



Sintesis dan Karakterisasi Nanomagnetik Fe_3O_4 Berbasis Pasir Besi Pantai Sunur melalui Metode Kopresipitasi

Feby Eriza Tanjung^{1*}, Rahmat Hidayat², Ratnawulan³, Leni Aziyus Fitri⁴

¹⁻⁴Program Studi Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Negeri Padang, Indonesia

*Penulis Korespondensi: febyerizatanjung@gmail.com

Abstract. Iron sand is an abundant natural resource in coastal areas of Indonesia, including Sunur Beach, Padang Pariaman Regency, West Sumatra, which has great potential as an economical and environmentally friendly raw material for Fe_3O_4 nanoparticle synthesis. This study aims to synthesize and characterize Fe_3O_4 nanoparticles derived from Sunur Beach iron sand using the coprecipitation method. The synthesis process involved dissolving iron sand in 37% HCl, followed by precipitation using 25% NH_4OH , drying, and sintering at 400°C. The synthesized product was characterized using XRD, FTIR, and FESEM analyses. The XRD results showed a characteristic magnetite phase diffraction pattern with the main peak appearing at the (311) plane according to the ICDD standard 01-075-0449, with an average crystal size of 18.36 nm calculated using the Debye-Scherrer equation. FTIR analysis confirmed the presence of Fe_3O_4 functional groups at wavenumbers of 545.18, 490.81, and 432.32 cm^{-1} , representing the characteristic bonds of magnetite structures. FESEM observations revealed a rod-like particle morphology with an average diameter of 96.48 nm. These results confirm that Sunur Beach iron sand is a viable alternative raw material for nanoscale Fe_3O_4 nanoparticle synthesis.

Keywords: Characterization; Coprecipitation; Iron Sand; Nanoparticles Fe_3O_4 ; Sunur Beach.

Abstrak. Pasir besi merupakan salah satu sumber daya alam yang melimpah di wilayah pesisir Indonesia, termasuk Pantai Sunur, Kabupaten Padang Pariaman, Sumatera Barat, yang berpotensi dimanfaatkan sebagai bahan baku ekonomis dan ramah lingkungan dalam sintesis nanopartikel Fe_3O_4 . Penelitian ini bertujuan untuk melakukan sintesis dan karakterisasi nanopartikel Fe_3O_4 berbasis pasir besi Pantai Sunur menggunakan metode kopresipitasi. Proses sintesis dilakukan melalui pelarutan pasir besi menggunakan HCl 37%, dilanjutkan dengan proses presipitasi menggunakan NH_4OH 25%, kemudian tahap pengeringan dan sintering pada suhu 400°C. Produk hasil sintesis dikarakterisasi menggunakan instrumen XRD, FTIR, dan FESEM. Hasil XRD menunjukkan pola difraksi khas fase magnetit dengan puncak utama pada bidang (311) yang mengacu pada standar ICDD 01-075-0449, dengan ukuran kristal rata-rata sebesar 18,36 nm berdasarkan persamaan Debye-Scherrer. Analisis FTIR mengonfirmasi keberadaan gugus fungsi Fe_3O_4 pada bilangan gelombang 545,18; 490,81; dan 432,32 cm^{-1} yang menjadi karakteristik struktur magnetit. Hasil FESEM menunjukkan morfologi partikel berbentuk batang dengan diameter rata-rata 96,48 nm. Temuan ini membuktikan bahwa pasir besi Pantai Sunur layak digunakan sebagai bahan baku alternatif dalam sintesis nanopartikel Fe_3O_4 berukuran nano.

Kata kunci: Karakterisasi; Kopresipitasi; Nanopartikel Fe_3O_4 ; Pasir Besi; Pantai Sunur.

1. LATAR BELAKANG

Kekayaan sumber daya mineral Indonesia mencakup cadangan pasir besi yang melimpah dan tersebar secara merata di berbagai kawasan pesisir nusantara, meliputi Sumatera, Jawa, Kalimantan, Sulawesi, Nusa Tenggara, hingga Kepulauan Maluku (Nengsi et al., 2016). Secara geologis, pasir besi merupakan endapan bijih besi berbentuk pasir yang terbentuk akibat pertemuan antara aliran sungai dan laut di daerah muara, di mana material yang terbawa arus sungai seperti batu, kerikil, dan abu vulkanik terendapkan dan terakumulasi membentuk endapan mineral magnetik (Salomo et al., 2018). Material endapan ini memiliki karakteristik visual berupa warna hitam pekat serta lazim dijumpai di sepanjang garis pantai, jalur aliran sungai, maupun area pegunungan.

Pasir besi memuat beragam jenis mineral magnetik dengan karakteristik kemagnetan yang bervariasi, mulai dari diamagnetik, paramagnetik, hingga ferromagnetik. Beberapa mineral magnetik utama yang lazim terkandung di dalamnya meliputi *magnetite* (Fe_3O_4), *hematite* ($\alpha - \text{Fe}_2\text{O}_3$), serta *maghemite* ($\gamma - \text{Fe}_2\text{O}_3$) (Visgun et al., 2022). Di antara berbagai mineral tersebut, magnetit (Fe_3O_4) memegang peranan bernilai strategis tinggi; ketersediaannya yang melimpah dalam pasir besi menjadikannya bahan baku potensial untuk sintesis nanopartikel magnetit, pigmen warna, katalis, maupun material penyerap, sehingga mampu mendorong nilai ekonomis pasir besi secara substansial (Citra & Aini, 2024).

Sebagai salah satu wilayah di Indonesia dengan potensi kekayaan tambang yang masif, Sumatera Barat menyimpan cadangan sumber daya pasir besi yang cukup besar (Visgun et al., 2022). Salah satu lokasi yang menjanjikan adalah Pantai Sunur, Sumatera Barat, yang diketahui memiliki kandungan Fe yang tinggi dalam pasir besinya (Norman et al., 2016). Keberadaan sumber daya lokal ini membuka peluang yang besar untuk dimanfaatkan sebagai bahan baku sintesis nanopartikel Fe_3O_4 berbasis material lokal yang berkelanjutan, sehingga dapat mendukung pengembangan teknologi nanomaterial secara mandiri di tingkat regional maupun nasional.

Nanopartikel Fe_3O_4 dapat disintesis melalui berbagai metode, di antaranya hidrotermal, elektrokimia, dan kopresipitasi. Di antara ketiga metode tersebut, kopresipitasi menjadi pilihan yang paling banyak digunakan karena menawarkan berbagai keunggulan, seperti prosedur yang sederhana, waktu sintesis yang singkat, biaya produksi yang rendah, serta skalabilitas yang tinggi (Adhim, 2018; Rahmayanti, 2020). Penelitian sebelumnya telah berhasil membuktikan bahwa sintesis Fe_3O_4 dari bahan dasar pasir besi melalui metode kopresipitasi mampu menghasilkan nanopartikel berukuran nanometer (Malega et al., 2018), yang menunjukkan kompatibilitas metode ini dengan sumber bahan baku alami.

Tahap karakterisasi produk sintesis memegang peranan krusial dalam memastikan mutu serta karakteristik dari nanopartikel yang terbentuk. Pengujian dalam riset ini memanfaatkan tiga instrumen analitis utama, yakni *X-Ray Diffraction* (XRD) guna mendeteksi struktur kristal, *Fourier Transform Infrared Spectroscopy* (FTIR) untuk memeriksa gugus fungsi, serta *Field Emission Scanning Electron Microscopy* (FESEM) untuk menelaah bentuk morfologi beserta ukuran partikel. Berlandaskan uraian tersebut, studi ini diarahkan untuk melakukan sintesis nanopartikel Fe_3O_4 berbahan dasar pasir besi Pantai Sunur via teknik kopresipitasi, di samping menguji sifat fisika dan kimia produk akhir melalui pemanfaatan metode XRD, FTIR, serta FESEM.

2. KAJIAN TEORITIS

Nanopartikel adalah nanostruktur dengan ukuran berkisar 10–100 nm pada satu atau lebih dimensi, yang keunikannya terletak pada ukuran kecil serta kemampuan permukaannya dikonfigurasi dengan molekul tertentu. Karakteristik ukuran dan bentuk nanopartikel menentukan sifat optik, kemudahan modifikasi permukaan, serta potensi aplikasinya, mulai dari pengolahan limbah hingga bidang biomedis. Klasifikasi nanopartikel didasarkan pada material penyusunnya yang terbagi menjadi tiga kategori utama, yakni organik, anorganik, serta berbasis karbon, yang masing-masing memiliki karakteristik dan bidang aplikasi yang berbeda. Nanopartikel anorganik, khususnya yang berbasis logam magnetik, menjadi salah satu jenis yang paling banyak dimanfaatkan secara komersial karena struktur kristalnya yang tersusun rapi sehingga lebih tahan terhadap faktor destabilisasi (Eker et al., 2024). Salah satu jenis nanopartikel anorganik yang banyak dikembangkan untuk pengolahan air limbah adalah nanopartikel magnetik, karena kemampuannya merespons medan magnet eksternal sehingga mudah dipisahkan kembali dari media cair setelah proses pengolahan berlangsung. Sifat inilah yang menjadi dasar teoretis pemanfaatan nanopartikel Fe_3O_4 sebagai adsorben magnetik yang dapat dipisahkan secara efisien tanpa memerlukan proses filtrasi tambahan (Faulina et al., 2023).

Fe_3O_4 dapat dipandang sebagai gabungan antara FeO dan Fe_2O_3 ($\text{FeO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$), dengan ion Fe^{2+} dan Fe^{3+} terdistribusi pada situs tetrahedral dan oktahedral dalam struktur kristal kubik invers spinel (Adhim, 2018). Konfigurasi ini menghasilkan sifat superparamagnetik dengan magnetisasi saturasi tinggi (± 77 emu/gram), magnetisasi remanen kecil, dan medan koersivitas rendah (Malega et al., 2018). Sifat magnetik ini sangat dipengaruhi oleh ukuran partikel; semakin kecil ukuran partikel, semakin besar rasio luas permukaan terhadap volume, sehingga reaktivitas dan sifat magnetiknya semakin meningkat (Norman et al., 2016). Karakteristik tersebut menjadikan Fe_3O_4 berpotensi besar sebagai adsorben magnetik dalam pengolahan limbah cair, termasuk untuk mengadsorpsi zat warna metilen biru (Agnestisia, 2017).

Sebagai endapan mineral logam besi, pasir besi lazim dijumpai pada formasi batuan sedimen di berbagai kawasan sungai dan garis pantai nusantara, serta didominasi oleh senyawa oksida besi seperti *magnetite* (Fe_3O_4), *hematite* ($\alpha - \text{Fe}_2\text{O}_3$), serta *maghemite* ($\gamma - \text{Fe}_2\text{O}_3$) (Siregar & Budiman, 2015). Pantai Sunur di Kabupaten Padang Pariaman, Sumatera Barat, dikenal memiliki cadangan pasir besi yang melimpah dengan kandungan mineral magnetik yang tinggi, sehingga menjadikannya bahan baku potensial untuk sintesis nanopartikel Fe_3O_4 (Norman et al., 2016). Kandungan unsur Fe yang tinggi, terutama pada butiran berukuran kecil, memberikan karakteristik kemagnetan yang kuat sekaligus memudahkan proses ekstraksi

material magnetik secara efisien (Sudirman & Aini, 2022). Pemanfaatan sumber daya lokal ini sejalan dengan upaya pengembangan material fungsional yang lebih ekonomis dan berkelanjutan dibandingkan penggunaan prekursor kimia komersial.

Kopresipitasi merupakan salah satu metode sintesis nanopartikel magnetik yang banyak digunakan karena prosedurnya relatif sederhana, berlangsung pada suhu rendah (Indrayana, 2015). Prinsip dasarnya adalah pengendapan ion-ion logam besi (Fe²⁺ dan Fe³⁺) secara bersamaan dalam suasana basa, sehingga terbentuk fase magnetit murni (Wulandari et al., 2024). Efektivitas metode ini sebelumnya telah dibuktikan dalam berbagai penelitian, antara lain sintesis Fe₃O₄ yang mampu mengadsorpsi metilen biru dengan adsorpsi maksimum mengikuti isoterm Langmuir pada kapasitas adsorpsi 43,86 mg/g (Agnestisia, 2017). Temuan ini menjadi salah satu acuan bahwa Fe₃O₄ hasil kopresipitasi memiliki afinitas tinggi terhadap zat warna kationik, sehingga relevan sebagai dasar pengembangan aplikasi lanjutan dari nanopartikel yang disintesis dalam penelitian ini (Faulina et al., 2023).

Karakterisasi struktur dan morfologi nanopartikel Fe₃O₄ dilakukan melalui tiga teknik analisis. *X-Ray Diffraction* (XRD) digunakan untuk mengidentifikasi fase kristal, derajat kristalinitas, dan ukuran kristalit berdasarkan prinsip Hukum *Bragg* (Ihwani & Ayu, 2022), dengan ukuran kristalit dihitung melalui persamaan *Debye-Scherrer* (Sabur & Gafur, 2024). *Fourier Transform Infrared Spectroscopy* (FTIR) digunakan untuk mengidentifikasi gugus fungsi pada permukaan partikel berdasarkan interaksi radiasi inframerah dengan getaran ikatan kimia (Fadlelmoula et al., 2022). Adapun *Field Emission Scanning Electron Microscopy* (FESEM) digunakan untuk mengamati morfologi permukaan dan distribusi ukuran partikel pada resolusi tinggi (Prabu et al., 2022). Ketiga teknik ini saling melengkapi dan lazim digunakan secara bersamaan dalam berbagai penelitian sintesis nanopartikel magnetik untuk memvalidasi keberhasilan pembentukan fase Fe₃O₄ murni (Elsafitri et al., 2020).

Berdasarkan kajian teori di atas, penelitian ini didasarkan pada dugaan bahwa pasir besi Pantai Sunur, dengan kandungan mineral magnetik yang tinggi, dapat digunakan sebagai bahan baku alami untuk sintesis nanopartikel Fe₃O₄ berskala nano melalui metode kopresipitasi, sehingga menghasilkan material dengan fase magnetit yang khas dan sifat magnetik yang sesuai untuk dimanfaatkan sebagai alternatif bahan sintesis yang lebih ramah lingkungan dan ekonomis dibandingkan prekursor kimia komersial.

3. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan desain *experimental research* yang bersifat deskriptif-kuantitatif, dengan tahapan sintesis nanopartikel Fe₃O₄ dari pasir besi melalui metode kopresipitasi yang dilanjutkan dengan karakterisasi struktur, gugus fungsi, dan morfologi produk yang dihasilkan.

Bahan yang digunakan adalah pasir besi yang terdapat di sepanjang Pantai Sunur, Kabupaten Padang Pariaman, Sumatera Barat. Sampel penelitian berupa pasir besi kering sebanyak 40 gram yang diperoleh melalui proses pemurnian, yaitu penyaringan dengan mesh berukuran 120 dan pemisahan dari pasir nonbesi menggunakan magnet permanen, sehingga diperoleh fraksi pasir besi dengan kandungan magnetit yang lebih murni sebagai sampel uji.

Data dikumpulkan melalui eksperimen sintesis dan pengujian laboratorium. Prosedur sintesis diawali dengan pelarutan 40 gram pasir besi dalam 38 mL larutan HCl 37% pada suhu 55°C, diaduk menggunakan *magnetic stirrer* berkecepatan 700 rpm selama 60 menit. Filtrat hasil penyaringan kemudian diendapkan dengan penambahan 73 mL larutan NH₄OH 25% (pH 10) dan didiamkan selama 60 menit. Endapan magnetit yang terbentuk dicuci menggunakan aquades dengan bantuan centrifuge hingga bebas amonia (pH netral), dikeringkan pada suhu 120°C selama 2 jam, kemudian disintering pada suhu 400°C selama 2 jam sebelum digiling menjadi serbuk halus.

Instrumen pengumpulan data berupa alat karakterisasi material, yaitu XRD untuk analisis fase dan ukuran kristal, FTIR untuk identifikasi gugus fungsi, serta FESEM untuk pengamatan morfologi dan ukuran partikel. Data XRD dianalisis dengan membandingkan pola difraksi sampel terhadap data referensi standar magnetit ICDD 01-075-0449, dan ukuran kristalit dihitung menggunakan persamaan Debye-Scherrer ($D = \frac{K\lambda}{(\beta \cos \theta)}$). Data FTIR dianalisis secara kualitatif dengan mengidentifikasi puncak serapan pada rentang bilangan gelombang tertentu dan mencocokkannya dengan pustaka gugus fungsi ikatan Fe-O. Data FESEM dianalisis menggunakan perangkat lunak ImageJ dengan parameter *Feret's diameter* dan *minimum Feret's diameter*, kemudian diameter representatif partikel dihitung dengan persamaan $d = \sqrt{(\text{Feret} \times \text{MinFeret})}$ dan hasilnya dianalisis melalui pendekatan distribusi Log-Normal.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

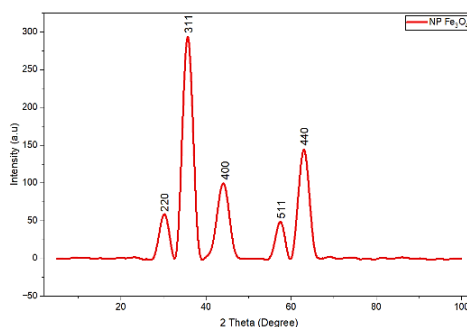
Pengambilan sampel pasir besi dilakukan di Pantai Sunur, Kabupaten Padang Pariaman, Sumatera Barat, sedangkan proses sintesis dan karakterisasi dilaksanakan secara bertahap di laboratorium, meliputi tahap pemurnian dan penghalusan pasir besi, pelarutan dengan HCl,

pengendapan dengan NH_4OH , pengeringan, sintering, hingga tahap pengujian menggunakan XRD, FTIR, dan FESEM.



Gambar 1. Nanopartikel Fe_3O_4 Yang Dihasilkan.

Endapan magnetit yang terbentuk berwarna hitam pekat dan menunjukkan respons terhadap medan magnet eksternal, yang mengindikasikan terbentuknya fase magnetik sejak tahap awal sintesis. Setelah dikeringkan dan dihaluskan, serbuk yang dihasilkan berubah warna menjadi cokelat tua, yang diduga terjadi akibat efek skala nano pada interaksi partikel dengan cahaya serta kemungkinan oksidasi permukaan yang tipis.

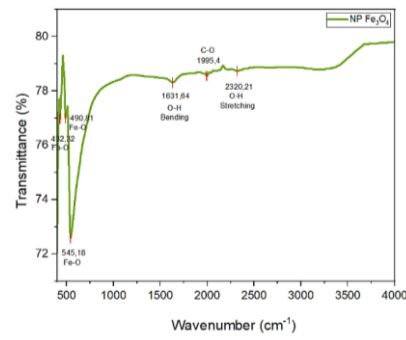


Gambar 2. Puncak Difraksi Karakteristik Nanopartikel Fe_3O_4 Hasil Sintesis.

Pengujian XRD dilakukan untuk mengidentifikasi fase kristal dan ukuran kristalit nanopartikel hasil sintesis. Pola difraksi sampel menunjukkan lima puncak karakteristik yang sesuai dengan bidang Miller magnetit standar (ICDD 01-075-0449). Puncak paling intens teramati pada bidang (311) di sudut $2\theta = 35,76^\circ$, yang merupakan ciri khas utama fase magnetit dengan struktur kristal spinel kubik. Kesesuaian seluruh puncak dengan data referensi standar mengonfirmasi bahwa produk sintesis merupakan fase Fe_3O_4 murni tanpa pengotor fase oksida besi lain yang signifikan. Berdasarkan perhitungan menggunakan persamaan *Debye-Scherrer*, diperoleh ukuran kristal rata-rata sebesar 18,36 nm dengan FWHM $0,4546^\circ$. Nilai ini menegaskan bahwa metode kopresipitasi berhasil menghasilkan partikel berskala nanometer, konsisten dengan penelitian-penelitian terdahulu yang juga melaporkan keberhasilan sintesis Fe_3O_4 berskala nano dapat dihasilkan dengan metode kopresipitasi (Fitria et al. 2024) sehingga

memperkuat validitas metode kopresipitasi sebagai teknik sintesis yang efektif dan reproduibel untuk bahan baku pasir besi.

Analisis FTIR dilakukan untuk mengidentifikasi gugus fungsi pada permukaan nanopartikel hasil sintesis (Citra & Aini, 2024). Puncak-puncak serapan yang teridentifikasi dirangkum pada Tabel 1.



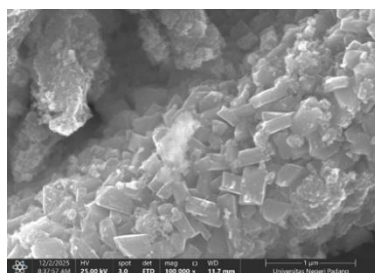
Gambar 3. Gugus Fungsi Nanopartikel Fe_3O_4 Berdasarkan Analisis FTIR.

Tabel 1. Data Gugus Fungsi.

Gugus Fungsi	Bilangan Gelombamng (cm^{-1})
O-H Stretching	2320.21 cm^{-1}
O-H Bending	1631.64 cm^{-1}
C-O	1995.40 cm^{-1}
Fe-O	545.18 cm^{-1}
Fe-O	490.81 cm^{-1}
Fe-O	432.32 cm^{-1}

Serapan kuat pada rentang 400–600 cm^{-1} , khususnya pada 545,18; 490,81; dan 432,32 cm^{-1} , merupakan sidik jari (*fingerprint*) vibrasi regangan ikatan Fe–O dalam struktur kristal magnetit (Fadlelmoula et al., 2022) sehingga menjadi bukti pendukung terbentuknya fase Fe_3O_4 secara kimiawi, sejalan dengan hasil identifikasi fase pada analisis XRD. Puncak pada 1631,64 cm^{-1} mengindikasikan vibrasi tekuk O–H yang berasal dari air teradsorpsi atau gugus hidroksil di permukaan partikel, hal yang lazim terjadi pada nanopartikel yang disintesis melalui media cair seperti metode kopresipitasi (Wulandari et al., 2024). Adapun puncak pada 2320,21 cm^{-1} diinterpretasikan sebagai interferensi CO_2 dari lingkungan pengukuran dan bukan bagian intrinsik dari struktur kimia sampel.

Pengamatan morfologi menggunakan FESEM pada perbesaran 100.000 $\times$ menunjukkan partikel dengan morfologi dominan berbentuk batang (*rod-like*), bertepi tajam, dan cenderung membentuk agregat akibat interaksi magnetik antarpartike.



Gambar 4. Morfologi Nanopartikel Fe_3O_4 yang dihasilkan.

Tabel 2. Statistik Ukuran Partikel yang dihasilkan.

Parameter Statistik	Nilai
Median (xc)	84.20 nm
Mode	64.13 nm
Mean	96.48 nm
Standar Deviasi(SD)	54.03 nm
Simpangan Baku Geometrik (σ_g)	1.685
Rentang Partikel	49.97–141.88 nm
R^2 LogNormal Fit	0.940

Analisis ukuran partikel menggunakan perangkat lunak ImageJ dengan pendekatan fitting Log-Normal. Hasil fitting Log-Normal menghasilkan diameter rata-rata partikel sebesar 96,48 nm dengan sebagian besar partikel terdistribusi pada rentang 49,97–141,88 nm. Temuan ini mengonfirmasi bahwa sebagian besar partikel Fe_3O_4 hasil sintesis berada pada skala nanometer, meskipun sebagian kecil melebihi ambang 100 nm, yang lazim terjadi akibat kecenderungan aglomerasi partikel magnetik selama proses sintering. Ukuran partikel hasil pengamatan FESEM ini relatif lebih besar dibandingkan ukuran kristalit hasil perhitungan XRD (18,36 nm), sebuah pola yang umum ditemukan pada nanopartikel magnetik karena satu partikel yang teramati secara morfologis pada FESEM umumnya tersusun atas beberapa domain kristal (kristalit) yang teraglomerasi (Elsafitri et al., 2020).

Pembahasan

Secara keseluruhan, hasil karakterisasi XRD, FTIR, dan FESEM saling melengkapi dan menunjukkan konsistensi bahwa metode kopresipitasi berhasil mengubah pasir besi Pantai Sunur menjadi nanopartikel Fe_3O_4 dengan fase magnetit yang relatif murni. Hasil ini sejalan dengan hipotesis penelitian bahwa pasir besi lokal berpotensi menjadi bahan baku alternatif yang lebih ramah lingkungan dan ekonomis dibandingkan prekursor kimia komersial. Secara teoritis, penelitian ini memperkuat pemahaman mengenai hubungan antara ukuran partikel dan sifat magnetik material spinel kubik, sedangkan secara terapan, hasil ini membuka peluang pengembangan lebih lanjut berupa optimasi parameter sintesis, seperti kecepatan pengadukan dan suhu sintering, guna memperoleh ukuran partikel yang lebih homogen serta peningkatan efisiensi adsorpsi pada aplikasi pengolahan limbah cair berbasis material magnetik.

5. KESIMPULAN DAN SARAN

Sintesis nanopartikel Fe_3O_4 dari pasir besi Pantai Sunur berhasil dilakukan dengan metode kopresipitasi, ditunjukkan oleh terbentuknya endapan hitam yang khas sebagai magnetit. Hasil XRD memperlihatkan fase utama Fe_3O_4 dengan struktur spinel kubik dan puncak difraksi khas pada bidang (220), (311), (400), (511), dan (440), dengan puncak dominan pada bidang (311) di sekitar $2\theta = 35,76^\circ$. Ukuran kristalit rata-rata sebesar 18,36 nm menunjukkan bahwa material yang dihasilkan berada pada skala nano. Hasil FTIR menampilkan pita serapan khas Fe-O pada $545,18\text{ cm}^{-1}$, $490,81\text{ cm}^{-1}$, dan $432,32\text{ cm}^{-1}$ yang mengonfirmasi terbentuknya magnetit. Hasil FESEM memperlihatkan morfologi partikel yang tidak seragam dan cenderung teragregasi, namun tetap menunjukkan karakteristik nanopartikel. Secara keseluruhan, Fe_3O_4 dari pasir besi Pantai Sunur sudah berhasil terbentuk sebagai magnetit nano, tetapi masih memiliki keterbatasan pada kestabilan dispersi, dan ukuran partikel yang lebih besar. Ini menunjukkan bahwa tanpa enkapsulasi atau penambahan agen penstabil, nanopartikel Fe_3O_4 cenderung mengalami agregasi sehingga performa aplikasinya mungkin masih kurang maka dari itu disarankan sintesis menggunakan tambahan penstabil dan pengujian dengan adanya aplikasi secara nyata seperti uji adsorpsi.

DAFTAR REFERENSI

- Adhim, M. S. (2018). *Sintesis nanopartikel Fe_3O_4 (magnetit) dari batu besi menggunakan metode kopresipitasi dengan variasi pH* (Vol. 4). Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Agnestisia, R. (2017). Sintesis dan karakterisasi magnetit (Fe_3O_4) serta aplikasinya sebagai adsorben methylene blue. *Sains dan Terapan Kimia*, 11(2), 61–70. <https://doi.org/10.20527/jstk.v11i2.4039>
- Citra, & Aini, S. (2024). Pengaruh konsentrasi larutan FeCl_3 , FeCl_2 pada sintesis dan karakterisasi nanopartikel magnetik (Fe_3O_4) berbahan dasar pasir besi Muara Sungai Batang Gumanti Kabupaten Solok. *Jurnal Pendidikan Tambusai*, 8(2), 30064–30071.
- Eker, F., Duman, H., Akdaşçi, E., Bolat, E., Sarıtaş, S., Karav, S., & Witkowska, A. M. (2024). A comprehensive review of nanoparticles: From classification to application and toxicity. *Molecules*, 29(15). <https://doi.org/10.3390/molecules29153482>
- Elsafitri, O., MZ, N., & Deswardani, F. (2020). Sintesis dan karakterisasi nanopartikel Fe_3O_4 (magnetite) dari pasir besi Sungai Batanghari Jambi yang dienkapsulasi dengan polyethylene glycol (PEG-4000). *Jurnal Pendidikan Fisika Tadulako*, 8(3), 97–103.
- Fadlelmoula, A., Pinho, D., Carvalho, V. H., Catarino, S. O., & Minas, G. (2022). Fourier transform infrared (FTIR) spectroscopy to analyse human blood over the last 20 years: A review towards lab-on-a-chip devices. *Micromachines*, 13(2). <https://doi.org/10.3390/mi13020187>

- Faulina, M., Sari, R., & Nahar. (2023). Aplikasi adsorben nanopartikel magnetit (Fe_3O_4) untuk penyisihan metilen biru dari ferric nitrate nonahydrate dengan metode sol-gel. *Jurnal Teknologi*, 23(2), 148–154. <https://doi.org/10.30811/teknologi.v23i2.4473>
- Fitria, S. (2024). *Sintesis nanopartikel MgFe_2O_4 dan aplikasinya untuk fotodegradasi zat warna metilen biru*. Universitas Islam Negeri Syarif Hidayatullah.
- Ihwani, S. A., & Sardila, A. (2022). The effect of selenium X-fraction on the structure and lattice parameters of massive Pb (S, Se) layering in Bridgman technical preparation. *Jurnal Ilmu Fisika dan Terapannya*, 9(2), 1–13. <https://journal.student.uny.ac.id/ojs/index.php/fisika/>
- Indrayana, I. P. T. (2015). Review Fe_3O_4 dari pasir besi: Sintesis, karakterisasi, dan fungsionalisasi hingga aplikasinya dalam bidang nanoteknologi maju. *UNIARA*, 8(2), 65–75.
- Malega, F., Indrayana, I. P. T., & Suharyadi, E. (2018). Synthesis and characterization of the microstructure and functional group bond of Fe_3O_4 nanoparticles from natural iron sand in Tobelo North Halmahera. *Jurnal Ilmiah Pendidikan Fisika Al-Biruni*, 7(2), 129. <https://doi.org/10.24042/jipfalbiruni.v7i2.2913>
- Nengsi, S. W., Budiman, A., & Puryanti, D. (2016). Karakterisasi struktur kristal dan sifat magnetik maghemit ($\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$) yang dioksidasi dari magnetit (Fe_3O_4) dari pasir besi Batang Sukam Kabupaten Sijunjung Sumatera Barat dengan variasi waktu oksidasi. *Jurnal Fisika Unand*, 5(3), 248–251. <https://doi.org/10.25077/jfu.5.3.248-251.2016>
- Norman, F., Budiman, A., & Puryanti, D. (2016). Hubungan ukuran butir terhadap suseptibilitas magnetik dan kandungan unsur mineral magnetik pasir besi Pantai Sunur Kabupaten Padang Pariaman. *Jurnal Fisika Unand*, 5(3), 238–243. <https://doi.org/10.25077/jfu.5.3.238-243.2016>
- Prabu, D., Kumar, P. S., Indraganti, S., Sathish, S., Kumar, J. A., & Anand, K. V. (2022). One-step fabrication of amino-functionalized $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2$ core-shell magnetic nanoparticles as a potential novel platform for removal of cadmium (II) from aqueous solution. *Sustainability*, 14(4), 1–21. <https://doi.org/10.3390/su14042290>
- Rahmayanti, M. (2020). Sintesis dan karakterisasi magnetit (Fe_3O_4): Studi komparasi metode konvensional dan metode sonokimia. *Al Ulum: Jurnal Sains dan Teknologi*, 6(1), 26. <https://doi.org/10.31602/ajst.v6i1.3659>
- Salomo, Erwin, Malik, U., & Putra, U. S. (2018). Sifat magnetik dan ukuran partikel magnetik serta komposisi material pasir besi Pantai Kata Pariaman Sumatera Barat disintesis dengan iron sand separator dan ball milling. *JoP*, 3(2), 11–14. <https://doi.org/10.22437/jop.v3i2.5730>
- Siregar, S., & Budiman, A. (2015). Magnetik pasir besi sisa pendulangan emas di Kabupaten Sijunjung Sumatera Barat. *Jurnal Fisika Unand*, 4(4), 344–349.
- Sudirman, & Aini, S. (2022). Pengaruh mol $\text{K}_3\text{Fe}(\text{CN})_6$ pada sintesis zat warna biru prusia berbahan pasir besi Muara Pantai Sunur Pariaman. *Eksakta: Berkala Ilmiah Bidang MIPA*, 11(2), 40–44. <http://ejournal.unp.ac.id/index.php/kimia>

- Visgun, D. A., Rifai, H., Rahmayuni, R., Yuwanda, A. N., Rahmi, A., & Dwiridal, L. (2022). Identification of rock types from iron sand at Pasia Jambak Beach, Padang, West Sumatra. *Journal of Physics: Conference Series*, 2309(1). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2309/1/012023>
- Wulandari, O. R. W., Gracia, A. N., Sugiyani, T., Nainggolan, Y. D., Imelya, M., Sylvani, M. M., Beladona, S. U. M., & Putra, R. (2024). Sintesis dan karakterisasi nanopartikel magnetit (Fe_3O_4) menggunakan metode kopresipitasi. *Jurnal Kimia dan Terapannya*, 8(1), 21–25. <https://doi.org/10.17977/um0260v8i12024p021>