



SINTESIS DAN KARAKTERISASI MAGNETIT (Fe_3O_4) DARI PASIR BESI MELALUI METODE KOPRESIPITASI: SEBUAH TINJAUAN LITERATUR

Putu Vina Febryanti¹, Ida Bagus Putu Mardana², I Nengah Edi Budiarta³

Universitas Pendidikan Ganesha

e-mail: vina.febryanti@student.undiksha.ac.id¹, putu.mardana@student.undiksha.ac.id²,
ibudiarta@undiksha.ac.id³

Diterima: 01/08/2026; Direvisi: 08/08/2026; Diterbitkan: 12/08/2026

ABSTRAK

Magnetit (Fe_3O_4) merupakan salah satu material magnetik yang memiliki potensi luas dalam berbagai bidang, seperti elektronik, lingkungan, dan biomedis. Ketersediaan sumber daya pasir besi yang melimpah di Indonesia menjadikan material ini berpotensi dikembangkan sebagai bahan baku sintesis magnetit bernilai tambah melalui metode kopresipitasi yang dikenal sederhana, ekonomis, dan efektif. Artikel ini bertujuan untuk mengkaji secara komprehensif hasil-hasil penelitian mengenai sintesis dan karakterisasi magnetit (Fe_3O_4) dari pasir besi melalui metode kopresipitasi, serta menganalisis pengaruh parameter sintesis terhadap karakteristik material yang dihasilkan. Penelitian ini menggunakan metode *Systematic Literature Review* (SLR) dengan pendekatan PRISMA melalui tahapan identifikasi, penyaringan, penilaian kelayakan, dan inklusi artikel ilmiah yang relevan. Data dianalisis secara deskriptif-kualitatif melalui proses reduksi, sintesis, perbandingan, dan interpretasi hasil penelitian. Hasil kajian menunjukkan bahwa metode kopresipitasi mampu menghasilkan magnetit berstruktur kristal kubik (*inverse spinel*) dengan ukuran kristal pada skala nanometer, morfologi partikel yang umumnya berbentuk sferis dengan kecenderungan aglomerasi, serta komposisi unsur yang didominasi oleh besi (Fe) dan oksigen (O). Variasi pH sintesis berpengaruh terhadap ukuran kristal, morfologi, dan sifat kemagnetan material, sedangkan karakterisasi menggunakan XRD, SEM-EDS, XRF, dan VSM menunjukkan bahwa magnetit hasil sintesis memiliki karakteristik soft magnetic hingga superparamagnetik. Kajian ini menyimpulkan bahwa metode kopresipitasi merupakan pendekatan yang efektif untuk menghasilkan magnetit berkualitas dari pasir besi serta memiliki prospek yang menjanjikan untuk pengembangan aplikasi pada bidang elektronik, sensor, pengolahan lingkungan, dan biomedis.

Kata Kunci: magnetit (Fe_3O_4), pasir besi, kopresipitasi, karakterisasi, tinjauan literatur.

ABSTRACT

Magnetite (Fe_3O_4) is one of the most promising magnetic materials due to its broad applications in electronics, environmental remediation, and biomedical fields. Indonesia possesses abundant iron sand resources, providing significant potential for producing value-added magnetite through the co-precipitation method, which is recognized for its simplicity, cost-effectiveness, and high synthesis efficiency. This study aims to comprehensively review previous research on the synthesis and characterization of magnetite (Fe_3O_4) derived from iron sand using the co-precipitation method and to analyze the influence of synthesis parameters on the resulting material characteristics. A Systematic Literature Review (SLR) employing the PRISMA framework was conducted through the stages of identification, screening, eligibility assessment, and inclusion of relevant scientific publications. The collected data were analyzed qualitatively using data reduction, comparison, synthesis, and interpretation techniques. The review indicates that the co-precipitation method successfully produces magnetite with an inverse spinel cubic crystal structure, nanometer-scale crystallite size, predominantly spherical particle morphology with agglomeration tendencies, and elemental compositions dominated by iron (Fe) and oxygen (O). Furthermore, variations in synthesis pH significantly influence crystallite size, particle morphology, and magnetic properties. Characterization using XRD, SEM-EDS, XRF, and VSM consistently demonstrates that the synthesized magnetite exhibits soft magnetic to superparamagnetic behavior. Overall, this review concludes that the co-precipitation method is an



effective approach for producing high-quality magnetite from iron sand and offers considerable potential for applications in electronics, sensors, environmental remediation, and biomedical technologies.

Keywords: magnetite (Fe_3O_4), iron sand, co-precipitation, characterization, literature review.

PENDAHULUAN

Indonesia merupakan salah satu negara yang memiliki sumber daya pasir besi yang melimpah dan tersebar di berbagai wilayah pesisir maupun daerah aliran sungai yang dipengaruhi oleh aktivitas vulkanik. Kekayaan sumber daya alam tersebut menjadikan pasir besi sebagai salah satu mineral strategis yang berpotensi dikembangkan menjadi material bernilai tambah melalui pemanfaatan teknologi material modern. Pasir besi umumnya mengandung mineral magnetik, seperti magnetit (Fe_3O_4), hematit (Fe_2O_3), dan ilmenit (FeTiO_3), yang memiliki karakteristik fisik dan kimia yang mendukung berbagai aplikasi di bidang elektronik, lingkungan, energi, hingga biomedis (Cornell & Schwertmann, 2003). Di antara mineral tersebut, magnetit (Fe_3O_4) memperoleh perhatian yang semakin besar karena memiliki sifat superparamagnetik, stabilitas kimia yang baik, luas permukaan yang tinggi pada skala nano, serta biokompatibilitas yang memungkinkan pemanfaatannya sebagai material fungsional dalam berbagai bidang teknologi (Laurent et al., 2008). Rachmawati et al. (2023) melaporkan bahwa pasir hitam Pantai Nyanyi, Bali, memiliki kelimpahan material magnetik yang sangat tinggi dengan dominasi mineral hematit dan kandungan besi yang melimpah, sehingga berpotensi sebagai sumber bahan baku material magnetik. Potensi serupa juga ditemukan di wilayah lain di Indonesia; Rianna et al. (2022) melaporkan bahwa pasir besi alam dari Sumatera Utara berhasil diolah menjadi Fe_3O_4 berfasa tunggal dengan sifat kemagnetan yang cukup baik, ditunjukkan oleh nilai magnetisasi saturasi dan remanensi yang signifikan, sehingga menegaskan bahwa potensi pasir besi sebagai bahan baku magnetit tersebar merata di berbagai wilayah Indonesia. Potensi tersebut diperkuat oleh Mardana et al. (2024) dan Widiantra et al. (2024) yang berhasil mengolah pasir besi dari wilayah Jembrana menjadi nanopartikel magnetit melalui metode kopresipitasi dengan karakteristik kristal dan sifat kemagnetan yang baik. Temuan-temuan tersebut menunjukkan bahwa pasir besi Indonesia, khususnya di Bali dan Sumatera, memiliki prospek yang besar sebagai sumber bahan baku sintesis magnetit untuk mendukung pengembangan material maju (*advanced materials*) berbasis sumber daya lokal (Murdana et al., 2024).

Seiring dengan perkembangan ilmu material dan nanoteknologi, sintesis magnetit dalam skala nanopartikel menjadi fokus berbagai penelitian karena ukuran partikel yang kecil mampu meningkatkan luas permukaan spesifik, reaktivitas, serta karakteristik magnetik dibandingkan material berukuran mikrometer. Peningkatan karakteristik tersebut menjadikan nanopartikel magnetit banyak dimanfaatkan dalam berbagai aplikasi, seperti media penyimpanan data, katalis, adsorben untuk pengolahan limbah, penghantaran obat (*drug delivery*), agen kontras pada pencitraan resonansi magnetik (*magnetic resonance imaging*/MRI), hingga terapi hipertermia. Wu et al. (2008) menyatakan bahwa untuk memperoleh nanopartikel magnetit dengan karakteristik yang sesuai, berbagai metode sintesis telah dikembangkan, di antaranya sol-gel, *hydrothermal*, *thermal decomposition*, *microemulsion*, dan kopresipitasi (*co-precipitation*). Di antara berbagai metode tersebut, kopresipitasi menjadi salah satu metode yang paling banyak digunakan karena memiliki prosedur sintesis yang relatif sederhana, biaya operasional yang rendah, waktu sintesis yang singkat, serta mampu menghasilkan nanopartikel magnetit dengan tingkat kristalinitas yang baik (Prasetyowati et al., 2021). Hal ini juga ditunjukkan oleh Veronica et al. (2022) yang berhasil mensintesis nanokomposit berbasis Fe_3O_4 melalui metode kopresipitasi dengan hasil karakterisasi struktur dan sifat magnetik yang

konsisten, serta oleh Pebrina & Astuti (2023) yang menunjukkan bahwa metode kopresipitasi mampu menghasilkan Fe_3O_4 dengan ukuran kristal yang dapat dikendalikan melalui variasi komposisi bahan penyusun. Selain itu, metode ini memungkinkan pengendalian karakteristik produk melalui pengaturan parameter sintesis, seperti pH larutan, suhu reaksi, rasio ion $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$, jenis basa pengendap, dan waktu pengadukan, sehingga kualitas magnetit yang dihasilkan dapat disesuaikan dengan kebutuhan aplikasi (Bahtiar et al., 2007).

Perkembangan penelitian mengenai sintesis magnetit (Fe_3O_4) dari pasir besi menunjukkan bahwa sumber daya alam lokal memiliki potensi yang besar untuk dikembangkan menjadi material magnetik bernilai tinggi melalui metode kopresipitasi. Rachmawati et al. (2023) melaporkan bahwa pasir hitam Pantai Nyanyi, Bali, memiliki kandungan material magnetik yang sangat tinggi dengan dominasi unsur besi dan mineral hematit, sehingga berpotensi dimanfaatkan sebagai bahan baku material magnetik. Potensi tersebut kemudian dibuktikan melalui penelitian Mardana et al. (2024) dan Widianegara et al. (2024) yang berhasil mensintesis nanopartikel magnetit dari pasir besi Sungai Gelar dan Sungai Taman menggunakan metode kopresipitasi. Kedua penelitian tersebut menunjukkan bahwa metode kopresipitasi mampu menghasilkan magnetit dengan struktur kristal *cubic inverse spinel*, ukuran kristal pada skala nanometer, serta sifat kemagnetan yang baik sehingga berpotensi diaplikasikan pada berbagai bidang teknologi. Temuan serupa juga dilaporkan oleh Jaya et al. (2024) yang mengekstraksi senyawa besi oksida dari batuan vulkanik Pulau Ambon menggunakan metode kopresipitasi, dengan hasil karakterisasi XRD yang mengindikasikan terbentuknya campuran fasa magnetit, maghemit, dan hematit, menegaskan bahwa keragaman sumber bahan baku alami turut memengaruhi kemurnian fasa magnetik yang terbentuk. Sejalan dengan hal tersebut, Ito et al. (2023) menunjukkan bahwa perlakuan panas terhadap pasir besi dari hulu Sungai Seruai, Deli Serdang, berpengaruh terhadap komposisi kandungan mineral magnetik, termasuk proporsi fasa magnetit dan hematit yang terbentuk. Lebih lanjut, Kristina et al. (2024) menunjukkan bahwa karakteristik magnetit yang dihasilkan tidak hanya dipengaruhi oleh kualitas bahan baku, tetapi juga oleh parameter sintesis. Melalui variasi pH pengendapan, penelitian tersebut membuktikan bahwa peningkatan pH mampu memengaruhi ukuran kristal, parameter kisi, morfologi permukaan, serta komposisi unsur magnetit yang dihasilkan. Temuan-temuan tersebut menunjukkan bahwa keberhasilan sintesis magnetit melalui metode kopresipitasi tidak hanya bergantung pada kandungan mineral dalam pasir besi, tetapi juga sangat dipengaruhi oleh optimasi kondisi sintesis yang digunakan sehingga menghasilkan karakteristik material yang berbeda-beda sesuai dengan parameter prosesnya (Kristina et al., 2024).

Meskipun berbagai penelitian telah berhasil menunjukkan bahwa pasir besi dari berbagai wilayah di Indonesia dapat dimanfaatkan sebagai bahan baku sintesis magnetit melalui metode kopresipitasi, hasil yang diperoleh masih menunjukkan variasi karakteristik material yang cukup signifikan. Perbedaan ukuran kristal, morfologi partikel, komposisi unsur, maupun sifat kemagnetan yang dilaporkan mengindikasikan bahwa kualitas magnetit sangat dipengaruhi oleh kondisi sintesis yang diterapkan pada masing-masing penelitian. Variasi ini turut tergambar pada penelitian Novita & Astuti (2023) yang menunjukkan bahwa penambahan komponen tambahan pada sintesis berbasis kopresipitasi dapat mengubah ukuran kristal dan karakteristik permukaan Fe_3O_4 yang dihasilkan, meskipun menggunakan prinsip sintesis dasar yang serupa. Di sisi lain, sebagian besar penelitian masih berfokus pada proses sintesis dan karakterisasi material secara individual sesuai dengan objek kajian masing-masing, sehingga pembahasan mengenai keterkaitan antara parameter sintesis dengan karakteristik magnetit yang



dihasilkan masih tersebar di berbagai publikasi. Kondisi tersebut menyebabkan belum tersedianya suatu kajian yang mengintegrasikan hasil-hasil penelitian secara komprehensif untuk menjelaskan bagaimana variasi parameter sintesis, khususnya pada metode kopresipitasi, memengaruhi struktur kristal, morfologi, komposisi, dan sifat kemagnetan magnetit yang dihasilkan. Oleh karena itu, diperlukan suatu tinjauan literatur yang mampu menyusun, membandingkan, dan mengevaluasi berbagai hasil penelitian tersebut sehingga dapat memberikan pemahaman yang lebih utuh mengenai perkembangan sintesis dan karakterisasi magnetit berbasis pasir besi (Lu et al., 2007).

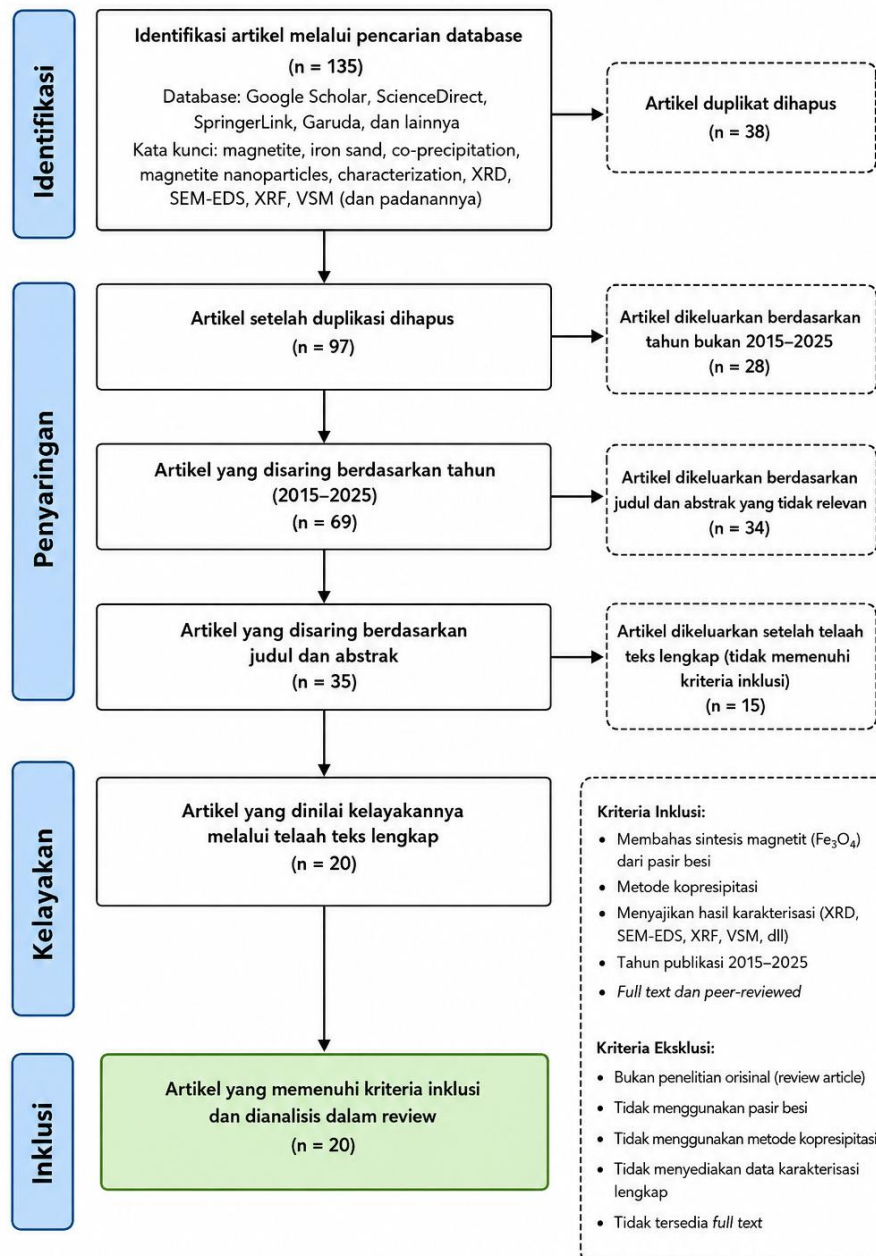
Berdasarkan berbagai hasil penelitian yang telah dipublikasikan, dapat diketahui bahwa sintesis magnetit (Fe_3O_4) berbasis pasir besi melalui metode kopresipitasi telah menunjukkan perkembangan yang signifikan. Namun, informasi mengenai pengaruh variasi parameter sintesis terhadap karakteristik magnetit masih tersebar pada berbagai publikasi dan belum disajikan dalam suatu kajian yang terintegrasi. Oleh karena itu, artikel ini menyajikan suatu tinjauan literatur yang mengintegrasikan serta membandingkan hasil-hasil penelitian mengenai sintesis dan karakterisasi magnetit (Fe_3O_4) dari pasir besi melalui metode kopresipitasi. Berbeda dengan penelitian terdahulu yang umumnya berfokus pada satu objek penelitian atau satu parameter sintesis tertentu, artikel ini memberikan analisis komprehensif mengenai hubungan antara kondisi sintesis dengan karakteristik magnetit yang dihasilkan, meliputi struktur kristal, ukuran kristal, morfologi permukaan, komposisi unsur, dan sifat kemagnetan. Melalui pendekatan tersebut, artikel ini bertujuan memberikan pemahaman yang lebih menyeluruh mengenai perkembangan sintesis magnetit berbasis pasir besi, mengidentifikasi kecenderungan hasil penelitian, serta merumuskan peluang dan arah pengembangan penelitian selanjutnya sebagai landasan bagi pengembangan material magnetik berbasis sumber daya alam lokal.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan metode literature review dengan pendekatan deskriptif-kualitatif yang bertujuan untuk mengidentifikasi, membandingkan, serta mensintesis berbagai hasil penelitian mengenai sintesis dan karakterisasi magnetit (Fe_3O_4) berbasis pasir besi melalui metode kopresipitasi. Pendekatan ini dipilih karena mampu memberikan gambaran yang komprehensif mengenai perkembangan penelitian, kecenderungan hasil, serta hubungan antarvariabel yang memengaruhi karakteristik magnetit. Seluruh tahapan penelitian dilakukan secara sistematis mulai dari identifikasi literatur, seleksi artikel, ekstraksi data, hingga sintesis hasil penelitian sehingga diperoleh kesimpulan yang sesuai dengan tujuan kajian.

Data yang digunakan merupakan data sekunder yang bersumber dari artikel ilmiah nasional maupun internasional yang dipublikasikan pada periode 2015–2025. Penelusuran literatur dilakukan melalui basis data Google Scholar, ScienceDirect, SpringerLink, Garuda, dan sumber ilmiah lain yang relevan dengan menggunakan kata kunci *magnetite (Fe_3O_4)*, *iron sand*, *co-precipitation*, *magnetite nanoparticles*, *characterization*, *XRD*, *SEM-EDS*, *XRF*, dan *VSM*, serta padanannya dalam Bahasa Indonesia. Artikel dipilih berdasarkan kriteria inklusi, yaitu membahas sintesis magnetit dari pasir besi menggunakan metode kopresipitasi, menyajikan hasil karakterisasi material, tersedia dalam bentuk full text, serta telah melalui proses peer review. Sementara itu, artikel yang tidak sesuai dengan fokus penelitian, tidak menyediakan informasi metodologi dan hasil secara lengkap, atau merupakan artikel ulasan (*review article*) dikeluarkan dari proses analisis. Tahapan pencarian dan seleksi literatur dilakukan secara sistematis mengacu pada alur *Preferred Reporting Items for Systematic*

Reviews and Meta-Analyses (PRISMA) yang disederhanakan sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Diagram Alur Seleksi Literatur Berdasarkan Pedoman PRISMA 2020 (diadaptasi dari Page et al., 2021).

Analisis data dilakukan menggunakan metode *narrative synthesis* melalui proses identifikasi, klasifikasi, komparasi, interpretasi, dan sintesis terhadap seluruh artikel yang memenuhi kriteria. Sebagai instrumen penelitian, digunakan lembar ekstraksi data untuk mengorganisasi informasi penting dari setiap artikel yang meliputi identitas penelitian, sumber pasir besi, metode sintesis, parameter sintesis (seperti variasi pH, suhu, dan jenis pengendap), teknik karakterisasi yang digunakan (*XRD*, *SEM-EDS*, *XRF*, dan *VSM*), serta hasil karakterisasi

berupa struktur kristal, ukuran kristal, morfologi, komposisi unsur, sifat kemagnetan, dan potensi aplikasinya. Data yang telah diekstraksi kemudian dianalisis secara deskriptif-komparatif untuk mengidentifikasi persamaan, perbedaan, kecenderungan hasil penelitian, serta peluang pengembangan riset pada bidang sintesis magnetit berbasis pasir besi melalui metode kopresipitasi.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil

Berdasarkan hasil penelusuran literatur dan proses seleksi artikel sesuai dengan tahapan yang telah dijelaskan pada bagian metode penelitian, diperoleh sejumlah artikel yang memenuhi kriteria inklusi untuk dianalisis dalam kajian ini. Artikel-artikel tersebut dipublikasikan pada rentang tahun 2023–2024 dan secara umum membahas sintesis serta karakterisasi magnetit (Fe_3O_4) berbasis pasir besi menggunakan metode kopresipitasi. Sebagian besar penelitian dilakukan pada pasir besi yang berasal dari wilayah Bali, seperti Pantai Nyanyi (Tabanan), Sungai Gelar dan Sungai Taman (Jembrana), serta Pantai Tianyar (Karangasem). Keseluruhan penelitian memanfaatkan karakterisasi material menggunakan kombinasi instrumen seperti *X-ray Fluorescence* (XRF), *X-ray Diffraction* (XRD), *Scanning Electron Microscope–Energy Dispersive X-ray Spectroscopy* (SEM–EDS), dan *Vibrating Sample Magnetometer* (VSM) sesuai dengan tujuan masing-masing penelitian.

Tabel 1. Karakteristik Penelitian yang Dianalisis

No.	Penulis	Tahun	Sumber Pasir Besi	Metode Sintesis	Teknik Karakterisasi	Fokus Penelitian
1.	Rachmawati et al.	2023	Pantai Nyanyi, Tabanan, Bali	Karakterisasi material magnetik	XRF, AMS, VSM	Identifikasi kelimpahan material magnetik dan sifat kemagnetan pasir besi
2.	Mardana et al.	2024	Sungai Gelar, Jembrana, Bali	Kopresipitasi	XRF, XRD, SEM–EDS, VSM	Sintesis dan karakterisasi nanopartikel magnetit
3.	Widiantara et al.	2024	Sungai Taman, Jembrana, Bali	Kopresipitasi	XRF, XRD, SEM–EDS, VSM	Sintesis nanopartikel magnetit berbasis pasir besi serta analisis struktur dan sifat
4.	Kristina et al.	2024	Pantai Tianyar, Karangasem, Bali	Kopresipitasi dengan variasi pH	XRD, SEM–EDS	Pengaruh variasi pH terhadap karakteristik

No.	Penulis	Tahun	Sumber Pasir Besi	Metode Sintesis	Teknik Karakterisasi	Fokus Penelitian
5.	Widiantara et al.	2024	Sungai Taman, Jembrana, Bali	Kopresipitasi	XRF, XRD, SEM-EDS, VSM	magnetit hasil sintesis Sintesis magnetit dari pasir besi Sungai Taman dan evaluasi potensi aplikasinya

Berdasarkan Tabel 1, dapat diketahui bahwa seluruh penelitian menggunakan pasir besi alam sebagai sumber utama ion besi dalam sintesis magnetit, dengan metode kopresipitasi sebagai pendekatan yang paling dominan. Perbedaan antarpenelitian terutama terletak pada asal bahan baku, parameter sintesis yang diterapkan, serta tujuan karakterisasi material. Meskipun demikian, seluruh penelitian memiliki kesamaan dalam upaya memperoleh magnetit dengan struktur kristal yang baik, ukuran partikel pada skala nanometer, serta sifat kemagnetan yang mendukung berbagai aplikasi di bidang material fungsional.

Tabel 2. Ringkasan Hasil Sintesis dan Karakterisasi Magnetit (Fe_3O_4) dari Berbagai Penelitian

Penulis	Struktur Kristal	Ukuran Kristal (nm)	Morfologi Partikel	Karakteristik Magnetik	Temuan Utama
Rachmawati et al.	Didominasi hematit (Fe_2O_3) pada pasir besi alami	-	Material magnetik alami	Material magnetik lunak dengan M_s 37,74 emu/g	Pasir Pantai Nyanyi memiliki kandungan Fe tinggi sehingga berpotensi sebagai bahan baku sintesis magnetit.
Mardana et al.	Kubik (inverse spinel)	14,80	Sferis dengan aglomerasi	Feromagnetik (27,36 emu/g)	(M_s) Metode kopresipitasi berhasil menghasilkan nanopartikel magnetit dengan ukuran kristal

Penulis	Struktur Kristal	Ukuran Kristal (nm)	Morfologi Partikel	Karakteristik Magnetik	Temuan Utama
Widiantara et al.	Kubik (inverse spinel)	18,43	Sferis dengan aglomerasi	Superparamagnetik/soft magnetic	skala nanometer. Kandungan Fe tinggi setelah pemisahan magnetik menghasilkan magnetit dengan struktur kristal yang baik.
Kristina et al.	Kubik (inverse spinel)	18,00 (pH 9); 14,69 (pH 10); 13,68 (pH 11)	Bulat dan kubik, berpori, mengalami aglomerasi	Respon magnetik kuat	Peningkatan pH menyebabkan ukuran kristal semakin kecil serta memengaruhi karakteristik struktur magnetit.
Widiantara et al.	Kubik (inverse spinel)	18,43	Sferis	Soft magnetic material	Magnetit hasil sintesis berpotensi diaplikasikan pada bidang elektronik, lingkungan, dan biomedis.

Berdasarkan Tabel 2, terlihat bahwa penelitian mengenai sintesis magnetit berbasis pasir besi didominasi oleh penggunaan metode kopresipitasi dengan karakteristik produk berupa struktur kristal kubik (*inverse spinel*) dan ukuran kristal pada rentang nanometer. Secara umum, morfologi partikel yang dihasilkan berbentuk sferis dan menunjukkan kecenderungan mengalami aglomerasi. Selain itu, sebagian besar penelitian melaporkan bahwa magnetit hasil sintesis memiliki sifat magnetik lunak atau superparamagnetik sehingga berpotensi untuk diaplikasikan pada berbagai bidang, seperti material fungsional, lingkungan, elektronik, dan biomedis.

Pembahasan

Sintesis Magnetit (Fe_3O_4) melalui Metode Kopresipitasi

Hasil sintesis berbagai penelitian menunjukkan bahwa metode kopresipitasi merupakan salah satu teknik yang paling banyak digunakan untuk menghasilkan nanopartikel magnetit (Fe_3O_4) dari pasir besi alam. Metode ini dipilih karena memiliki prosedur yang relatif sederhana, biaya operasional yang rendah, serta mampu menghasilkan partikel dengan ukuran nanometer dan tingkat kemurnian yang tinggi. Selain itu, proses sintesis berlangsung pada kondisi reaksi yang relatif ringan sehingga lebih mudah diterapkan dibandingkan metode lain, seperti *sol-gel*, *hydrothermal*, atau *thermal decomposition*. Karakteristik tersebut menjadikan metode kopresipitasi sebagai pendekatan yang efektif dalam pemanfaatan pasir besi sebagai sumber material magnetik bernilai tambah.

Penelitian yang dilakukan oleh Mardana et al. (2024) menunjukkan bahwa proses kopresipitasi mampu menghasilkan nanopartikel magnetit dengan struktur kristal kubik (*inverse spinel*) dan ukuran kristal sekitar 14,80 nm. Hasil tersebut didukung oleh penelitian Widianegara et al. (2024) yang berhasil mensintesis magnetit berbasis pasir besi Sungai Taman dengan ukuran kristal rata-rata 18,43 nm dan struktur kristal yang sesuai dengan pola standar magnetit. Sementara itu, Kristina et al. (2024) membuktikan bahwa metode yang sama tetap menghasilkan struktur kristal kubik meskipun dilakukan variasi kondisi sintesis melalui perubahan nilai pH. Kesamaan hasil pada beberapa penelitian tersebut menunjukkan bahwa metode kopresipitasi memiliki tingkat reproduksibilitas yang baik dalam menghasilkan fase magnetit dari bahan baku pasir besi dengan karakteristik yang berbeda.

Keberhasilan metode kopresipitasi dalam membentuk fase magnetit dipengaruhi oleh mekanisme pengendapan ion Fe^{2+} dan Fe^{3+} yang berlangsung secara simultan ketika larutan prekursor direaksikan dengan basa, seperti amonium hidroksida (NH_4OH). Pada kondisi pH yang sesuai, ion-ion besi mengalami nukleasi dan pertumbuhan kristal sehingga membentuk struktur *inverse spinel* yang menjadi ciri khas magnetit. Tahapan pencucian hingga pH netral dan proses pengeringan setelah pengendapan juga berperan penting dalam mengurangi pengotor yang masih tersisa serta meningkatkan kualitas kristal yang terbentuk. Oleh karena itu, selain jenis bahan baku, pengendalian kondisi sintesis menjadi faktor penting dalam menentukan kualitas akhir nanopartikel magnetit.

Secara keseluruhan, hasil sintesis literatur memperlihatkan bahwa metode kopresipitasi tidak hanya efektif dalam menghasilkan magnetit dengan ukuran nanometer, tetapi juga mampu mempertahankan karakteristik struktur kristal yang konsisten pada berbagai sumber pasir besi. Temuan tersebut menunjukkan bahwa metode kopresipitasi memiliki prospek yang baik untuk dikembangkan dalam produksi material magnetik berbasis sumber daya alam lokal. Namun demikian, variasi parameter sintesis, terutama nilai pH, konsentrasi larutan, suhu reaksi, dan waktu pengadukan, masih menjadi faktor yang perlu dioptimalkan karena berpengaruh terhadap ukuran kristal, morfologi partikel, dan sifat kemagnetan material yang dihasilkan.

Pengaruh Variasi pH terhadap Karakteristik Magnetit (Fe_3O_4)

Hasil sintesis berbagai penelitian menunjukkan bahwa nilai pH merupakan salah satu parameter sintesis yang paling berpengaruh terhadap pembentukan nanopartikel magnetit melalui metode kopresipitasi. Variasi pH tidak hanya menentukan keberhasilan proses pengendapan ion besi menjadi fase magnetit, tetapi juga memengaruhi ukuran kristal, morfologi partikel, tingkat kristalinitas, serta sifat kemagnetan material yang dihasilkan. Oleh karena itu,

pengendalian pH selama proses sintesis menjadi aspek penting untuk memperoleh nanopartikel magnetit dengan karakteristik yang optimal.

Penelitian yang dilakukan oleh Kristina et al. (2024) menunjukkan bahwa peningkatan pH pengendapan dari pH 9 menjadi pH 11 menyebabkan ukuran kristal magnetit mengalami penurunan dari sekitar 18,00 nm menjadi 13,68 nm. Meskipun seluruh sampel tetap membentuk struktur kristal kubik (*inverse spinel*), peningkatan nilai *Full Width at Half Maximum* (FWHM) pada pola difraksi XRD mengindikasikan bahwa ukuran kristal menjadi semakin kecil seiring bertambahnya pH. Selain itu, hasil pengamatan menggunakan SEM-EDS menunjukkan bahwa seluruh sampel memiliki morfologi partikel yang cenderung berbentuk bulat hingga kubik dengan kecenderungan mengalami aglomerasi. Temuan tersebut menunjukkan bahwa perubahan pH lebih berpengaruh terhadap proses pertumbuhan kristal dibandingkan perubahan fase kristal yang terbentuk.

Hasil penelitian tersebut memiliki kecenderungan yang sejalan dengan penelitian Mardana et al. (2024) maupun Widiantera et al. (2024), yang sama-sama menghasilkan magnetit berukuran nanometer menggunakan metode kopresipitasi. Meskipun kedua penelitian tersebut tidak melakukan variasi pH secara khusus, ukuran kristal yang diperoleh masih berada pada kisaran yang relatif sama dengan penelitian Kristina et al. (2024), yaitu sekitar 14–18 nm. Kesamaan rentang ukuran kristal tersebut mengindikasikan bahwa metode kopresipitasi memiliki kemampuan yang baik dalam menghasilkan nanopartikel magnetit, sementara variasi kondisi sintesis, khususnya pH, berperan sebagai faktor pengendali terhadap ukuran kristal yang terbentuk.

Secara ilmiah, peningkatan pH akan meningkatkan konsentrasi ion hidroksida (OH^-) di dalam larutan sehingga mempercepat proses nukleasi selama pembentukan magnetit. Laju nukleasi yang lebih tinggi menyebabkan terbentuknya lebih banyak inti kristal secara bersamaan. Akibatnya, jumlah ion besi yang tersedia akan terbagi ke dalam lebih banyak inti kristal sehingga proses pertumbuhan masing-masing kristal menjadi lebih terbatas. Kondisi tersebut menghasilkan ukuran kristal yang lebih kecil dibandingkan sintesis pada pH yang lebih rendah. Namun demikian, pH yang terlalu tinggi juga berpotensi meningkatkan interaksi antarnanopartikel sehingga menyebabkan aglomerasi, sebagaimana terlihat pada hasil karakterisasi morfologi beberapa penelitian yang dikaji (Sun et al., 2017).

Berdasarkan sintesis berbagai penelitian, dapat disimpulkan bahwa optimasi nilai pH merupakan salah satu strategi utama dalam mengendalikan karakteristik nanopartikel magnetit hasil sintesis melalui metode kopresipitasi. Pengaturan pH yang tepat memungkinkan diperolehnya ukuran kristal yang lebih kecil dengan struktur kristal yang tetap stabil sehingga berpotensi meningkatkan performa material pada berbagai aplikasi, terutama di bidang biomedis, adsorben, sensor magnetik, maupun material fungsional lainnya. Oleh karena itu, penelitian selanjutnya perlu mengkaji lebih lanjut hubungan antara variasi pH dengan parameter sintesis lainnya, seperti konsentrasi prekursor, suhu reaksi, waktu pengadukan, dan jenis basa pengendap agar diperoleh kondisi sintesis yang lebih optimal.

Karakterisasi Struktur Kristal Magnetit Menggunakan X-Ray Diffraction (XRD)

Karakterisasi struktur kristal menggunakan *X-Ray Diffraction* (XRD) merupakan tahapan yang paling penting dalam mengevaluasi keberhasilan sintesis magnetit (Fe_3O_4) melalui metode kopresipitasi. Analisis XRD digunakan untuk mengidentifikasi fase kristal yang terbentuk, menentukan struktur kristal material, menghitung parameter kisi, serta mengestimasi ukuran kristal. Pada berbagai penelitian yang dikaji, karakterisasi menggunakan XRD secara konsisten

menunjukkan bahwa metode kopresipitasi mampu menghasilkan magnetit dengan struktur kristal kubik (*inverse spinel*) yang sesuai dengan karakteristik standar Fe_3O_4 .

Hasil penelitian Mardana et al. (2024) menunjukkan bahwa magnetit hasil sintesis dari pasir besi Sungai Gelar memiliki struktur kristal kubik (*inverse spinel*) dengan parameter kisi sekitar 8,344 Å dan ukuran kristal rata-rata 14,80 nm. Temuan tersebut sejalan dengan penelitian Widiantera et al. (2024), yang melaporkan pembentukan struktur kristal kubik dengan parameter kisi sekitar 8,331 Å serta ukuran kristal rata-rata 18,43 nm. Sementara itu, Kristina et al. (2024) juga memperoleh pola difraksi yang sesuai dengan standar magnetit pada seluruh variasi pH yang digunakan. Meskipun ukuran kristal mengalami perubahan akibat variasi pH, fase kristal yang terbentuk tetap menunjukkan karakteristik magnetit, sehingga mengindikasikan bahwa perubahan kondisi sintesis lebih memengaruhi proses pertumbuhan kristal daripada mengubah struktur kristalnya.

Kesamaan hasil karakterisasi XRD pada berbagai penelitian menunjukkan bahwa metode kopresipitasi memiliki kemampuan yang baik dalam menghasilkan fase magnetit yang stabil dari berbagai sumber pasir besi. Konsistensi terbentuknya struktur *inverse spinel* pada seluruh penelitian mengindikasikan bahwa pasir besi lokal memiliki kandungan mineral besi yang memadai sebagai bahan baku sintesis. Selain itu, ukuran kristal yang berada pada rentang nanometer memperlihatkan bahwa metode kopresipitasi efektif menghasilkan material dengan dimensi yang sesuai untuk berbagai aplikasi nanoteknologi.

Secara ilmiah, pola difraksi XRD memberikan informasi mengenai tingkat keteraturan susunan atom di dalam kristal. Semakin tajam dan jelas puncak difraksi yang dihasilkan, semakin tinggi tingkat kristalinitas material yang terbentuk. Sebaliknya, pelebaran puncak difraksi (*peak broadening*) umumnya berkaitan dengan penurunan ukuran kristal pada skala nanometer. Fenomena ini terlihat pada penelitian Kristina et al. (2024), di mana peningkatan nilai pH menyebabkan puncak difraksi menjadi lebih lebar sehingga ukuran kristal yang dihitung menggunakan persamaan *Scherrer* mengalami penurunan. Temuan tersebut menunjukkan bahwa kondisi sintesis tidak hanya memengaruhi dimensi kristal, tetapi juga berkontribusi terhadap kualitas struktur kristal yang dihasilkan.

Berdasarkan sintesis berbagai penelitian, dapat disimpulkan bahwa karakterisasi menggunakan XRD secara konsisten membuktikan keberhasilan metode kopresipitasi dalam menghasilkan magnetit dengan struktur kristal kubik (*inverse spinel*) dan ukuran kristal pada skala nanometer. Konsistensi tersebut menunjukkan bahwa metode kopresipitasi merupakan pendekatan yang efektif untuk menghasilkan material magnetik berbasis pasir besi dengan struktur kristal yang stabil. Namun demikian, variasi parameter sintesis, terutama nilai pH dan kondisi reaksi, tetap menjadi faktor penting yang memengaruhi ukuran kristal dan tingkat kristalinitas material sehingga perlu dioptimalkan pada penelitian selanjutnya (Puryanti, 2020).

Karakterisasi Morfologi dan Komposisi Magnetit Menggunakan SEM–EDS dan XRF

Setelah keberhasilan pembentukan fase magnetit dikonfirmasi melalui karakterisasi X-Ray Diffraction (XRD), analisis morfologi dan komposisi unsur menjadi tahapan penting untuk mengevaluasi kualitas material hasil sintesis. Dalam penelitian mengenai sintesis magnetit berbasis pasir besi, karakterisasi menggunakan *Scanning Electron Microscope–Energy Dispersive X-ray Spectroscopy* (SEM–EDS) dan *X-ray Fluorescence* (XRF) saling melengkapi. SEM digunakan untuk mengamati bentuk permukaan dan ukuran partikel, EDS mengidentifikasi distribusi unsur penyusun material, sedangkan XRF memberikan informasi kuantitatif mengenai kandungan unsur pada bahan baku maupun material hasil pemisahan.



magnetik. Kombinasi ketiga teknik tersebut memberikan gambaran yang komprehensif mengenai perubahan karakteristik material selama proses sintesis (Didik et al., 2021).

Hasil penelitian menunjukkan bahwa pasir besi dari berbagai lokasi di Bali memiliki kandungan unsur besi (Fe) yang tinggi sehingga sangat potensial sebagai bahan baku sintesis magnetit. Rachmawati et al. (2023) melaporkan bahwa pasir hitam Pantai Nyanyi didominasi oleh unsur Fe disertai kandungan titanium, silikon, mangan, dan unsur minor lainnya. Temuan serupa juga dilaporkan oleh Mardana et al. (2024) dan Widiantra et al. (2024), di mana proses pemisahan menggunakan magnet permanen berhasil meningkatkan konsentrasi unsur besi secara signifikan dibandingkan sebelum proses pemisahan. Peningkatan kadar Fe tersebut menunjukkan bahwa tahap pemisahan magnetik merupakan proses awal yang penting untuk meningkatkan kemurnian bahan baku sebelum dilakukan sintesis melalui metode kopresipitasi.

Karakterisasi menggunakan SEM menunjukkan bahwa nanopartikel magnetit hasil sintesis umumnya memiliki morfologi berbentuk *sferis (spherical)* dengan kecenderungan mengalami aglomerasi. Fenomena tersebut dilaporkan secara konsisten oleh Mardana et al. (2024), Widiantra et al. (2024), serta Kristina et al. (2024), meskipun terdapat sedikit perbedaan bentuk permukaan akibat variasi kondisi sintesis. Pada penelitian Kristina et al. (2024), misalnya, partikel tidak hanya berbentuk bulat tetapi juga menunjukkan bentuk kubik dengan permukaan yang relatif kasar dan berpori. Perbedaan tersebut mengindikasikan bahwa kondisi sintesis, terutama variasi pH, turut memengaruhi proses pertumbuhan partikel dan interaksi antartpartikel selama pembentukan magnetit.

Meskipun morfologi partikel cenderung mengalami aglomerasi, fenomena tersebut merupakan karakteristik yang umum dijumpai pada nanopartikel magnetit. Ukuran partikel yang sangat kecil menyebabkan energi permukaan menjadi tinggi sehingga partikel-partikel mudah saling berinteraksi melalui gaya magnetik maupun gaya tarik antarmolekul. Akibatnya, nanopartikel membentuk gumpalan (*agglomerates*) yang tampak pada hasil pengamatan SEM. Oleh karena itu, keberadaan aglomerasi tidak selalu menunjukkan kegagalan sintesis, tetapi lebih mencerminkan sifat alami nanopartikel magnetit yang memiliki luas permukaan tinggi dan interaksi magnetik yang kuat.

Analisis komposisi menggunakan EDS menunjukkan bahwa unsur penyusun utama material hasil sintesis didominasi oleh besi (Fe) dan oksigen (O), yang merupakan unsur pembentuk magnetit (Fe_3O_4). Selain kedua unsur utama tersebut, masih terdeteksi beberapa unsur pengotor dalam jumlah relatif kecil, seperti titanium (Ti), aluminium (Al), silikon (Si), karbon (C), sulfur (S), maupun klorin (Cl). Keberadaan unsur-unsur tersebut diperkirakan berasal dari mineral ikutan yang secara alami terdapat pada pasir besi atau residu bahan kimia selama proses sintesis. Namun demikian, dominasi unsur Fe dan O pada seluruh penelitian menunjukkan bahwa proses kopresipitasi mampu menghasilkan magnetit dengan tingkat kemurnian yang baik.

Secara keseluruhan, hasil karakterisasi menggunakan SEM-EDS dan XRF memperlihatkan bahwa metode kopresipitasi tidak hanya mampu menghasilkan magnetit dengan komposisi unsur yang sesuai, tetapi juga menghasilkan morfologi nanopartikel yang relatif seragam pada berbagai sumber pasir besi. Meskipun masih dijumpai fenomena aglomerasi dan keberadaan unsur pengotor dalam jumlah kecil, karakteristik tersebut tidak menghilangkan identitas material sebagai magnetit. Sebaliknya, hasil tersebut menunjukkan bahwa pasir besi lokal memiliki potensi besar sebagai sumber bahan baku dalam sintesis nanopartikel magnetit yang dapat dikembangkan lebih lanjut melalui optimasi parameter sintesis maupun proses pemurnian material.

Karakterisasi Sifat Kemagnetan Magnetit Menggunakan Vibrating Sample Magnetometer (VSM)

Salah satu karakteristik utama yang menentukan kualitas magnetit (Fe_3O_4) hasil sintesis adalah sifat kemagnetannya. Setelah struktur kristal, morfologi, dan komposisi unsur berhasil dikonfirmasi melalui karakterisasi XRD, SEM-EDS, dan XRF, evaluasi menggunakan *Vibrating Sample Magnetometer* (VSM) menjadi tahap penting untuk mengetahui respons material terhadap medan magnet. Pengujian VSM memberikan informasi mengenai parameter magnetik, seperti magnetisasi saturasi (*saturation magnetization*, M_s), magnetisasi remanen (*remanent magnetization*, M_r), dan medan koersivitas (*coercivity*, H_c). Ketiga parameter tersebut menjadi indikator penting dalam menentukan potensi pemanfaatan magnetit pada berbagai aplikasi teknologi.

Hasil penelitian yang dikaji menunjukkan bahwa magnetit hasil sintesis melalui metode kopresipitasi umumnya memiliki karakteristik sebagai material magnetik lunak (*soft magnetic material*) dengan nilai koersivitas dan magnetisasi remanen yang relatif rendah. Mardana et al. (2024) melaporkan bahwa nanopartikel magnetit hasil sintesis menunjukkan nilai magnetisasi saturasi sekitar 27,36 emu/g, dengan nilai magnetisasi remanen yang sangat kecil serta medan koersivitas yang rendah. Hasil serupa juga diperoleh Widiantera et al. (2024), yang menunjukkan kurva histeresis berbentuk sempit dengan karakteristik superparamagnetik atau *soft magnetic*. Karakteristik tersebut menunjukkan bahwa material dapat dengan mudah dimagnetisasi ketika diberikan medan magnet luar dan segera kehilangan sebagian besar sifat kemagnetannya setelah medan tersebut dihilangkan.

Temuan tersebut berbeda dengan karakteristik pasir besi alami sebelum proses sintesis. Rachmawati et al. (2023) melaporkan bahwa pasir hitam Pantai Nyanyi memiliki nilai magnetisasi saturasi yang lebih tinggi dibandingkan beberapa nanopartikel hasil sintesis, namun masih dipengaruhi oleh keberadaan mineral lain seperti hematit (Fe_2O_3), titanium oksida, dan mineral pengotor lainnya. Perbedaan tersebut menunjukkan bahwa proses sintesis melalui kopresipitasi tidak hanya mengubah komposisi mineral, tetapi juga memengaruhi domain magnetik material akibat perubahan ukuran kristal dan struktur mikro yang terbentuk selama proses sintesis.

Secara ilmiah, sifat kemagnetan nanopartikel magnetit sangat dipengaruhi oleh ukuran kristal, morfologi partikel, tingkat kristalinitas, serta kemurnian material. Ketika ukuran kristal berada pada skala nanometer, jumlah domain magnetik di dalam partikel menjadi semakin sedikit sehingga material cenderung menunjukkan perilaku superparamagnetik. Pada kondisi ini, nanopartikel memiliki respons yang sangat cepat terhadap medan magnet eksternal, tetapi hampir tidak mempertahankan magnetisasi setelah medan tersebut dihilangkan. Karakteristik tersebut merupakan salah satu keunggulan utama nanopartikel magnetit karena dapat mengurangi terjadinya penggumpalan permanen akibat gaya tarik magnet antarpartikel ketika tidak berada di bawah pengaruh medan magnet.

Hubungan antara hasil karakterisasi XRD, SEM-EDS, dan VSM menunjukkan bahwa sifat kemagnetan magnetit tidak dapat dipisahkan dari struktur dan morfologi material. Ukuran kristal yang relatif kecil sebagaimana ditunjukkan melalui analisis XRD, serta morfologi nanopartikel yang diamati menggunakan SEM, berkontribusi terhadap terbentuknya sifat magnetik lunak pada sebagian besar hasil sintesis. Dengan demikian, optimasi parameter sintesis, seperti pH, konsentrasi prekursor, suhu reaksi, maupun proses pencucian, tidak hanya memengaruhi struktur kristal tetapi juga menentukan performa magnetik material yang dihasilkan.



Berdasarkan hasil sintesis berbagai penelitian, dapat disimpulkan bahwa metode kopresipitasi mampu menghasilkan nanopartikel magnetit dengan sifat kemagnetan yang sesuai untuk berbagai aplikasi berbasis material magnetik. Dominasi karakteristik *soft magnetic* dan kecenderungan perilaku superparamagnetik menunjukkan bahwa magnetit hasil sintesis memiliki prospek yang sangat baik untuk dikembangkan sebagai material fungsional pada bidang elektronik, sensor, katalis, remediasi lingkungan, maupun aplikasi biomedis yang memerlukan respons magnetik tinggi tetapi stabil setelah medan magnet dihilangkan.

Potensi Aplikasi Magnetit (Fe_3O_4) Hasil Sintesis dan Arah Penelitian Selanjutnya

Karakteristik magnetit (Fe_3O_4) hasil sintesis melalui metode kopresipitasi menunjukkan potensi yang luas untuk dikembangkan pada berbagai bidang teknologi. Berdasarkan hasil sintesis berbagai penelitian, nanopartikel magnetit yang dihasilkan umumnya memiliki struktur kristal kubik (*inverse spinel*), ukuran kristal pada skala nanometer, morfologi yang relatif seragam, serta sifat magnetik lunak (*soft magnetic material*) hingga superparamagnetik. Kombinasi karakteristik tersebut menjadikan magnetit sebagai salah satu material fungsional yang memiliki prospek tinggi untuk diaplikasikan dalam bidang elektronik, lingkungan, energi, maupun biomedis.

Dalam bidang elektronik, sifat magnetik lunak yang dimiliki magnetit memungkinkan material ini dimanfaatkan sebagai komponen inti transformator, induktor, sensor magnetik, serta media penyimpanan data. Material dengan koersivitas rendah memiliki kemampuan untuk mengalami proses magnetisasi dan demagnetisasi secara cepat sehingga mampu meningkatkan efisiensi perangkat elektronik. Beberapa penelitian yang dikaji juga menunjukkan bahwa karakteristik tersebut merupakan salah satu keunggulan utama magnetit hasil sintesis melalui metode kopresipitasi dibandingkan material magnetik lainnya (Mardana et al., 2024; Widiantera et al., 2024).

Selain bidang elektronik, nanopartikel magnetit juga memiliki prospek yang besar dalam pengolahan lingkungan. Ukuran partikel yang berada pada skala nanometer menghasilkan luas permukaan spesifik yang tinggi sehingga meningkatkan kemampuan adsorpsi terhadap berbagai kontaminan di dalam air. Sifat magnetiknya memungkinkan material dipisahkan kembali menggunakan medan magnet setelah proses adsorpsi selesai, sehingga meningkatkan efisiensi penggunaan adsorben dan mengurangi limbah sekunder. Karakteristik tersebut membuka peluang pemanfaatan magnetit sebagai material untuk remediasi lingkungan, khususnya dalam pengolahan limbah cair yang mengandung logam berat maupun senyawa organik berbahaya.

Di bidang biomedis, nanopartikel magnetit berukuran nanometer menjadi salah satu material yang paling banyak dikembangkan karena memiliki biokompatibilitas serta respons yang baik terhadap medan magnet eksternal. Penelitian Kristina et al. (2024) menyebutkan bahwa ukuran kristal yang berada pada rentang nanometer memberikan peluang pemanfaatan pada sistem penghantaran obat (*drug delivery*) dan terapi hipertermia kanker. Pada aplikasi tersebut, sifat superparamagnetik menjadi sangat penting karena memungkinkan nanopartikel memberikan respons terhadap medan magnet tanpa mempertahankan magnetisasi permanen ketika medan magnet dihilangkan. Karakteristik ini dapat mengurangi risiko penggumpalan partikel di dalam sistem biologis sehingga meningkatkan aspek keamanan dalam aplikasi medis.

Meskipun berbagai penelitian menunjukkan hasil yang menjanjikan, masih terdapat beberapa tantangan yang perlu menjadi perhatian pada penelitian selanjutnya. Variasi

parameter sintesis, seperti nilai pH, konsentrasi prekursor, jenis basa pengendap, suhu reaksi, dan waktu pengadukan, masih menghasilkan karakteristik material yang berbeda pada setiap penelitian. Selain itu, fenomena aglomerasi nanopartikel serta keberadaan unsur pengotor dalam jumlah kecil masih menjadi kendala dalam memperoleh material dengan tingkat homogenitas dan kemurnian yang lebih tinggi. Oleh karena itu, penelitian mendatang perlu mengembangkan strategi optimasi proses sintesis, modifikasi permukaan (*surface modification*), maupun kombinasi metode sintesis agar diperoleh nanopartikel magnetit dengan karakteristik yang lebih stabil dan sesuai dengan kebutuhan aplikasi spesifik (Nurpriyanti et al., 2025).

Secara keseluruhan, hasil kajian literatur menunjukkan bahwa metode kopresipitasi merupakan pendekatan yang efektif dalam menghasilkan nanopartikel magnetit berbasis pasir besi dengan karakteristik yang mendukung berbagai aplikasi teknologi. Potensi sumber daya pasir besi yang melimpah di Indonesia menjadi peluang strategis untuk mengembangkan material magnetik bernilai tambah melalui pendekatan sintesis yang sederhana, efisien, dan berkelanjutan. Dengan dukungan penelitian lanjutan yang berfokus pada optimasi proses dan peningkatan kualitas material, magnetit hasil sintesis berpotensi memberikan kontribusi yang lebih besar terhadap pengembangan ilmu material dan inovasi teknologi di masa depan.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil kajian literatur, metode kopresipitasi merupakan salah satu metode sintesis yang efektif untuk menghasilkan nanopartikel magnetit (Fe_3O_4) berbasis pasir besi dengan karakteristik yang baik. Berbagai penelitian menunjukkan bahwa proses sintesis melalui metode ini mampu menghasilkan magnetit berstruktur kristal kubik (*inverse spinel*), berukuran nanometer, serta didominasi oleh unsur besi (Fe) dan oksigen (O). Variasi parameter sintesis, khususnya nilai pH, berpengaruh terhadap ukuran kristal, morfologi partikel, dan sifat kemagnetan material. Hasil karakterisasi menggunakan XRD, SEM-EDS, XRF, dan VSM menunjukkan bahwa magnetit hasil sintesis umumnya memiliki morfologi sferis dengan kecenderungan aglomerasi serta karakteristik soft magnetic hingga superparamagnetik yang mendukung berbagai kebutuhan aplikasi material fungsional.

Temuan tersebut menunjukkan bahwa pasir besi lokal memiliki potensi besar sebagai sumber bahan baku bernilai tambah untuk sintesis nanopartikel magnetit melalui pendekatan yang relatif sederhana, ekonomis, dan mudah dikembangkan. Meskipun demikian, masih diperlukan penelitian lanjutan untuk mengoptimalkan parameter sintesis, meningkatkan kemurnian material, mengurangi fenomena aglomerasi, serta mengembangkan modifikasi permukaan guna memperoleh karakteristik magnetit yang lebih stabil dan sesuai dengan kebutuhan aplikasi spesifik. Dengan optimalisasi tersebut, magnetit hasil sintesis berpotensi untuk dimanfaatkan secara lebih luas pada bidang elektronik, sensor, pengolahan lingkungan, katalis, maupun biomedis, sekaligus mendukung pemanfaatan sumber daya mineral lokal secara berkelanjutan.

DAFTAR PUSTAKA

- Bahtiar, S., Widyawati, F., Yanuar, E., Ramadhan, R., Zahra, K., & Hidayat, S. (2023). Preparation of synthesis nanoparticles Fe_3O_4 based on iron sand Sumbawa. *Jurnal Pijar MIPA*, 18(6), 935–942. <https://jurnalfpk.unram.ac.id/index.php/JPM/article/view/5644>
- Cornell, R. M., & Schwertmann, U. (2003). *The iron oxides: Structure, properties, reactions, occurrences, and uses* (2nd ed.). Wiley-VCH.



- Didik, L. A., Damayanti, I., Jumliati, J., & Lestari, P. D. A. (2021). Morphological characteristics and mineral content analysis of magnetic minerals based on river and coastal sand using SEM–EDX. *Jurnal Sains Dasar*, 10(2), 44–50. <https://doi.org/10.21831/jsd.v10i2.42217>
- Didik, L. A., & Wahyudi, M. (2020). Analisa kandungan Fe dan karakteristik sifat listrik pasir besi pantai Telindung yang disintesis dengan beberapa metode. *Indonesian Physical Review*, 3(2), 64–71. <https://doi.org/10.29303/ipr.v3i2.58>
- Ito, M., Daulay, A. H., & Lubis, L. H. (2023). Karakterisasi kandungan mineral dan pengaruh *treatment* panas pasir besi hulu Sungai Seruai Kabupaten Deli Serdang. *Jurnal Kumparan Fisika*, 5(3), 151–160. <https://doi.org/10.33369/jkf.5.3.151-160>
- Jaya, G. W., Nggolaon, D., & Hattu, N. (2024). Ekstraksi dan karakterisasi senyawa besi oksida dari batuan vulkanik Pulau Ambon menggunakan metode kopresipitasi. *Jurnal Fisika Unand*, 13(1), 159–169. <https://doi.org/10.25077/jfu.13.1.159-169.2024>
- Kristina, N. P. D., Arjana, I. G., & Yasa, P. (2024). Synthesis and characterization of magnetite nanomaterials in Tianyar iron sand using co-precipitation method. *Indonesian Physical Review*, 7(3), 398–413. <https://doi.org/10.29303/ipr.v7i3.328>
- Laurent, S., Forge, D., Port, M., Roch, A., Robic, C., Vander Elst, L., & Muller, R. N. (2008). Magnetic iron oxide nanoparticles: Synthesis, stabilization, vectorization, physicochemical characterizations, and biological applications. *Chemical Reviews*, 108(6), 2064–2110. <https://doi.org/10.1021/cr068445e>
- Lu, A.-H., Salabas, E. L., & Schüth, F. (2007). Magnetic nanoparticles: Synthesis, protection, functionalization, and application. *Angewandte Chemie International Edition*, 46(8), 1222–1244. <https://doi.org/10.1002/anie.200602866>
- Mardana, I. B. P., Lutfiyah, Y. N., Yasa, P., & Widianara, G. K. A. (2024). Synthesis and characterization of magnetite Fe_3O_4 nanoparticles from natural iron sand in Gelar River. *Indonesian Physical Review*, 7(1), 166–174. <https://doi.org/10.29303/ipr.v7i1.296>
- Novita, D., & Astuti, A. (2023). Sintesis dan karakterisasi sifat optik nanokomposit $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{CQD}$ (carbon quantum dots). *Jurnal Fisika Unand*, 12(2), 310–315. <https://doi.org/10.25077/jfu.12.2.310-315.2023>
- Nurpriyanti, I., Sulistyorini, E., & Mastuki. (2025). Magnetic property analysis ZnFe_2O_4 magnetic nanomaterial derived from iron sand using the coprecipitation method. *Buletin Fisika*, 26(1). <https://doi.org/10.24843/BF.2025.v26.i01.p13>
- Pebrina, D., & Astuti, A. (2023). Sintesis dan karakterisasi sifat optik nanokomposit $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{ZnO}:\text{C}$. *Jurnal Fisika Unand*, 12(2), 298–303. <https://jfu.fmipa.unand.ac.id/index.php/jfu/article/view/1011>
- Prasetyowati, R., Widiawati, D., Swastika, P. E., Ariswan, & Warsono. (2021). Sintesis dan karakterisasi nanopartikel magnetit (Fe_3O_4) berbasis pasir besi Pantai Glagah Kulon Progo dengan metode kopresipitasi pada berbagai variasi konsentrasi NH_4OH . *Jurnal Sains Dasar*, 10(2). <https://doi.org/10.21831/jsd.v10i2.43043>
- Puryanti, D. (2020). Effect of heating temperature on magnetic properties of Fe_3O_4 synthesized by coprecipitation method. *Jurnal Ilmu Fisika*, 12(1), 11–15. <https://doi.org/10.25077/jif.12.1.11-15.2020>
- Rachmawati, D. O., Risha, N., & Suswandi, I. (2023). Kelimpahan material magnetik di pasir hitam. *Jurnal Sains dan Teknologi*, 12(1), 44–53. <https://doi.org/10.23887/jstundiksha.v12i1.55450>



- Rianna, M., Hamid, M., Handayani, F., Sebayang, A. M. S., Rangkuti, W. R., Situmorang, M., Sembiring, T., Setiadi, E. A., Tetuko, A. P., & Sebayang, P. (2022). Study and characterization of Fe_3O_4 synthesized from natural iron sand in Sumatera Utara. *Journal of Aceh Physics Society*, 11(2), 45–48. <https://doi.org/10.24815/jacps.v11i2.23492>
- Sun, S., Gebauer, D., & Cölfen, H. (2017). Alignment of amorphous iron oxide clusters: A non-classical mechanism for magnetite formation. *Angewandte Chemie International Edition*, 56(14), 4042–4046. <https://doi.org/10.1002/anie.201610275>
- Veronica, Y., Astuti, A., & Usna, S. R. A. (2022). Sintesis dan karakterisasi nanokomposit $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{PEG:ZnO}$. *Jurnal Fisika Unand*, 11(1), 30–36. <https://jfu.fmipa.unand.ac.id/index.php/jfu/article/view/771>
- Widiantara, G. K. A., Mardana, I. B. P., & Arjana, I. G. (2024). Synthesis of magnetite nanoparticles (Fe_3O_4) based on Taman River sand magnetic material. *Indonesian Physical Review*, 7(3), 327–337. <https://doi.org/10.29303/ipr.v7i3.314>
- Wu, W., He, Q., & Jiang, C. (2008). Magnetic iron oxide nanoparticles: Synthesis and surface functionalization strategies. *Nanoscale Research Letters*, 3(11), 397–415. <https://doi.org/10.1007/s11671-008-9174-9>