

Pengaruh Rasio Fe(III)/Fe(II) terhadap Sifat Nanopartikel Magnetit dari Pasir Besi Alam melalui Metode Kopresipitasi

Jihan Fatia^{1*}, Ridwan Yusuf Lubis², Miftahul Husnah³

^{1,2,3} Fisika, Fakultas Sains Dan Teknologi, Universitas Islam Negeri Sumatera Utara, Indonesia
Email: ¹ jihan.fatia2002@gmail.com

Abstrak

Kebutuhan material magnetik berbasis sumber alam mendorong sintesis nanopartikel magnetit (Fe_3O_4) dari pasir besi. Kebutuhan akan material magnetik berbasis sumber alam yang efisien dan bernilai tambah tinggi mendorong penelitian terhadap sintesis nanopartikel magnetit dari pasir besi. Magnetit (Fe_3O_4) merupakan material yang banyak diaplikasikan dalam bidang katalis, biomedis, dan pemisahan magnetik karena sifat superparamagnetik, kestabilan kimia, serta biokompatibilitasnya. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh variasi rasio Fe(III)/Fe(II) terhadap karakteristik nanopartikel magnetit yang disintesis dari pasir besi alam melalui metode kopresipitasi. Variasi rasio yang digunakan meliputi 1:1, 1:2, 2:1, dan 1:3 (v/v), diikuti proses pengeringan pada 200 °C selama 1 jam. Karakterisasi dilakukan menggunakan XRF, XRD, SEM, dan UV-Vis. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pasir besi memiliki kandungan Fe yang tinggi sehingga potensial sebagai bahan baku. Variasi rasio Fe(III)/Fe(II) terbukti memengaruhi struktur kristal, ukuran kristalit, dan morfologi partikel, dengan rasio 2:1 menghasilkan karakteristik terbaik berupa struktur spinel kubik dan ukuran kristalit paling kecil. Selain itu, nanopartikel menunjukkan morfologi relatif bulat dan sifat optik yang khas pada rentang UV. Penelitian ini memberikan kontribusi dalam pengembangan sintesis nanopartikel magnetit berbasis sumber daya alam melalui optimasi rasio prekursor untuk memperoleh karakteristik material yang lebih baik.

Kata kunci: Fe_3O_4 , pasir besi, rasio Fe(III)/Fe(II), metode kopresipitasi.

Abstract

The demand for magnetic materials derived from natural resources has driven the synthesis of magnetite (Fe_3O_4) nanoparticles from iron sand. Magnetite (Fe_3O_4) is widely applied in catalysis, biomedicine, and magnetic separation due to its superparamagnetic properties, chemical stability, and biocompatibility. This study aims to analyze the effect of Fe(III)/Fe(II) ratio variation on the characteristics of magnetite nanoparticles synthesized from natural iron sand using the coprecipitation method. The applied ratios were 1:1, 1:2, 2:1, and 1:3 (v/v), followed by a drying process at 200 °C for 1 hour. Characterization was carried out using XRF, XRD, SEM, and UV-Vis. The results show that the iron sand contains a high Fe content, indicating its strong potential as a raw material. The variation in Fe(III)/Fe(II) ratio significantly affects the crystal structure, crystallite size, and particle morphology, with the 2:1 ratio producing the best characteristics, including a cubic spinel structure and the smallest crystallite size. In addition, the nanoparticles exhibit relatively spherical morphology and distinct optical properties in the UV range. This study contributes to the development of magnetite nanoparticle synthesis from natural resources through optimization of precursor ratios to achieve improved material characteristics.

Keywords: Fe_3O_4 , iron sand, Fe(III)/Fe(II) ratio, coprecipitation method.

1. PENDAHULUAN

Perkembangan industri modern yang pesat telah meningkatkan pencemaran lingkungan, khususnya pada perairan akibat limbah industri seperti zat pewarna yang sulit terurai dan berbahaya bagi ekosistem. Polutan pewarna menjadi salah satu masalah utama dalam air limbah kontaminasi pewarna pada sumber daya air menjadi isu serius karena sebagian besar pewarna sulit terurai dan dapat membahayakan kehidupan akuatik, berbagai metode pengolahan limbah telah dikembangkan, namun sebagian besar masih memiliki

keterbatasan, seperti pengolahan air limbah melalui koagulasi atau penyerapan karbon aktif, terbukti tidak efisien, karena mereka hanya memindahkan molekul pewarna dari fase cair ke fase padat, para peneliti telah mengeksplorasi metode alternatif untuk mengolah air limbah tekstil, termasuk fotokatalis. Oleh karena itu, diperlukan material yang mampu meningkatkan efisiensi proses pengolahan limbah, salah satunya melalui teknologi fotokatalis berbasis nanomaterial karena metode ini lebih ramah lingkungan. Dalam proses fotokatalis luas permukaan sangat berperan penting dalam degradasi. Nanomaterial, dengan efek ukuran kuantumnya, menawarkan luas permukaan yang lebih besar, sehingga meningkatkan efisiensi konversi. (Prasetyowati *et al.*, 2024).

Nanomaterial magnetik seperti TiO_2 , ZnO , dan Fe_3O_4 telah menjadi semikonduktor yang menjanjikan untuk berbagai aplikasi karena biokompatibilitasnya, kemudahan sintesis, dan efektivitas biayanya. Selain itu, nanopartikel Fe_3O_4 memiliki sifat superparamagnetik dengan magnetisasi tinggi, yang memungkinkan pemisahan magnetik yang mudah dalam larutan. Nanopartikel magnetik, khususnya magnetit (Fe_3O_4), menjadi material yang menarik karena memiliki sifat superparamagnetik, luas permukaan tinggi, stabil secara kimia, serta mudah dipisahkan secara magnetik. Selain itu, Fe_3O_4 banyak diaplikasikan dalam bidang katalis, biomedis, dan pemisahan magnetik. Karakteristik nanopartikel sangat dipengaruhi oleh ukuran, morfologi, serta struktur kristalnya, yang dapat dikontrol melalui metode sintesis dan parameter reaksi (Ningtyas *et al.*, 2024).

Salah satu metode sintesis yang banyak digunakan adalah metode kopresipitasi karena prosesnya sederhana, efisien, dan mampu menghasilkan partikel berukuran nano (Febriliani *et al.*, 2025). Beberapa penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa parameter sintesis seperti konsentrasi basa, penggunaan surfaktan, serta rasio prekursor Fe(II)/Fe(III) berpengaruh terhadap sifat nanopartikel yang dihasilkan. Misalnya, variasi rasio Fe(II)/Fe(III) dilaporkan memengaruhi ukuran kristalit dan struktur kristal Fe_3O_4 , sehingga diperlukan optimasi rasio untuk memperoleh karakteristik yang optimal (Sinurat *et al.*, 2021).

Meskipun demikian, kajian mengenai pengaruh variasi rasio Fe(III)/Fe(II) yang disintesis dari pasir besi alam sebagai sumber bahan baku masih terbatas, khususnya dalam kaitannya dengan karakteristik struktur, morfologi, dan sifat optik nanopartikel (Putra, 2023). Selain itu, pemanfaatan pasir besi lokal sebagai sumber Fe_3O_4 juga memiliki potensi besar namun belum banyak dieksplorasi secara optimal (Agelia *et al.*, 2025).

Berdasarkan hal tersebut, penelitian ini memiliki kebaruan (novelty) pada penggunaan pasir besi alam sebagai sumber bahan baku serta kajian sistematis terhadap pengaruh variasi rasio Fe(III)/Fe(II) terhadap karakteristik nanopartikel magnetit yang dihasilkan melalui metode kopresipitasi (Juliandi *et al.*, 2022).

Tujuan penelitian ini adalah untuk menganalisis pengaruh variasi rasio Fe(III)/Fe(II) terhadap karakteristik struktur, morfologi, dan sifat optik nanopartikel magnetit (Fe_3O_4) yang disintesis dari pasir besi alam menggunakan metode kopresipitasi, serta menentukan rasio optimal yang menghasilkan karakteristik terbaik.

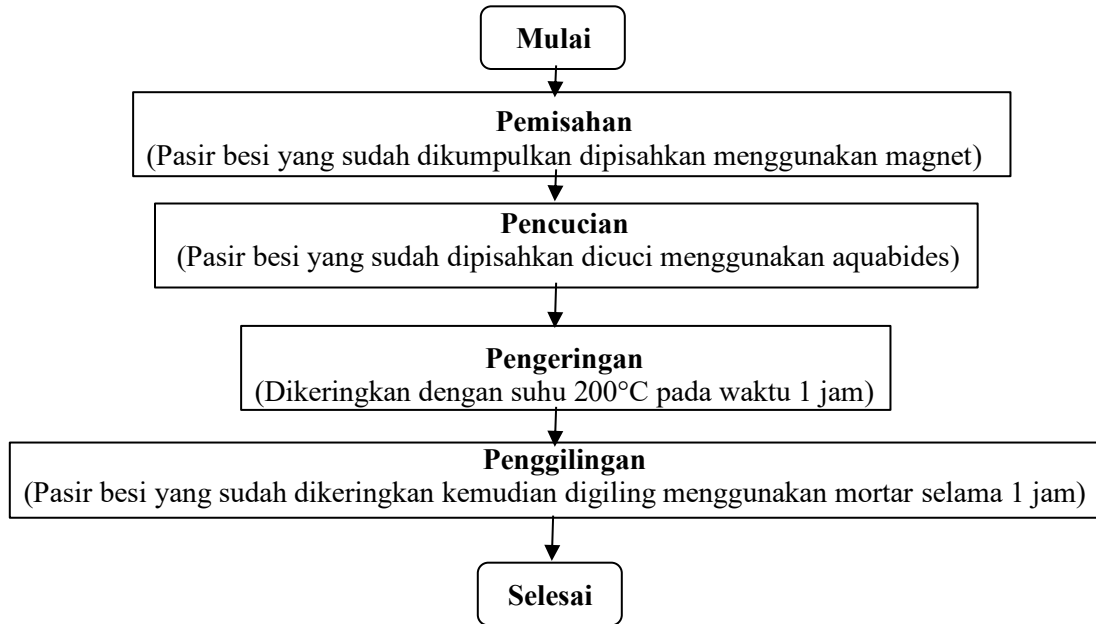
2. METODE PENELITIAN

Metode penelitian yang digunakan dalam artikel ini yaitu menggunakan metode kopresipitasi juga melakukan pendekatan secara kuantitatif. Nanopartikel disintesis dengan mencampurkan FeCl_2 dan FeCl_3 . Penelitian ini dilakukan pada semester genap TA 2025 di Laboratorium Fisika Dasar UINSU Medan. Beralamat di Jalan Lap. Golf No. 120, Kp. Tengah, Kec. Pancur Batu, Kabupaten Deli Serdang, Sumatera Utara. proses pengujian SEM dan XRD dilakukan di Laboratorium Terpadu Universitas Syiah Kuala. Proses pengujian UV-Vis dilakukan di Laboratorium Penelitian Sentral Universitas Negeri Padang.

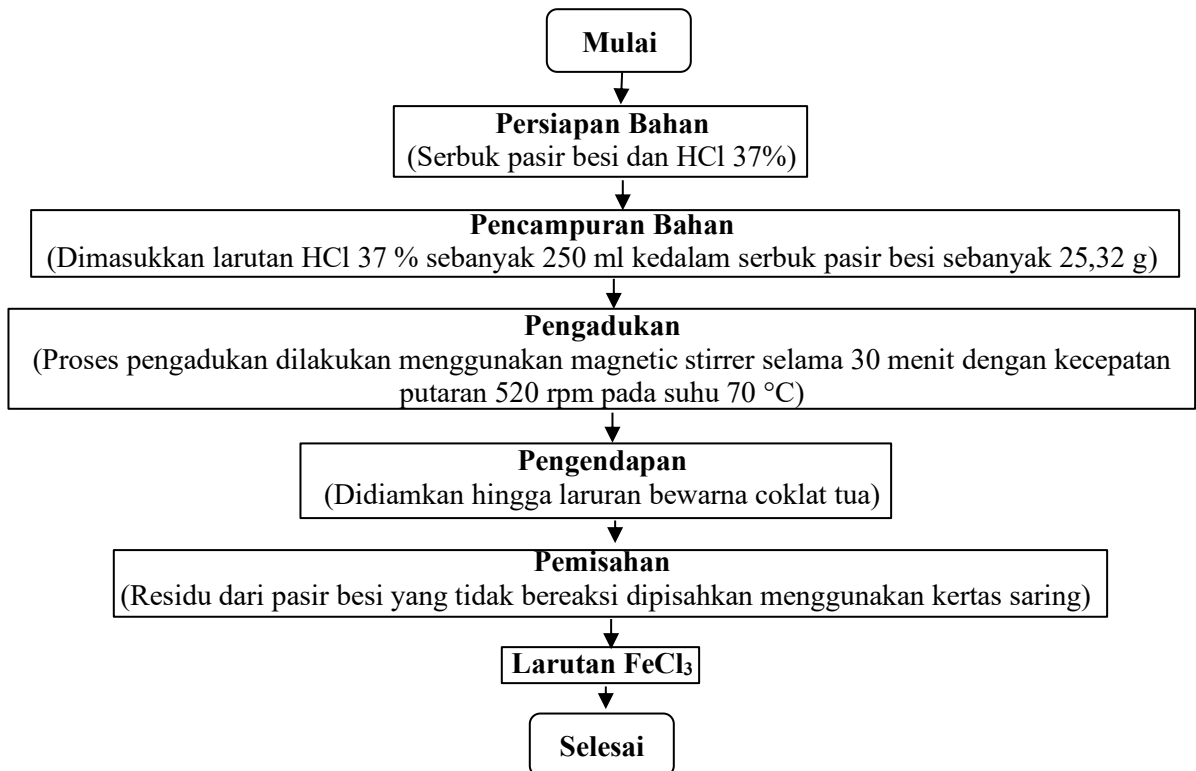
Alat yang digunakan dalam penelitian adalah alat alat gelas, timbangan analitik, hotplate, mortar, PH meter, pipet tetes, kertas saring, oven, magnet.

Bahan yang digunakan dalam penelitian yaitu pasir besi diambil dari pantai romantis Kabupaten Serdang Bedagai, amonium hidroksida (NH_4OH), asam klorida (HCl), pasir besi, aquabidest, aquades, wol baja, dietilamina, surfaktan (asam oleat)

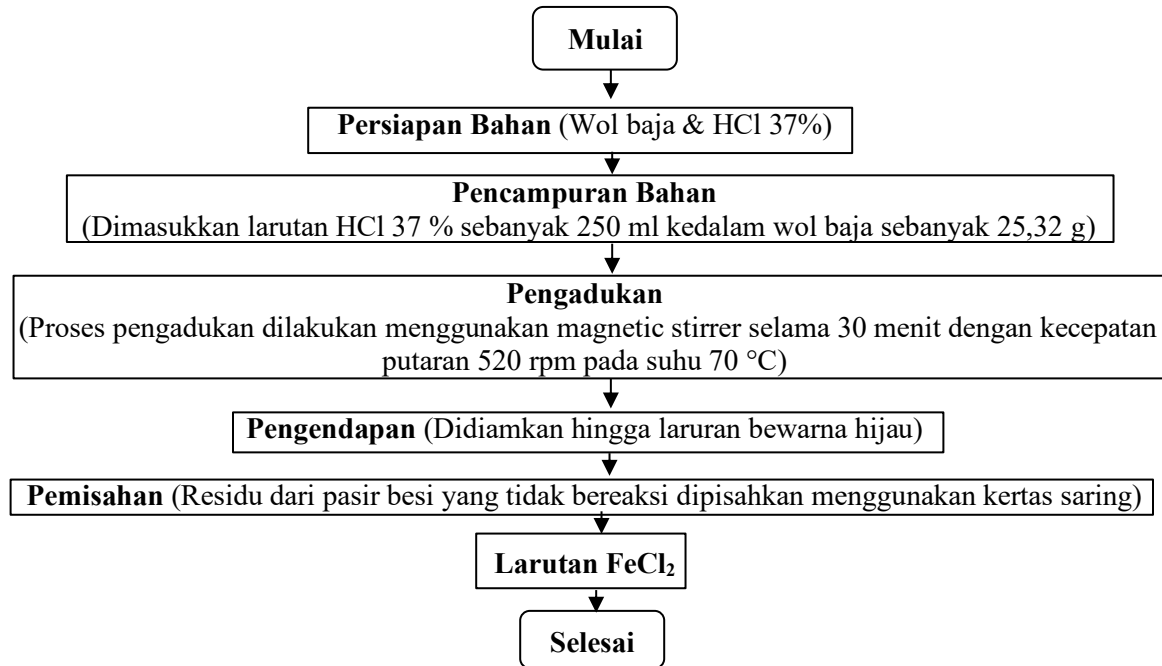
Adapun diagram alir prosedur penelitian dapat dilihat pada Gambar 1, Gambar 2, Gambar 3 dan Gambar 4.



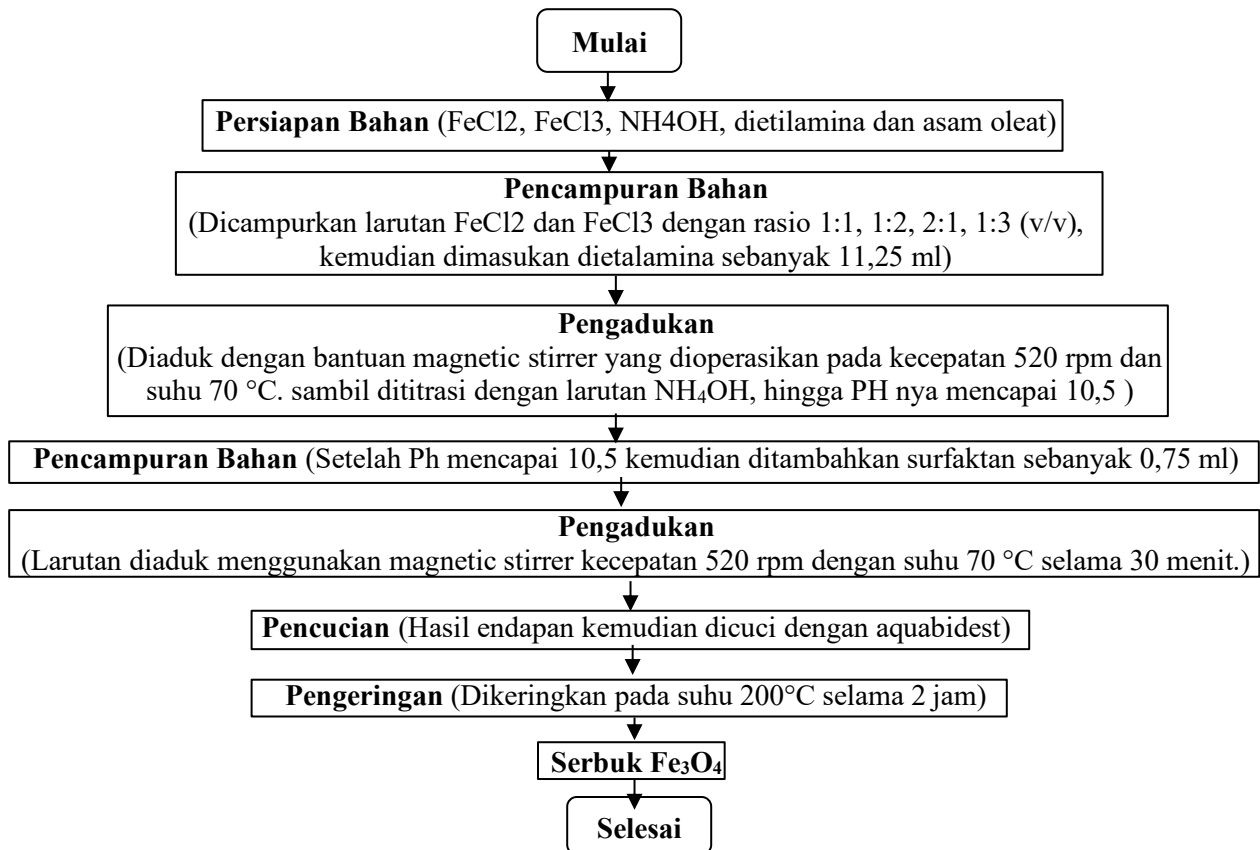
Gambar 1. Diagram Alir Pembuatan Serbuk Pasir Besi



Gambar 2. Diagram Alir Pembuatan FeCl₃



Gambar 3. Diagram Alir Pembuatan FeCl₂



Gambar 4. Diagram Alir Pembuatan Fe₃O₄

Karakteristik nanopartikel dianalisis melalui identifikasi fasa kristalin, morfologi, dan sifat fotokatalitiknya menggunakan alat *X ray Fluorescence* (XRF), *X-Ray Diffractometer* (XRD), *Scanning Electron Microscope* (SEM), dan *Ultraviolet-Visible* (UV-Vis) *Spektrofotometer*.

2.1 *X ray Fluorescence* (XRF)

XRF mendefinisikan suatu pendekatan analisis nondestruktif yang diperuntukkan menentukan komposisi unsur suatu bahan padat ataupun cair. Pengujian *X ray Fluorescence* (XRF) digunakan untuk mengetahui komposisi unsur dan senyawa oksida yang terkandung dalam bahan baku pasir besi alam sebelum dilakukan proses sintesis nanopartikel magnetit. Analisis ini bertujuan untuk memastikan kandungan unsur besi (Fe) sebagai komponen utama serta unsur-unsur lain yang berperan sebagai pengotor atau unsur pendukung dalam proses pembentukan magnetit (Fe_3O_4) (Sembiring et al., 2025).

Dalam XRF, sinar-X fluoresen dihasilkan ketika sampel disinari sinar-X primer dari tabung sinar-X yang dioperasikan dengan tegangan listrik 1200 volt. Saat tabung sinar-X memaparkan radiasi ke material, elektron tereksitasi dan memancarkan sinar-X khas, yang kemudian dideteksi, diperkuat, dan dianalisis. Nilai energi maksimum sinar-X primer ditentukan oleh tegangan dan arus listrik yang digunakan (Bahfie et al., 2022).



Gambar 5. Alat XRF

2.2 X-Ray Diffractometer (XRD)

Teknik difraksi sinar-X memungkinkan identifikasi dan kuantifikasi berbagai struktur kristal dalam senyawa pada sampel serbuk atau padat tanpa merusaknya. X-ray difraksi memungkinkan analisis susunan kristal dari suatu sampel.

Proses Fenomena difraksi muncul ketika sinar-X berinteraksi dan dipantulkan oleh suatu bahan. Pada saat sinar-X menabrak bidang-bidang paralel yang berjarak d , pantulan sinar dapat saling berinterferensi secara konstruktif, memperkuat intensitas pemantulan berkas cahaya menghasilkan difraksi, yang selanjutnya dijelaskan oleh hubungan panjang gelombang lintasan berkas cahaya berdasarkan Hukum Bragg yang merupakan prinsip dari XRD.

$$n\lambda = 2d \sin \theta$$

Keterangan:

d = Jarak antar atom (Å)

θ = Sudut (°)

n = Bilangan bulat (1,2,3....)

λ = Panjang gelombang sinar-X (1,54 Å)

XRD bekerja dengan memanfaatkan susunan atom dalam senyawa yang tersusun pada bidang-bidang tertentu. Bidang dengan konfigurasi tertentu akan memantulkan atau membiaskan foton yang datang pada sudut tertentu sehingga terbentuk pola khas. Artinya, cahaya (foton) yang datang pada sudut tertentu terhadap bidang dengan konfigurasi tertentu hanya menghasilkan satu pola refleksi atau refraksi yang konsisten. XRD dapat memberikan informasi tambahan mengenai ukuran kristal. Ukuran kristal rata-rata dapat dihitung dengan pelebaran puncak-puncak difraksi menggunakan persamaan Scherrer (Muttaqin, 2023).

$$D = K\lambda/\beta \cos \theta$$

Keterangan:

D = Ukuran kristal (nm)

K = Konstanta kristal (0,94)

λ = Panjang gelombang (1,54 Å)

β = FWHM

θ = Sudut puncak (°)



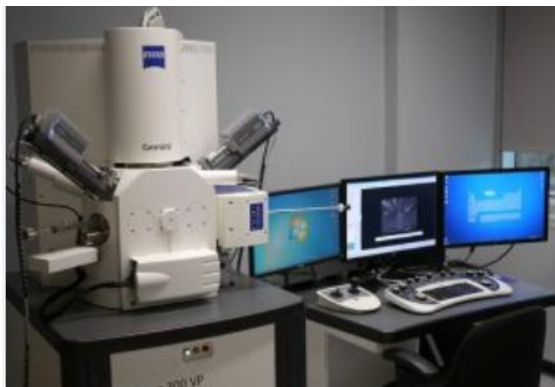
Gambar 6. Alat XRD

2.3 Scanning Electron Microscope (SEM)

SEM sering digunakan untuk mengamati struktur morfologi permukaan, dan pemetaan kandungan berbagai jenis sampel mulai dari bahan alam, organik, anorganik, polimer, logam hingga sampel biologi sampel dengan tingkat pembesaran yang tinggi, menggunakan sinar elektron berenergi tinggi. Pengamatan SEM dilakukan dalam kondisi vakum yang tinggi sehingga cukup sulit untuk mengamati sampel biologi yang secara alami memiliki kandungan air yang tinggi dan memiliki struktur yang rapuh karena memiliki banyak pori didalamnya (Salsabila Lubis *et al.*, 2025).

Metode SEM memanfaatkan berkas elektron berenergi tinggi untuk memindai permukaan objek pada tingkat pembesaran yang besar, sehingga mampu menghasilkan citra detail serta informasi komposisi

sampel. Panjang gelombang berkas elektron yang jauh lebih pendek dibandingkan cahaya tampak menjadikan resolusi gambar yang diperoleh lebih tinggi daripada mikroskop optik (Sahdiah & Kurniawan, 2023).



Gambar 7. Alat SEM

2.4 Ultraviolet-Visible (UV-Vis) Spectrofotometer

Spektrofotometer UV-Vis digunakan untuk menganalisis absorbansi sampel terhadap sinar ultraviolet dan cahaya tampak. Sinar ultraviolet memiliki rentang panjang gelombang 200–400 nm, sedangkan cahaya tampak berada pada rentang 400–800 nm. Cahaya berenergi stabil dipisahkan panjang gelombangnya oleh monokromator. Celah menuju wadah sampel berukuran sangat sempit sehingga hanya cahaya dengan rentang panjang gelombang tertentu yang dapat melewatinya. Cahaya yang lolos dari sampel ditangkap oleh detektor, kemudian energi radiasi tersebut dikonversi menjadi sinyal Listrik terukur (Lenni *et al.*, 2025).



Gambar 8. Alat UV-Vis

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Secara teoritis, pembentukan magnetit (Fe_3O_4) melalui metode kopresipitasi sangat dipengaruhi oleh rasio Fe^{3+} dan Fe^{2+} , di mana rasio stoikiometri ideal adalah 2:1 ($\text{Fe}^{3+}:\text{Fe}^{2+}$). Ketidaksesuaian rasio ini dapat menyebabkan terbentuknya fasa lain atau menurunkan kristalinitas material (Wicaksono *et al.*, 2024).

Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa sampel dengan rasio 2:1 menghasilkan karakteristik terbaik, yang sejalan dengan penelitian sebelumnya yang menyatakan bahwa rasio mendekati stoikiometri menghasilkan struktur kristal yang lebih stabil dan ukuran kristalit yang lebih kecil. Perbedaan hasil antar sampel dapat disebabkan oleh variasi konsentrasi ion, kondisi pH, serta laju nukleasi dan pertumbuhan

kristal selama proses sintesis. Dengan demikian, hasil penelitian ini konsisten dengan teori pembentukan magnetit. Adapun pengujian sampel yang dilakukan dengan *X-Ray Fluorescence* (XRF) dilakukan hanya pada sampel pasir besi untuk mengetahui kandungan unsur yang terdapat di dalamnya. Sampel hasil sintesis selanjutnya diuji menggunakan *X-Ray Diffractometer* (XRD), *Scanning Electron Microscope* (SEM), dan *Ultraviolet-Visible Spectrophotometer* (UV-Vis). Hasil pengujian selanjutnya dianalisis sebagai berikut:

3.1 X ray Fluorescence (XRF)

Tabel 1. Hasil pengujian XRF sampel pasir besi

Unsur	Persen berat relatif (%)	Unsur	Persen berat relatif (%)
Cu	0,006	Mn	0,581
Ni	0,006	Al	0,663
Cr	0,054	Ca	0,946
Cl	0,068	Si	1,007
K	0,093	Mg	1,45
Zn	0,174	Ti	5,722
P	0,485	Fe	88,234
V	0,511		

Hasil analisis XRF menunjukkan bahwa pasir besi alam memiliki kandungan Fe tertinggi sebesar 88,234%, dengan pengotor utama berupa Ti (5,722%), Mg (1,45%), Si (1,007%), Ca (0,946%), dan Al (0,663%). Kandungan Fe yang tinggi menunjukkan pasir besi sangat potensial sebagai sumber bahan baku Fe₃O₄. Unsur pengotor seperti Ti dan Mg berperan kecil terhadap proses pembentukan magnetit namun dapat sedikit menurunkan kemurnian kristal (Khairunnisa *et al.*, 2024). Dapat dilihat pada Tabel 1.

3.2 X-Ray Diffractometer (XRD)

Pengujian *X-ray Diffractometer* (XRD) bertujuan untuk mengetahui struktur dan fasa yang terdapat pada sampel dan dilakukan menggunakan mesin Shimadzu XRD-7000. Karakterisasi ini dilakukan sebanyak 4 sampel yaitu 1:1, 1:2, 2:1 dan 1:3.

Tabel 2. Jarak antar atom dan ukuran kristal sampel Fe₃O₄

Sampel	d (Å)	FWHM (rad)	D (nm)
1:1	2,79	0,00843	18,31
1:2	2,53	0,00843	18,23
2:1	2,53	0,00934	16,30
1:3	2,51	0,00842	18,08

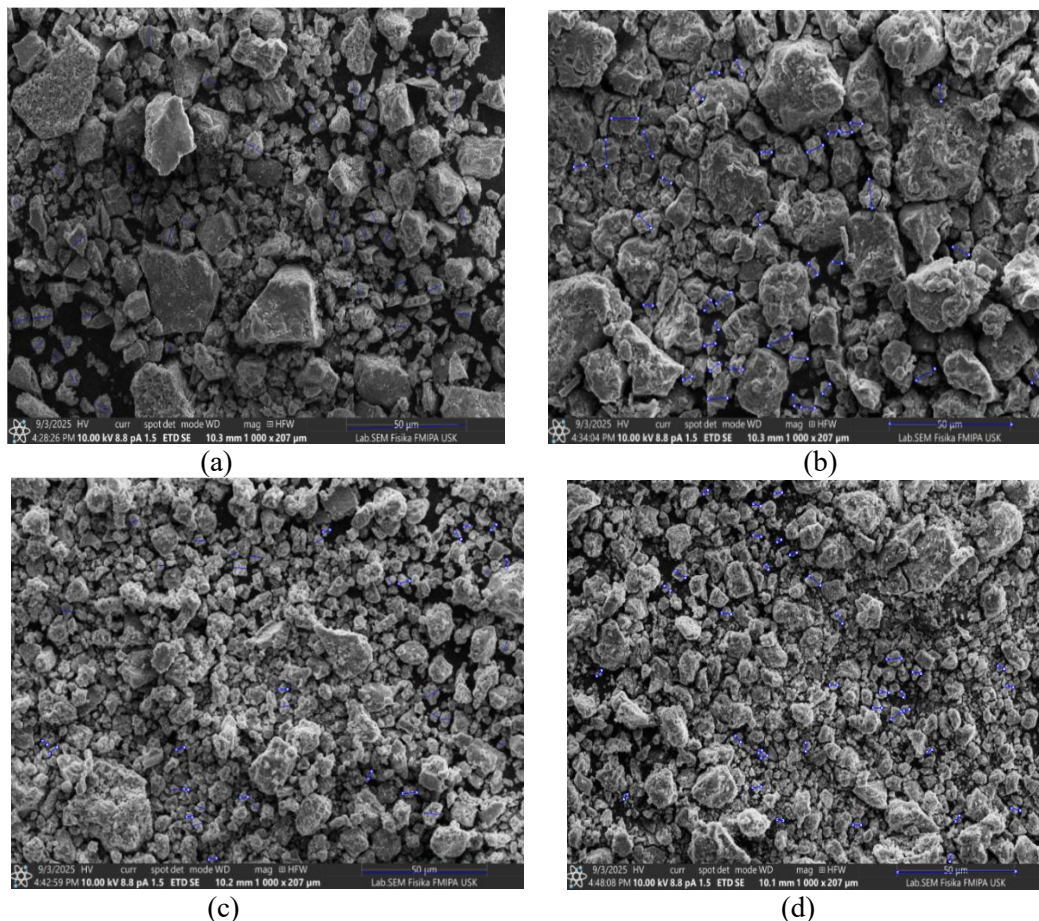
Hasil karakterisasi XRD menunjukkan bahwa sampel dengan rasio 2:1 memiliki ukuran kristalit terkecil yaitu sekitar 16,30 nm. Ukuran kristalit yang kecil ini mengindikasikan bahwa proses nukleasi lebih dominan dibandingkan pertumbuhan kristal (Agelia *et al.*, 2025), sehingga menghasilkan partikel yang lebih halus. Berdasarkan intensitas puncak pada indeks Miller (311), perhitungan menggunakan persamaan

Scherrer menunjukkan bahwa ukuran kristalit nanopartikel Fe_3O_4 meningkat seiring dengan bertambahnya rasio FeCl_2 .

Secara teoritis, ukuran kristalit yang lebih kecil akan meningkatkan luas permukaan spesifik material. Hal ini menyebabkan partikel cenderung memiliki distribusi yang lebih merata dan meningkatkan reaktivitasnya. Sebaliknya, ukuran kristalit yang lebih besar dapat menyebabkan terjadinya aglomerasi, yang terlihat dari morfologi SEM yang lebih tidak seragam.

3.3 Scanning Electron Microscope (SEM)

Pengujian *Scanning Electron Microscope* (SEM) digunakan untuk menganalisis bentuk morfologi dan ukuran butir dari Fe_3O_4 . Perbesaran yang dilakukan pada sampel yaitu 5000 kali yang dapat dilihat pada Gambar 9.



Gambar 9. SEM perbesaran 5000 kali sampel (a) 1:1, (b) 1:2, (c) 2:1, (d) 1:3

Sampel (a) menampilkan partikel besar yang saling menggumpal dan tidak beraturan, Sampel (b) menunjukkan partikel lebih kecil namun masih mengalami aglomerasi, Sampel (c) memperlihatkan morfologi sferis yang lebih homogen dan berpori, menandakan partikel dengan distribusi ukuran lebih seragam, Sampel (d) menampilkan campuran partikel halus dan kasar, menunjukkan pembentukan kristal tidak sepenuhnya sempurna.

Ukuran rata-rata butir pada sampel 2:1 berada pada kisaran 1–7 μm dengan distribusi yang sempit, menunjukkan pertumbuhan partikel terkendali dan kestabilan morfologi yang baik. Jika dikaitkan dengan hasil SEM, morfologi partikel yang diamati berbentuk relatif bulat dan berukuran kecil. Hubungan antara kedua hasil ini menunjukkan bahwa ukuran kristalit yang kecil dari analisis XRD berkontribusi terhadap terbentuknya morfologi partikel yang lebih homogen dan tidak terlalu teraglomerasi (Syihabuddin & Munasir, 2024).

3.4 Ultraviolet-Visible (UV-Vis) Spectrophotometer

UV-Vis adalah alat yang digunakan untuk mengetahui nilai energi celah pita (*band gap energy*, E_g). Karakterisasi dilakukan sebanyak 4 sampel yaitu 1:1, 1:2, 2:1 dan 1:3.

Tabel 3. Hasil Nilai Energi Gap

Sampel	Energi gap (eV)
1:1	1,52
1:2	2,63
2:1	2,64
1:3	2,63

Hasil analisis UV-Vis menunjukkan bahwa nanopartikel Fe_3O_4 memiliki nilai band gap berkisar antara 1,52–2,64 eV. Nilai ini menunjukkan bahwa material berada dalam kategori semikonduktor.

Nilai band gap tersebut memiliki implikasi penting terhadap potensi aplikasi material. Band gap yang relatif kecil memungkinkan material menyerap cahaya pada wilayah visible hingga UV, sehingga berpotensi digunakan sebagai fotokatalis dalam degradasi polutan. Hal ini sejalan dengan teori bahwa semakin kecil band gap, semakin mudah elektron tereksitasi dari pita valensi ke pita konduksi, sehingga meningkatkan aktivitas fotokatalitik (Dwiriani *et al.*, 2025).

Dari hasil tersebut dapat disimpulkan bahwa terjadi peningkatan nilai energi band gap, sedangkan pada rasio 1:2, 2:1 dan 1:3 nilai band gap relatif konstan. Perubahan nilai energi band gap yang terjadi menunjukkan adanya pengaruh komposisi Fe terhadap struktur dan sifat optik material. Nilai energi band gap yang meningkat pada sampel 1:2 hingga 1:3 menunjukkan bahwa 37 perbandingan komposisi unsur dapat memengaruhi tingkat keteraturan struktur kristal dan interaksi antar atom dalam kisi.

Selain itu, variasi nilai band gap antar sampel dapat dikaitkan dengan ukuran partikel dan efek kuantum. Ukuran kristalit yang lebih kecil cenderung menyebabkan pergeseran energi (quantum size effect), yang dapat memicu perubahan band gap (blue shift atau red shift). Oleh karena itu, sampel dengan ukuran kristalit terkecil berpotensi memiliki sifat optik yang lebih baik untuk aplikasi fotokatalis atau sensor optik (Prasetyowati *et al.*, 2024).

Dengan demikian, analisis UV-Vis tidak hanya menunjukkan nilai band gap, tetapi juga memberikan gambaran potensi aplikasi material Fe_3O_4 dalam bidang lingkungan dan teknologi.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian, dapat disimpulkan bahwa variasi rasio Fe(III)/Fe(II) berpengaruh signifikan terhadap karakteristik struktur, morfologi, dan sifat optik nanopartikel magnetit (Fe_3O_4) yang dihasilkan melalui metode kopresipitasi.

Rasio 2:1 merupakan kondisi terbaik dalam penelitian ini karena menghasilkan nanopartikel dengan kristalinitas yang lebih baik, ukuran kristalit yang lebih kecil, serta morfologi partikel yang lebih

homogen. Kondisi ini menunjukkan bahwa rasio tersebut mendekati komposisi stoikiometri pembentukan Fe_3O_4 , sehingga proses pembentukan kristal berlangsung lebih optimal.

Selain itu, karakteristik optik yang dihasilkan juga mendukung potensi aplikasi material sebagai semikonduktor, khususnya dalam bidang fotokatalisis, karena mampu menyerap energi cahaya dengan baik.

Dengan demikian, rasio Fe(III)/Fe(II) menjadi parameter kunci dalam menentukan kualitas nanopartikel Fe_3O_4 , di mana rasio yang sesuai akan menghasilkan material dengan sifat yang lebih optimal.

DAFTAR PUSTAKA

- Agelia, D., Situmorang, B., Lubis, R. Y., & Husnah, M. (2025). Karakterisasi Dan Aktivitas Fotokatalitik Green Synthesized Nanokomposit $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{Tio}_2$ Menggunakan Ekstrak Daun Kelor Untuk Degradasi. *Jurnal Rekayasa Material, Manufaktur Dan Energi*, 8(1). <https://doi.org/10.30596/rmme.v8i1.21753>
- Bahfie, F., Edi, A. H., & Muhammad, Iqbal Alfarisy La, O. A. (2022). PENGOLAHAN PASIR BESI UNTUK MENINGKATKAN KADAR TITANIUM (Ti) DENGAN METODE PEMISAHAN MAGNETIK SECARA BASAH. *Inovasi Pembangunan: Jurnal Kelitbangan*, 10(03), 237. <https://doi.org/10.35450/jip.v10i03.323>
- Dwiriani, D., Zidan Efendi, M., Aritonang, R., & Lestari, T. U. (2025). Band Gap Energy Characteristics In Materials. *Journal of Frontier Research in Science and Engineering (JoFRISE)*, 3(2012), 36–44.
- Febriani, A., Rama Denny, Y., & Antarnusa, G. (2025). Analisis XRD Nanopartikel Fe_3O_4 Dengan Variasi Suhu Sintesis. *Jurnal FisTa : Fisika Dan Terapannya*, 6(1), 14–18.
- Juliandi, J., Novika, S., Wahyuni, D., & Rambe, A. M. (2022). Struktur Kristal dan Morfologi Nanokomposit $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-ZnO}$. *Prosiding Hasil Seminar Penelitian*, 3–7.
- Khairunnisa, U., Lubis, R. Y., & Jumiati, E. (2024). Karakterisasi Pasir Besi Dan Sifat Magnetik Pantai Romantis Kabupaten Serdang Bedagai. *Saintifik*, 10(2), 276–282. <https://doi.org/10.31605/saintifik.v10i2.505>
- Lenni, N., Yusuf Lubis, R., & Masthura. (2025). Material Nanopartikel Fotokatalis $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$ Untuk Degradasi Methylene Blue. *Jurnal Rekayasa Material, Manufaktur Dan Energi*, 8(1). <https://doi.org/10.30596/rmme.v8i1.21752>
- Muttaqin, R. (2023). Pengembangan Buku Panduan Teknik Karakterisasi Material : X-ray Diffractometer (XRD) Panalytical Xpert3 Powder. *Indonesian Journal of Laboratory*, 1(1), 9. <https://doi.org/10.22146/ijl.v1i1.78970>
- Ningtyas, R. D., Yanti, D. D., Amin, A. K., & Aji, A. (2024). Fabrication of a $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{CS}/\text{AgNPs}$ Composite from Indigenous Iron Sand for Enhanced Methylene Blue Adsorption. *Journal of Cluster Science*, 35(5), 1463–1480. <https://doi.org/10.1007/s10876-024-02594-0>
- Prasetyowati, R., Harahap, E. F. M., Saputri, R. I., Swastika, P. E., Fauzi, F., Supardi, Warsono, Ariswan, & Dwandaru, W. S. B. (2024). Degradation of methyl orange dye using $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{GO}$ photocatalyst with iron derived from coastal Glagah Kulon Progo ore. *Nano-Structures and Nano-Objects*, 38(March), 101153. <https://doi.org/10.1016/j.nanoso.2024.101153>
- Putra, I. (2023). Identifikasi Kandungan Fe Pada Pasir Besi Hasil Proses Konsentrasi Menggunakan Sluice Box. *Jurnal Cahaya Mandalika*, 256–272.
- Sahdiah, H., & Kurniawan, R. (2023). Optimasi Tegangan Akselerasi pada Scanning Electron Microscope – Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy (SEM-EDX) untuk Pengamatan Morfologi Sampel Biologi. *Jurnal Sains Dan Edukasi Sains*, 6(2), 117–123. <https://doi.org/10.24246/juses.v6i2p117-123>
- Salsabila Lubis, H., Yusuf Lubis, R., & Halim Daulay, A. (2025). Sintesis Dan Karakterisasi Nanopartikel $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{Tio}_2\text{-Co}$ Dengan Variasi Suhu Kalsinasi Dalam Mendegradasi Methylene Blue. *Jurnal*

- Rekayasa Material, Manufaktur Dan Energi*, 8(1). <https://doi.org/10.30596/rmme.v8i1.21755>
- Sembiring, T., Lubis, H., Simanjuntak, R., Lubis, R. Y., Sebayang, K., Marlianto, E., Saragih, M. K., & Hasanah, M. (2025). Synthesis and Characterization of Magnetic Fe₃O₄/TEOS/TiO₂ Composites for Methylene Blue Photodegradation. *Advanced Journal of Chemistry, Section A*, 8(5), 930–947. <https://doi.org/10.48309/ajca.2025.464679.1576>
- Sinurat, M., Gusti, D. R., Frastica Deswardani, Safitri, & Sudiby. (2021). Sintesis Dan Karakterisasi Nanopartikel Magnetit (Fe₃O₄) Dari Pasir Besi Sungai Batanghari, Jambi Yang Di Enkapsulasi Dengan Silika. *Jurnal Pendidikan Fisika Tadulako Online*, 9(April), 106–114. <http://jurnal.fkip.untad.ac.id/index.php/jpft>
- Syihabuddin, D. M., & Munasir, M. (2024). GREEN SYNTHESIS NANOPARTIKEL Fe₃O₄ DENGAN BIOREDUKTOR EKSTRAK DAUN MIMBA (*Azadirachta indica*): APLIKASI SEBAGAI MATERIAL FOTOKATALIS DEGRADASI METHYLENE BLUE. *Inovasi Fisika Indonesia*, 13(3), 118–123. <https://doi.org/10.26740/ifi.v13n3.p118-123>
- Wicaksono, S. T., Wahfiudin, A., Pramata, A. D., & Sagadevan, S. (2024). Effect of Fe (III)/Fe (II) cation molar ratio variation on magnetite Fe₃O₄ nanoparticles synthesized from natural iron sand by co-precipitation method. *MRS Advances, Iii*, 3–7. <https://doi.org/10.1557/s43580-024-00923-z>