### PENDAHULUAN

Keberadaan sumber daya alam seperti minyak, gas, dan berbagai bahan mineral di muka bumi sangat melimpah. Salah satu mineral yang berpotensi untuk dikembangkan adalah magnetit ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) [1]. Magnetit termasuk jenis mineral besi oksida yang mempunyai struktur kristal berbentuk kubus dengan sifat magnet terkuat di alam. Sifat magnet yang dimiliki magnetit ini dapat dipengaruhi oleh ukuran partikelnya [2]. Rumus umum magnetit adalah  $\text{Fe}^{3+}(\text{A}) [\text{Fe}^{2+} \text{Fe}^{3+}] (\text{B}) \text{O}_4$  dengan struktur kristal kubik spinel. Sisi A adalah

ion  $\text{Fe}^{3+}$  yang menempati sisi tetrahedral dengan empat atom oksigen (O) yang mengelilinginya, sedangkan sisi B adalah ion  $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$  yang menempati sisi oktahedral dengan enam atom oksigen yang mengelilinginya. Ion  $\text{Fe}^{3+}$  sisi A dan B mempunyai pasangan antiferromagnetik, sehingga ion  $\text{Fe}^{2+}$  sisi B memberikan kontribusi secara makroskopik terhadap sifat kemagnetan magnetit. Bentuk makroskopik (*bulk*) dari magnetit bersifat ferrimagnetik dan memiliki suhu *curie* yang tinggi sekitar 850 K [3]. Namun, sifat ferrimagnetik ini dapat mengalami perubahan signifikan apabila diameter partikel magnetit berubah secara drastis

hingga mencapai ukuran nanometer.

Suatu partikel yang memiliki ukuran 1-100 nanometer disebut sebagai nanopartikel [4]. Nanopartikel magnetik memiliki sifat unik berupa sifat superparamagnetik. Sifat ini umumnya muncul pada material yang bersifat ferromagnetik dan ferrimagnetik ketika ukuran partikel mencapai skala nanometer [5]. Nanopartikel magnetit adalah material magnetik yang hanya memiliki satu domain magnetik (*single domain*). Untuk memanfaatkan nanopartikel magnetit dalam bidang biosensor, diperlukan analisis mendalam mengenai sifat dan karakteristiknya, terutama sifat magnetik dan ukuran butirnya [6].

Berbagai metode telah banyak digunakan untuk sintesis  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ , seperti hidrolisis, sol-gel, mikroemulsi, sonokimia, solvotermal, dan kopresipitasi [7]. Namun, kopresipitasi telah menjadi metode yang lebih mudah dalam mensintesis nanopartikel  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  karena memiliki banyak keunggulan, termasuk reaksi waktu yang singkat, kemampuan untuk menggunakan air sebagai pelarut, efektivitas biaya, produktivitas tinggi, dan kemudahan sintesis pada suhu rendah [8]. Keunggulan lain dari metode kopresipitasi adalah memberikan ukuran kristalit dalam kisaran kecil dibandingkan dengan proses sintesis lainnya berdasarkan zat pengendap yang dipilih selama reaksi. Demikian pula, ukuran kristalit dan morfologi bahan yang dihasilkan dengan menggunakan teknik ini dapat dikontrol dengan menggunakan *capping agent* [9,10]. Namun, sifat partikel yang dihasilkan, seperti ukuran, bentuk, dan komposisi, sangat bergantung pada parameter reaksi seperti suhu, pH, kekuatan ion, sifat larutan basa, dan sebagainya. Karena variabilitas ukuran inti dan adanya aglomerat dalam nanopartikel  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ , sintesis kopresipitasi diketahui menghasilkan partikel dengan poli-dispersitas tinggi dan magnetisme yang relatif rendah [11]. Stabilitas dan penggunaan nanopartikel  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  dipersulit karena adanya aglomerat ini. Nukleasi dan pengembangan partikel secara simultan, serta keberadaan fase perantara sebelum atau selama produksi fase magnet yang diinginkan, seperti magnetit ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) atau maghemit ( $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ ), kemungkinan besar menyebabkan variasi dalam ukuran inti [12].

Menurut keadaan sintesis, mekanisme pembentukan partikel masih diperdebatkan dan diperkirakan bervariasi [13]. Dalam penelitian ini, natrium hidroksida (NaOH) digunakan sebagai zat pengendap bersama dengan ferro dan ferri untuk membuat nanopartikel magnetit. Nanopartikel

kemudian dikarakterisasi menggunakan XRD dan SEM untuk mempelajari sifat kristalografi dan morfologi dari nanopartikel  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ .

## METODE

Metode yang digunakan dalam penelitian ini yaitu metode kopresipitasi untuk mensintesis dan mengontrol bentuk atau ukuran  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  nanopartikel. Penelitian ini dilakukan di UPT Laboratorium Terpadu, Universitas Palangka Raya.

### Alat

Alat yang digunakan adalah gelas ukur 50 mL, gelas kimia 250 mL, erlenmeyer 250 mL, botol aquades, batang pengaduk, kertas lakmus, termometer, kertas saring, sentrifugasi, *magnetic stirrer* dan *hot plate*.

### Bahan

Bahan yang digunakan adalah aquades,  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  (Merck),  $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  (Merck), Etanol p.a. ( $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ , 99.8%, Merck), dan NaOH (99%, Merck).

### Prosedur Kerja

Larutkan  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  dan  $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  secara terpisah dalam dua gelas kimia berukuran 50 mL berisi aquades (A) dan etanol (B) dengan pengadukan terus menerus pada suhu kamar. Rasio molar  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  dan  $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  sebagai  $\text{Fe}^{2+}$  dan  $\text{Fe}^{3+}$  masing-masing adalah 1:2 (4.17 g; 8.10 g). Setelah kedua larutan larut sempurna, larutan dari gelas A tambahkan perlahan ke gelas B, dan suhu dinaikkan menjadi 35 °C. Kemudian, pH larutan akhir diatur dengan menambahkan NaOH untuk mengatur pH pada 11. Sampel diaduk pada suhu 60 °C selama 1,5 jam. Setelah 1,5 jam, sampel dibiarkan dingin. Kemudian, sampel dicuci untuk menghilangkan prekursor yang tidak bereaksi. Tahap pencucian dilakukan dengan aquades secara terus menerus hingga pH larutan mencapai 7. Terakhir, sampel dicuci dengan Etanol dan dikeringkan [14].

## HASIL DAN PEMBAHASAN

### Karakterisasi XRD Nanopartikel $\text{Fe}_3\text{O}_4$

Analisis uji *X-ray Diffractometer* (XRD) dilakukan untuk menganalisis fasa dan ukuran kristal pada nanopartikel  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ . Berdasarkan Gambar 1, difraktogram nanopartikel  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  menunjukkan pola puncak yang dominan dengan enam puncak karakteristik pada sudut 30,2°, 35,5°, 43,3°, 53,7°, 57,2° dan 62,9° yang sesuai dengan bidang kristal (220), (311), (400), (422), (511) dan (440) dari magnetit ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) dengan struktur spinel,

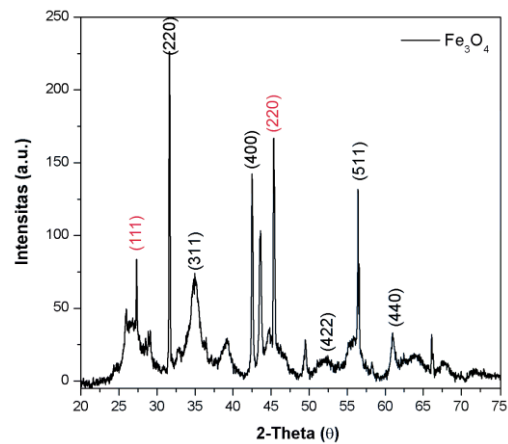
sebagaimana tercantum dalam *database* JCPDS (PDF no. 65-3107) [15-16]. Pembentukan nanopartikel Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> menggunakan metode kopresipitasi dilakukan dengan memanfaatkan FeCl<sub>3</sub> sebagai sumber ion Fe<sup>3+</sup> (ion ferri) dan FeSO<sub>4</sub> sebagai sumber ion Fe<sup>2+</sup> (ion ferro). Proses ini menandakan bahwa sebagian besar prekursor akan bereaksi sempurna dalam suasana basa menghasilkan nanopartikel Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>. Hal ini terjadi karena reaksi kopresipitasi berlangsung dengan laju yang sangat tinggi, sehingga endapan hitam Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> terbentuk secara bersamaan setelah penambahan larutan alkali (NaOH) kedalam campuran larutan garam ferro dan ferri. Endapan-endapan besi tersebut dapat terbentuk akibat pembentukan kristal campuran atau penyerapan ion-ion selama fase sedimentasi [17-18]. Reaksi pembentukan yang cepat ini menjadi faktor utama dalam menghasilkan partikel Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> berukuran nano.

Namun demikian, hasil XRD pada nanopartikel Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> menunjukkan adanya senyawa pengotor NaCl dalam jumlah yang cukup signifikan. Hal ini ditandai dengan kemunculan puncak-puncak difraksi yang sesuai dengan pola difraksi NaCl yaitu pada sudut 27,4° (111) dan 45,4° (220) [19]. Senyawa NaCl ini diduga berasal dari penggabungan ion Cl<sup>-</sup>, sisa penggunaan FeCl<sub>3</sub> sebagai prekursor dengan ion Na<sup>+</sup> dari NaOH yang digunakan untuk meningkatkan pH ke suasana basa. Garam NaCl kemungkinan masih terperangkap dalam larutan selama proses pembentukan nanopartikel Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>. Selain itu, keberadaan pengotor NaCl juga disebabkan oleh proses pencucian sampel yang belum optimal, sehingga NaCl sulit dihilangkan meskipun telah dilakukan pencucian berulang kali. Pembentukan nanopartikel dapat dianalisis melalui perhitungan lebar puncak pada hasil XRD. Pelebaran puncak XRD ini dapat digunakan untuk menentukan ukuran kristalit nanopartikel Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> dengan menggunakan persamaan Debye-Scherrer:

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

Pada persamaan Debye-Scherrer, D merupakan rata-rata ukuran kristalin,  $\lambda = 0,154$  nm merupakan panjang gelombang X-Ray,  $\theta$  merupakan sudut Bragg dan  $\beta$  merupakan puncak dengan setengah dari intensitas maksimum. Nilai  $\beta$  dapat dicari dengan mengkonversikannya ke dalam bentuk radian dan dikalikan dengan nilai *Full Width Half Maximum* (FWHM). Berdasarkan persamaan (1) Debye-Scherrer maka diperoleh ukuran kristalit nanopartikel sebesar 55,39 nm dan kristalinitas

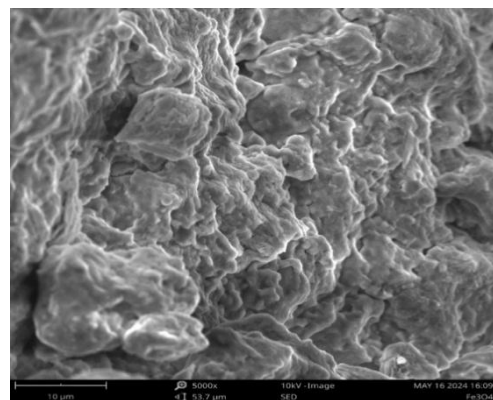
sebesar 27,10%. Hasil ini menunjukkan bahwa ukuran kristalit Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> yang disintesis pada penelitian ini dapat dikategorikan pada rentang nanopartikel.



Gambar 1. Hasil XRD nanopartikel Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>

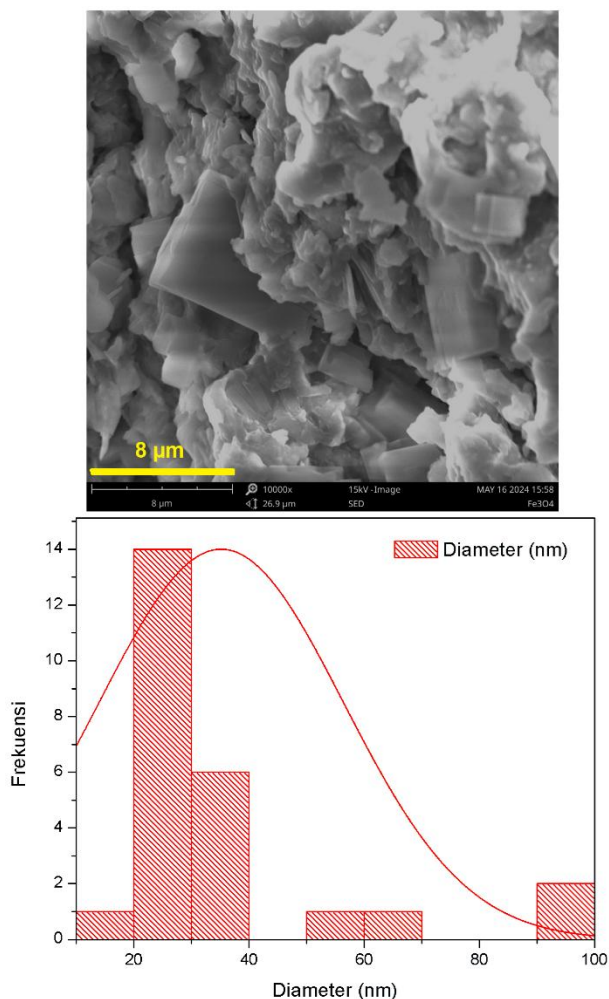
### Hasil Analisis SEM Nanopartikel Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>

Analisis *Scanning Electron Microscopy* (SEM) pada senyawa Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> dilakukan dengan perbesaran 5000x pada skala 10 μm. Hasil analisis SEM seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2 memperlihatkan morfologi permukaan Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> yang kasar dan teratur. Partikel-partikel Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> tampak teragregasi dan memiliki tepi atau sudut yang tajam sehingga memiliki bentuk yang tidak seragam. Permukaan Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> memiliki porositas atau luas permukaan yang tinggi karena memiliki banyak celah dan rongga. Permukaan yang berpori menunjukkan potensi luas permukaan yang tinggi dan dapat diaplikasikan dalam reaksi katalisis. Struktur permukaan juga mengindikasikan bahwa terdapat banyak partikel-partikel yang saling tumpang tindih. Parameter hasil SEM menunjukkan bahwa tegangan percepatan yang digunakan sebesar 10 kV untuk meminimalisir kerusakan pada sampel.



Gambar 2. Hasil SEM nanopartikel Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> pada perbesaran 5000x

Pada hasil analisis SEM dengan perbesaran 10.000x pada skala 8  $\mu\text{m}$  (Gambar 3) menunjukkan morfologi permukaan  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  yang lebih teratur dan terdapat bentuk kristal datar yang tersebar diantara agregat partikel  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ . Partikel-partikel  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  tampak teragregasi dengan bentuk yang tidak seragam dan berpori karena memiliki banyak celah dan rongga. Tegangan percepatan yang digunakan sebesar 15 kV sehingga dapat memperjelas struktur kristal  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ . Perbesaran 10.000x menunjukkan bahwa  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  memiliki struktur kristal spinel berbentuk kubus yang teramati dalam jumlah terbatas, karena tidak semua ion Fe mengalami reaksi kopresipitasi secara sempurna seperti yang dijelaskan pada analisis XRD. Selain itu, analisis menggunakan aplikasi *software* ImageJ mengungkapkan bahwa rata-rata distribusi ukuran partikel  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  yang disintesis sebesar  $\pm 35,2$  nm. Hasil ini konsisten dengan data XRD berdasarkan persamaan Debye-Scherrer yang menunjukkan bahwa ukuran partikel  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  masih berada dalam rentang nanopartikel.



**Gambar 3.** Hasil SEM pada perbesaran 10.000x dan rata-rata distribusi ukuran nanopartikel  $\text{Fe}_3\text{O}_4$

## KESIMPULAN

Berdasarkan hasil sintesis nanopartikel  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  menggunakan metode kopresipitasi dapat disimpulkan bahwa analisis XRD menunjukkan ukuran kristalit nanopartikel yang diperoleh sebesar 55,39 nm dengan kristalinitas sebesar 27,10%. Selain itu, hasil analisis SEM menunjukkan bahwa nanopartikel  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  memiliki morfologi yang kasar dan teratur dengan memiliki rata-rata distribusi ukuran partikel sebesar  $\pm 35,2$  nm dengan permukaan berpori yang disebabkan oleh celah dan rongga di antara partikel-partikelnya.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] P. V. Mira, L. Mahmudin, and I. Iqbal, "Sintesis dan Analisis Sifat Magnetik Nanopartikel Magnetit ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) Berbasis Pasir Besi," *Gravitasi*, vol. 17, no. 2, pp. 0–4, 2019, doi: 10.22487/gravitasi.v17i2.12420.
- [2] D. Tahir, N. Rauf, and H. Sari, "Sintesis Dan Karakterisasi Sifat Struktur Nanopartikel Dengan Memvariasikan Konsentrasi  $\text{NH}_4\text{OH}$  (Amonium Hidroksida)," *Jurusan Fisika FMIPA UNHAS*, vol. 4, pp. 3–5, 2010.
- [3] W. M. Daoush, "Co-Precipitation and Magnetic Properties of Magnetite Nanoparticles for Potential Biomedical Applications," *J Nanomed Res*, no. July, 2017, doi: 10.15406/jnmr.2017.05.00118.
- [4] B. Permana, T. Saragi, M. Saputri, L. Safriani, I. Rahayu, and R. Risdiana, "Sintesis Nanopartikel Magnetik dengan Metode Kopresipitasi," *Jurnal Material dan Energi Indonesia*, vol. 7, no. 2, pp. 17–20, 2017.
- [5] D. Novita and A. Astuti, "Sintesis dan Karakterisasi Sifat Optik Nanokomposit  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  CQD (Carbon Quantum Dots)," *Jurnal Fisika Unand*, vol. 12, no. 2, pp. 310–315, 2023, doi: 10.25077/jfu.12.2.310-315.2023.
- [6] R. Prasetyowati, D. Widiawati, E. Swastika, and W. Ariswan, "Synthesis and Characterization of Magnetite ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) Nanoparticles Based on Iron Sands at Glagah Beach Kulon Progo with Coprecipitation Methods at Various  $\text{NH}_4\text{OH}$  Concentrations," *J. Sains Dasar*, vol. 10, no. 2, pp. 57–61, 2021.

- [7] T. Saragi, A. S. Santika, B. Permana, N. Syakir, M. Kartawidjaja, and Risdiana, "Synthesis and Properties of Iron Oxide Particles Prepared by Hydrothermal Method," *IOP Conf Ser Mater Sci Eng*, vol. 196, p. 012025, May 2017, doi: 10.1088/1757-899X/196/1/012025.
- [8] R. Rahmawati *et al.*, "Synthesis of Magnetite (Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>) Nanoparticles from Iron sands by Co-precipitation-Ultrasonic Irradiation Methods," *Journal of Materials and Environmental Sciences*, vol. 9, no. 1, pp. 155–160, Jan. 2018, doi: 10.26872/jmes.2018.9.1.19.
- [9] M. K. Lima-Tenório, E. A. Gómez Pineda, N. M. Ahmad, H. Fessi, and A. Elaissari, "Magnetic Nanoparticles: In Vivo Cancer Diagnosis and Therapy," *Int J Pharm*, vol. 493, no. 1–2, pp. 313–327, Sep. 2015, doi: 10.1016/j.ijpharm.2015.07.059.
- [10] W. Wu, C. Z. Jiang, and V. A. L. Roy, "Designed Synthesis and Surface Engineering Strategies of Magnetic Iron Oxide Nanoparticles for Biomedical Applications," *Nanoscale*, vol. 8, no. 47, pp. 19421–19474, 2016, doi: 10.1039/C6NR07542H.
- [11] M. O. Besenhard *et al.*, "Co-precipitation Synthesis of Stable Iron Oxide Nanoparticles with NaOH: New Insights and Continuous Production via Flow Chemistry," *Chemical Engineering Journal*, vol. 399, p. 125740, Nov. 2020, doi: 10.1016/j.cej.2020.125740.
- [12] J. Baumgartner *et al.*, "Nucleation and Growth of Magnetite from Solution," *Nat Mater*, vol. 12, no. 4, pp. 310–314, Apr. 2013, doi: 10.1038/nmat3558.
- [13] S. Sun, D. Gebauer, and H. Cölfen, "Alignment of Amorphous Iron Oxide Clusters: A Non-Classical Mechanism for Magnetite Formation," *Angewandte Chemie International Edition*, vol. 56, no. 14, pp. 4042–4046, Mar. 2017, doi: 10.1002/anie.201610275.
- [14] M. M. Ba-Abbad, A. Benamour, D. Ewis, A. W. Mohammad, and E. Mahmoudi, "Synthesis of Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> Nanoparticles with Different Shapes Through a Co-Precipitation Method and Their Application," *JOM*, vol. 74, no. 9, pp. 3531–3539, Sep. 2022, doi: 10.1007/s11837-022-05380-3.
- [15] Hariani, P.J., Faizal, M., Ridwan, Marsi, and Setiabudidaya, D, "Synthesis and Properties of Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> Nanoparticles by Co-precipitation Method to Removal Procion Dye," *International Journal of Environmental Science and Development*, vol. 4, no. 3, pp. 336-240, June 2013, doi: 10.7763/IJESD.2013.V4.366.
- [16] Gui-Yin, Li *et al.*, "Kinetics of adsorption of *Saccharomyces cerevisiae* mandelated dehydrogenase on magnetic Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>-chitosan nanoparticles," *Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects*, vol. 320, pp. 11–18, 2008, doi: 10.1016/j.colsurfa.2008.01.017.
- [17] Thanh Hieu, Ngo *et al.*, "Facile and solvent-free routes for the synthesis of size-controllable Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> nanoparticles," *Adv. Nat. Sci.: Nanosci. Nanotechnol.* vol. 1, pp. 035001, 2010, doi: 10.1088/2043-6254/1/3/035001.
- [18] Kristina. N.P.D., Arjana. I.G., Yasa, P., "Synthesis and Characterization of Magnetite Nanomaterials in Tianyar Iron Sand Using Co-precipitation Method," *Indonesian Physical Review*, vol. 7, no. 3, pp. 398-413, 2024, doi: 10.29303/ipr.v7i3.328.
- [19] Bao, Nan *et al.*, "Novel Synthesis of Plasmonic Ag/AgCl@TiO<sub>2</sub> Continues Fibers with Enhanced Broadband Photocatalytic Performance," *Catalysts*, vol. 7, no. 4, pp. 117, 2017, doi: 10.3390/catal7040117.