

Analisis Sifat Kemagnetan Nanomaterial Magnetik $ZnFe_2O_4$ Berbahan Dasar Pasir Besi Dengan Metode Kopresipitasi

Magnetic Property Analysis $ZnFe_2O_4$ Magnetic Nanomaterial Derived From Iron Sand Using the Coprecipitation Magnetic Method

Indah Nurpriyanti^{1*}, Elisa Sulistyorini¹, Mastuki¹

¹Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas 17 Agustus 1945 Surabaya, Jalan Semolowaru No 45 Sukolilo, Surabaya, Jawa Timur

Email: *indahnurpriyanti@untag-sby.ac.id; elisasulistyorini@untag-sby.ac.id; mastuki@untag-sby.ac.id

Received: 19th May 2025; Revised: 26th May 2025; Accepted: 28th May 2025

Abstrak – Pasir besi merupakan sumber alam yang kaya akan senyawa oksida besi seperti Fe_3O_4 , α - Fe_2O_3 , dan γ - Fe_2O_3 yang berpotensi dikembangkan menjadi material fungsional, khususnya sebagai nanomaterial magnetik. Penelitian ini bertujuan menganalisis sifat kemagnetan nanomaterial $ZnFe_2O_4$ yang disintesis dari pasir besi menggunakan metode kopresipitasi. Sintesis dilakukan dengan melarutkan pasir besi menggunakan HCl , kemudian dicampur dengan larutan $ZnCl_2$ dan dititrasi menggunakan NH_4OH hingga terbentuk endapan coklat kehitaman. Endapan dipanaskan pada suhu 200 °C selama 2 jam. Karakterisasi dilakukan dengan X-Ray Diffraction (XRD), Scanning Electron Microscopy (SEM), dan Vibrating Sample Magnetometer (VSM). Hasil XRD menunjukkan fase $ZnFe_2O_4$ sesuai JCPDS No. 22-1012, dengan ukuran kristalit 24,9 nm dan parameter kisi 8,28 Å. Citra SEM menunjukkan morfologi partikel tidak seragam dan adanya aglomerasi. Hasil VSM menunjukkan nilai magnetisasi remanen (Mr) sebesar 0,0016 emu, koersivitas (Hc) sebesar 314 Oe, dan saturasi magnetisasi (Ms) sebesar 1,540 emu. Berdasarkan hasil tersebut, material menunjukkan sifat soft ferromagnetik yang sesuai dengan struktur spinel $ZnFe_2O_4$.

Kata kunci: $ZnFe_2O_4$; kopresipitasi; nanomaterial; magnetik; pasir besi.

Abstract – Iron sand is a natural resource rich in iron oxide compounds such as Fe_3O_4 , α - Fe_2O_3 , and γ - Fe_2O_3 , which have the potential to be developed into functional materials, particularly magnetic nanoparticles. This study aims to analyze the magnetic properties of $ZnFe_2O_4$ nanomaterials synthesized from iron sand using the coprecipitation method. The synthesis was carried out by dissolving iron sand in HCl , mixing with a $ZnCl_2$ solution and titrating with NH_4OH until a dark brown precipitate was formed. The precipitate was heated at 200 °C for 2 hours. Characterization was conducted using X-Ray Diffraction (XRD), Scanning Electron Microscopy (SEM), and Vibrating Sample Magnetometry (VSM). XRD results confirmed the presence of $ZnFe_2O_4$ phase by JCPDS No. 22-1012, with a crystallite size of 24.9 nm and a lattice parameter of 8.28 Å. SEM images revealed non-uniform particle morphology and agglomeration. VSM results showed a remanent magnetization (Mr) of 0.0016 emu, coercivity (Hc) of 314 Oe, and saturation magnetization (Ms) of 1.540 emu. Based on these results, the material exhibits soft ferromagnetic behavior consistent with the spinel structure of $ZnFe_2O_4$.

Keywords: $ZnFe_2O_4$; coprecipitation; nanomaterial; magnetic; iron sand.

1. Pendahuluan

Nanomaterial adalah material yang direkayasa dalam skala nano, yaitu antara 1 hingga 100 nanometer. Nanomaterial merupakan berpotensi diaplikasikan dibidang teknologi terapan seperti elektronik, penyimpanan energi, dan obat obatan [1]. Nanomaterial menunjukkan sifat yang berbeda dibandingkan dengan partikel yang besar. Ketika material magnetik berukuran sangat kecil dan berdomain tunggal material bersifat superparamagnetik. Nanomaterial memberikan sifat yang unik, seperti luas permukaan yang lebih luas, konduktivitas listrik yang tinggi, dan kompatibel kepada molekul biologi.

Nanomaterial magnetik dikenal bersifat biokompatibel, memiliki metode sintesis yang relatif sederhana, mudah dipisahkan, mampu menyerap cahaya dalam spektrum matahari, serta dapat didaur ulang, sehingga menjadikannya kandidat potensial untuk berbagai aplikasi fungsional. Nanomaterial magnetik merupakan material yang telah dikembangkan dalam berbagai fase dan komposisi, termasuk logam murni (Fe, Co, Ni), paduan logam (FePt, FePt₃, CoPt₃), serta oksida logam (NiFe₂O₄, CoFe₂O₄, Zn_{0,35}Ni_{0,65}Fe₂O₄, MnFe₂O₄, MgFe₂O₄). Meskipun nanomaterial logam murni menunjukkan nilai magnetisasi jenuh yang tinggi, penggunaannya sering dibatasi karena tingkat toksitas yang tinggi dan kecenderungannya mudah teroksidasi. Sebaliknya, oksida besi relatif lebih stabil terhadap oksidasi dan mampu memberikan respons magnetik yang konsisten, serta memiliki tingkat biokompatibilitas yang lebih baik untuk aplikasi biomedis [2].

Nanomaterial ZnFe₂O₄, atau zink ferit, merupakan salah satu nanomaterial oksida logam yang menjanjikan untuk pengembangan material fungsional. Material ini memiliki sifat *soft magnetic*, stabilitas kimia yang tinggi, serta biokompatibilitas, sehingga berpotensi untuk diaplikasikan dalam berbagai bidang. Bidang medis memiliki aplikasi ZnFe₂O₄ yang telah banyak diteliti. Salah satunya adalah Sistem penghantaran obat berbasis medan magnet (*magnetic drug delivery*) merupakan salah satu pendekatan terkini dalam terapi kanker yang dirancang untuk mengarahkan obat secara spesifik ke jaringan target, seperti sel tumor, sehingga dapat meningkatkan efektivitas terapi dan menekan efek samping sistemik. Pendekatan ini meliputi dua strategi utama, yaitu penargetan pasif yang mengandalkan akumulasi alami nanomaterial pada jaringan tumor melalui efek *Enhanced Permeability and Retention (EPR)*, serta penargetan aktif yang memanfaatkan ligan spesifik untuk mengenali reseptor yang diekspresikan secara berlebih pada sel kanker [3].

Pasir besi adalah jenis pasir dengan konsentrasi besi yang dominan dan biasanya berwarna gelap abu-abu atau kehitaman. Pasir besi termasuk material yang mengandung senyawa oksida, seperti Magnetit (Fe₃O₄) Ilmenit (FeTiO₃, dan Hematite (Fe₂O₃) Senyawa besi oksida dapat ditemukan di dalam pasir besi alam [4]. Metode kopresipitasi (pengendapan) merupakan salah satu jenis teknik fabrikasi dengan cara kimia yang membawa suatu zat terlarut ke bawah sehingga terbentuk endapan yang dikehendaki. Penggunaan metode kopresipitasi memiliki keunggulan dibandingkan dengan metode konvensional yang lain, yaitu: tingkat kemurnian yang tinggi, proses pengendapan sangat sederhana sehingga memudahkan dalam pemisahannya pada temperatur rendah, waktu yang dibutuhkan relatif cepat serta dengan peralatan yang sederhana, dan membutuhkan biaya yang relatif murah. Sehingga proses ini memungkinkan diperolehnya serbuk dengan ukuran kristalit dalam skala nano [5].

ZnFe₂O₄ adalah ferrite spinel yang menarik karena menggabungkan sifat magnetik lunak, stabilitas kimia tinggi, dan biokompatibilitas baik. Berbeda dengan Fe₃O₄ atau γ -Fe₂O₃ yang bersifat feromagnetik kuat [6], ZnFe₂O₄ cenderung menunjukkan sifat superparamagnetik atau ferimagnetik lemah yang menguntungkan untuk aplikasi seperti penghantaran obat berbasis medan magnet, sensor, dan agen kontras MRI, di mana akumulasi partikel harus dihindari. Dengan demikian, ZnFe₂O₄ dipilih karena menawarkan keseimbangan antara performa magnetik yang cukup, kestabilan kimia yang tinggi, serta keamanan biologis yang lebih baik dibandingkan dengan oksida besi konvensional seperti Fe₃O₄ atau γ -Fe₂O₃. Oleh karena itu penelitian ini menganalisis sifat magnetik untuk nanomaterial magnetik ZnFe₂O₄ berbasis pasir besi dengan menggunakan metode kopresipitasi.

2. Landasan Teori

2.1. Feromagnetik

Material feromagnetik adalah jenis material yang memiliki kemampuan sangat baik untuk membentuk medan magnet di dalam dirinya sendiri. Feromagnetik memiliki nilai suseptibilitas magnetik yang besar dan positif, artinya material ini sangat responsif terhadap medan magnet. Sifat feromagnetik muncul karena atom-atom di dalam material tersebut memiliki momen magnetik permanen yang saling berinteraksi kuat satu sama lain. Akibatnya, material tersebut tetap bersifat magnetik meskipun medan magnet eksternal sudah dihilangkan. Keunikan material feromagnetik juga terletak pada spin elektron yang tidak berpasangan, yang menciptakan medan magnet. Ketika spin elektron dari banyak atom tersusun secara teratur, akan terbentuk resultan medan magnetik yang besar. Penyusunan spin ini dipengaruhi oleh momen magnetik spontan, yang tetap ada meskipun tidak ada medan magnet dari luar [7].

Material superparamagnetik hanya bersifat magnetik saat diberi medan magnet dan langsung

kehilangan sifat tersebut begitu medan dihilangkan. Sifat ini membuatnya sangat berguna dalam berbagai aplikasi seperti mikroaktuator, pemisahan berbasis magnet, dan penghantaran obat. Namun, sifat superparamagnetik ini hanya muncul pada partikel berukuran sangat kecil, biasanya di bawah 30 nm untuk nanomaterial oksida besi. Untuk digunakan dalam skala lebih besar, partikel-partikel kecil ini perlu dirakit menjadi struktur yang lebih kompleks. Tetapi proses perakitan ini bisa mengubah sifat magnetiknya, sehingga diperlukan cara yang tepat dan terkontrol agar tetap mendapatkan performa magnetik yang diinginkan [8].

2.2. Zinc Ferrite ($ZnFe_2O_4$)

Zinc ferrite ($ZnFe_2O_4$) merupakan salah satu jenis oksida spinel yang memiliki sifat magnetik dan elektronik menarik, sehingga banyak diteliti untuk berbagai aplikasi fungsional. Dalam konteks nanomaterial, $ZnFe_2O_4$ dikenal memiliki potensi besar sebagai material magnetik, termasuk untuk aplikasi medis. Relevan dengan penelitian ini, $ZnFe_2O_4$ dapat disintesis dari material alam seperti pasir besi menggunakan metode kopresipitasi, yang menawarkan pendekatan sederhana dan ekonomis dalam menghasilkan partikel berskala nano dengan sifat kemagnetan yang dapat dikendalikan [9].

2.3. Metode kopresipitasi

Metode kopresipitasi merupakan salah satu teknik sintesis senyawa anorganik yang dilakukan dengan mengendapkan dua atau lebih ion logam secara bersamaan ketika larutan mencapai kondisi jenuh. Metode ini banyak digunakan dalam sintesis material *ferrite*, termasuk *zinc ferrite* ($ZnFe_2O_4$), karena dapat menghasilkan partikel dengan ukuran nano dan komposisi yang relatif seragam. Dalam konteks $ZnFe_2O_4$, metode kopresipitasi memungkinkan pencampuran ion Zn^{2+} dan Fe^{3+} dalam kondisi terkontrol, yang kemudian diendapkan menggunakan basa seperti $NaOH$ atau NH_4OH untuk membentuk prekursor oksida. Setelah proses pengendapan, material biasanya dikeringkan dan dikalsinasi untuk membentuk fase spinel $ZnFe_2O_4$. Keunggulan metode ini terletak pada kesederhanaan proses, tidak memerlukan suhu tinggi saat tahap awal, serta tidak membutuhkan peralatan laboratorium yang kompleks, sehingga cocok untuk sintesis berbasis material alam seperti pasir besi [10].

2.4. Pasir besi

Di Indonesia, salah satu hasil dari pengolahan pasir besi adalah magnetit (Fe_3O_4). Fe_3O_4 sendiri merupakan material yang banyak diminati dalam dunia penelitian karena memiliki sifat yang sangat aplikatif di berbagai bidang [3-9]. Berbagai metode telah digunakan untuk memproduksi material ini, seperti milling dan presipitasi, kopresipitasi, kombinasi presipitasi dan sol-gel, getaran mekanik, kopresipitasi dengan tammaterial polietilena, hingga paduan mekanik (*mechanical alloying*). Selain itu, Fe_3O_4 juga bisa dikalsinasi untuk menghasilkan barium heksaferrit, yang dikenal sebagai material penyerap gelombang mikro. Material ini juga berpotensi digunakan dalam bidang biomedis dan berbagai aplikasi teknologi lainnya [11].

3. Material Dan Metode

Metode fabrikasi dari Nanomaterial Magnetik $ZnFe_2O_4$ adalah kopresipitasi. Material yang digunakan adalah $ZnCl_2$ pasir besi pantai dari Kabupaten Malang, HCl , NH_4OH , aquades. Pembuatan dimulai dengan melarutkan 10 g pasir besi kedalam 20 ml HCl dan diaduk menggunakan hotplate selama 60 menit. Sedangkan untuk 2,3 g $ZnCl_2$ dicampur dengan 3,37 ml HCl lalu dilarukan kedalam aquadest. Larutan $FeCl_2$ (hasil dari pencampuran pasir besi dan HCl) dicampurkan dengan larutan $ZnCl_2$ dengan konsentrasi 0,84 M. Setelah itu diaduk selama 60 menit. Selama proses pengadukan, dilakukan titrasi dengan larutan NH_4OH sebanyak 50 ml berkonsentrasi 13,35 M selama 60 menit. Proses pencucian dilakukan dengan membilas endapan menggunakan aquadest sebanyak delapan kali, hingga terbentuk endapan berwarna coklat kehitaman. Tahap berikutnya adalah pemanasan menggunakan furnace dengan suhu 200 °C selama 120 menit. Pemilihan suhu pemanasan 200 °C bertujuan untuk menghilangkan sisa pelarut dan meningkatkan stabilitas termal awal tanpa menyebabkan perubahan fase kristal yang signifikan [12]. Karakterisasi yang dilakukan adalah *X-Ray Diffraction* (XRD); *Scanning Electron Microscopy* (SEM) dan *Vibrating-Sample Magnetometer* (VSM).

4. Hasil Dan Pembahasan

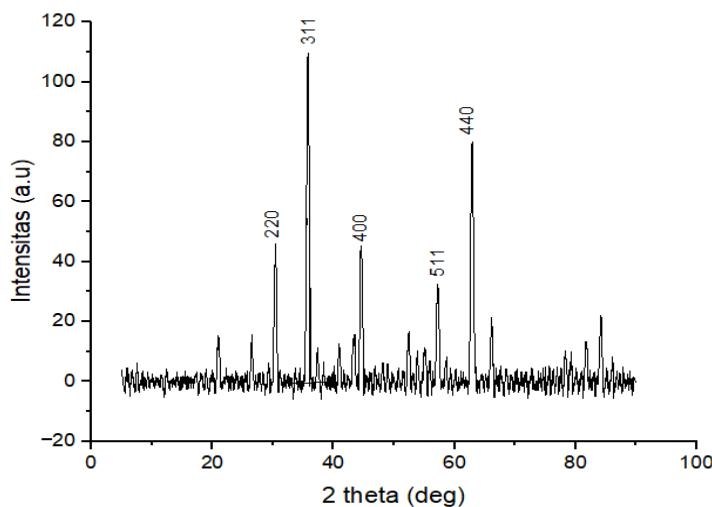
Telah disintesis nanomaterial magnetik ZnFe₂O₄ dengan menggunakan metode kopresipitasi. Hasil sintesis seperti tampak pada Gambar 1, berdasarkan pengamatan visual material berwarna hitam kecoklatan, yang mengidentifikasi telah terbentuknya fase oksida besi ZnFe₂O₄. Warna tersebut juga warna khas untuk material bersifat magnetik [13]. Selain itu, material menunjukkan respons terhadap medan magnet eksternal, yang mengindikasikan adanya momen magnetik yang signifikan. Fenomena ini menunjukkan bahwa karakteristik magnetik tetap terjaga pada material berskala nano. Namun, sifat magnetik yang ditunjukkan dapat berbeda dibandingkan dengan bentuk *bulk*, yang disebabkan oleh pengaruh ukuran partikel serta dominasi efek permukaan pada skala nanometer [14].



Gambar 1. Hasil sintesis nanomaterial magnteik ZnFe₂O₄.

Kakterisasi struktur kristal dilakukan dengan menggunakan XRD. Pola difraksi yang dihasilkan nanomaterial magnetik ZnFe₂O₄ ada pada Gambar 2. Pola difraksi tersebut sesuai dengan fase ZnFe₂O₄ berdasarkan referensi JCPDS No 22-1012. Berdasarkan referensi tersebut mengindikasikan bahwa material hasil sintesis memiliki struktur kristal yang sesuai dengan fase ZnFe₂O₄. Puncak-puncak utama hasil karakterisasi XRD teridentifikasi pada sudut 2θ sebesar 30,36°, 35,09°, 44,64°, 57,68°, dan 62,92°, yang masing-masing dikaitkan dengan bidang kristal (220), (311), (400), (511), dan (440). Kelima bidang ini merupakan bidang khas dari struktur spinel ZnFe₂O₄.

Hasil karakterisasi XRD hasil sintesis seperti ditunjukkan pada Gambar 2. Pola difraksi memperlihatkan puncak-pucak difaraksi utama pada sudut $2\theta = 30,36^\circ$, $35,09^\circ$, $44,64^\circ$, $57,68^\circ$, dan $62,92^\circ$. Berdasarkan referensi JCPDS No 22 – 1012, posisi sudut 2θ tersebut merupakan sudut karakteristik dari kristal fase ZnFe₂O₄. Puncak-puncak difraksi berturut-turut bersesuaian dengan difraksi Bragg bidang kristal dengan indeks Miller (*hkl*) = (220), (311), (400), (511), dan (440). Hal ini mengindikasikan bahwa pada material hasil sintersis telah terbentuk kristal fase ZnFe₂O₄.



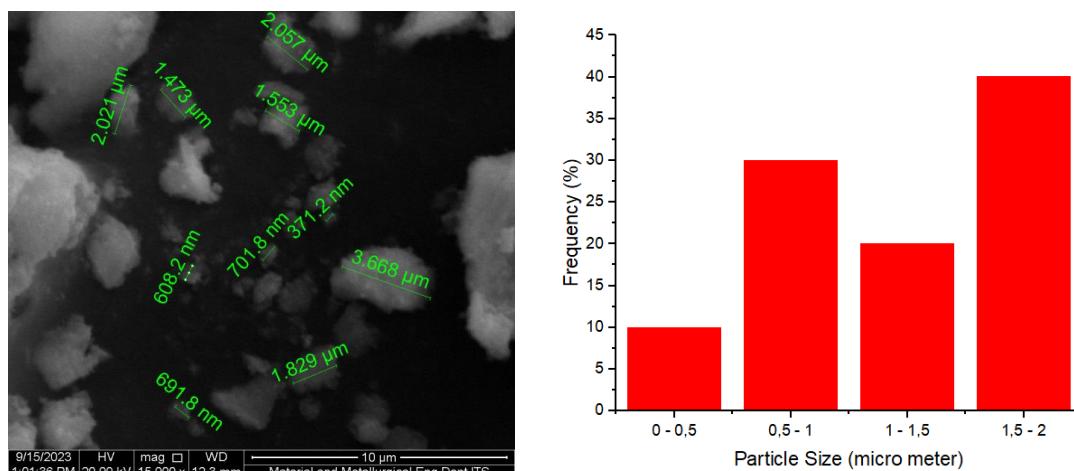
Gambar 2. Pola difraksi XRD material magnetik ZnFe₂O₄.

Nanomaterial magnetik yang telah disintesis memiliki struktur kisi bravais pusat muka [15]. Unit selnya terdiri dari 8 molekul dan 56 atom, sedangkan untuk bravais sel terdiri dari 2 unit dan 14 atom yang diberikan 42 model [16]. ZnFe_2O_4 memiliki struktur spinel normal dengan struktur Zn^{2+} adalah tetrahedral dan Fe^{3+} adalah octahedral [17].

Ukuran kristalit dihitung menggunakan persamaan Scherrer. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa rata-rata ukuran kristalit (D_{XRD}) berada pada kisaran 24,9 nm, yang menandakan bahwa material berada dalam rentang ukuran skala nano. Selain itu, parameter kisi (*lattice parameter*) diperoleh dari analisis posisi puncak-puncak difraksi dan menghasilkan nilai rata-rata 8,28 Å. Nilai tersebut sesuai dengan parameter kisi khas fase ZnFe_2O_4 , yang mengindikasikan bahwa struktur kristal yang terbentuk telah terorganisasi dengan baik [18].

Gambar 3 (a) memperlihatkan hasil karakterisasi SEM, hasil sintesis menunjukkan bentuk butiran tidak beraturan, ukuran bervariasi, dan cenderung membentuk agregat. Ukuran rata-rata butiran berada pada rentang 1-2 μm dengan distribusi 40% antara 0,5-1 μm dan 60% antara 1,5-2 μm seperti diperlihatkan pada Gambar 3 (b).

Karakterisasi morfologi menggunakan SEM (Gambar 3 (a)) menunjukkan bahwa partikel ZnFe_2O_4 hasil sintesis memiliki bentuk tidak beraturan, ukuran bervariasi, dan cenderung membentuk agregat. Dari hasil pengukuran secara langsung pada citra SEM, ukuran partikel berkisar antara 600 nm hingga 3,6 μm , dengan rata-rata ukuran partikel berada pada rentang 1-2 μm . Distribusi ukuran partikel dapat dilihat pada Gambar 3 (b), yang menunjukkan bahwa sebagian besar partikel (sekitar 40%) berada dalam rentang ukuran 1,5-2 μm , diikuti oleh partikel ukuran 0,5-1 μm (sekitar 30%).



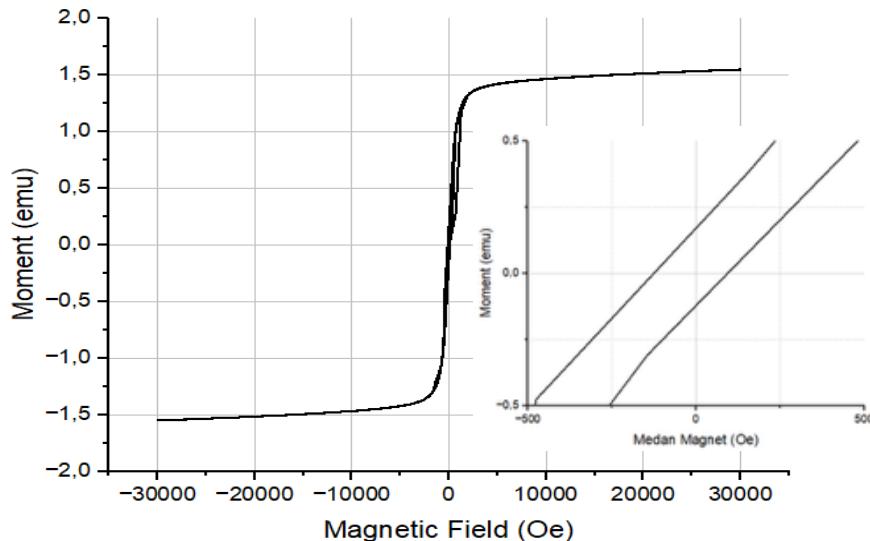
Gambar 3. (a) Morfologi nanomaterial magnetik ZnFe_2O_4 dengan menggunakan SEM, dan (b) Distribusi ukuran yang terlihat dalam SEM.

Meskipun ukuran kristalit yang diperoleh dari analisis XRD adalah sekitar 24,9 nm, ukuran partikel dari SEM menunjukkan nilai yang jauh lebih besar. Perbedaan ini menunjukkan bahwa partikel ZnFe_2O_4 terbentuk dalam bentuk agregat atau aglomerat dari kristalit nano, yang merupakan fenomena umum dalam material nanomaterial yang disintesis melalui metode kopresipitasi [19]. Aglomerasi diduga terjadi karena ukuran nanomaterial yang sangat kecil sehingga memiliki luas permukaan spesifik dan tegangan permukaan antar-muka yang besar. Hal ini menyebabkan energi pada permukaan nanomaterial tinggi yang membuat nanomaterial tidak stabil, sehingga partikel satu dengan partikel yang lainnya akan berikatan satu dengan yang lainnya untuk membuat stabil kembali. Ikatan antar partikel tersebut yang menyebabkan terjadinya aglomerasi [20].

Karakterisasi sifat magnetik dilakukan menggunakan VSM pada suhu ruang. Kurva histeresis yang diperoleh menunjukkan sifat magnetik dari nanomaterial ZnFe_2O_4 , seperti ditunjukkan pada Gambar 4. Berdasarkan analisis kurva histeresis, diperoleh nilai magnetisasi remanen (M_r) sebesar 0,0016 emu, koersivitas (H_c) sebesar 314 Oe, dan saturasi magnetisasi (M_s) sebesar 1,540 emu dengan massa 53 mg.

Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa nilai saturasi magnetisasi (M_s) sebesar 29,06 emu/g masih lebih rendah dibandingkan dengan hasil yang diperoleh oleh Husain et al. (2021), yaitu sebesar 59,81 emu/g. Selain itu, nilai koersivitas (H_c) yang diperoleh dalam penelitian ini mencapai 314 Oe, jauh lebih tinggi dibandingkan 44,56 Oe pada penelitian Husain [21]. Perbedaan ini mengindikasikan bahwa sifat

magnetik sampel pada penelitian ini cenderung bersifat feromagnetik lemah, sementara sampel Husain menunjukkan karakter superparamagnetik. Faktor-faktor seperti ukuran partikel yang lebih besar, tingkat kemurnian material, serta kondisi sintesis yang berbeda diduga menjadi penyebab utama perbedaan tersebut. Temuan ini menegaskan bahwa parameter sintesis memiliki pengaruh yang signifikan terhadap karakteristik magnetik material yang dihasilkan.



Gambar 4. Hasil VSM dari nanomaterial magnetik ZnFe₂O₄.

Kombinasi nilai M_s yang kecil, H_c rendah, dan M_r mendekati nol, maka dapat disimpulkan bahwa material ZnFe₂O₄ hasil sintesis menunjukkan karakter Feromagnetik lemah [21]. Nilai koersivitas yang relatif kecil juga mengindikasikan bahwa medan magnet eksternal yang dibutuhkan untuk membalik arah magnetisasi cukup rendah, mendukung indikasi sifat superparamagnetik parsial [20]. Sifat magnetik ini sesuai dengan karakteristik umum ZnFe₂O₄ dalam struktur spinel normal, di mana ion Fe³⁺ menempati posisi oktahedral dan tetrahedral yang dapat menghasilkan interaksi antiferomagnetik, namun tidak sepenuhnya saling meniadakan, sehingga menghasilkan momen magnetik total yang kecil [22].

5. Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian, dapat disimpulkan bahwa nanomaterial ZnFe₂O₄ berhasil disintesis dari material dasar pasir besi menggunakan metode kopresipitasi. Dari karakterisasi XRD teridentifikasi terbentuknya fase kristal ZnFe₂O₄ dengan struktur spinel normal, ukuran kristalit sebesar 24,9 nm, dan parameter kisi 8,28 Å. Citra SEM memperlihatkan morfologi butiran yang tidak seragam serta adanya aglomerasi, yang mengindikasikan terbentuknya agregat dari kristalit berskala nano. Sifat magnetik berdasarkan hasil VSM meliputi magnetisasi remanen sebesar 0,0016 emu, koersivitas 314 Oe, dan saturasi magnetisasi 1,540 emu. Nilai-nilai tersebut mencerminkan karakter feromagnetik lemah pada material yang dihasilkan.

Pustaka

- [1] Nyangiwe, NN. 2025. Applications of density functional theory and machine learning in nanomaterials : A review. *Next Materials*. vol 8. pp 1 -21.
- [2] Nengsih S 2021 Review literatur: Sintesis pasir besi menjadi nanomaterial magnetit melalui penerapan metode kopresipitasi. *Amina: J. Ar-Raniry* **3**(3), 112–122.
- [3] Amiri M, Salavati-Niasari M and Akbari A 2019 Magnetic nanocarriers: Evolution of spinel ferrites for medical applications. *Adv. Colloid Interface Sci.* **265**, 29–44.
- [4] Bakri AI 2020 Sintesis dan karakterisasi senyawa hematite bermaterial dasar pasir besi Bonto Kanang Takalar Kabupaten Takalar. *J. Ilmu Fisika: Teori dan Aplikasinya* **2**(2), 55–58.
- [5] Silvia L and Zainuri M 2020 Analisis silika (SiO₂) hasil kopresipitasi berbasis material alam menggunakan uji XRF dan XRD. *J. Fisika dan Aplikasinya* **16**, 12–17.

- [6] Rahmayanti M 2020 Sintesis dan karakterisasi magnetit (Fe_3O_4): Studi komparasi metode konvensional dan metode sonokimia. *Al-Ulum Sains dan Teknologi* **6**(1), 26–31.
- [7] Hasanah I, Rohman L and Supriyanto E 2020 Kurva histerisis material feromagnetik $Co_{0.8}Pt_{0.2}$ pada tiga daerah domain. *J. Pendidikan Fisika dan Keilmuan (JPKF)* **6**(1), 47–54.
- [8] Hu M, Butt HJ, Landfester K, Bannwarth MB, Wooh S and Thérien-Aubin H 2019 Shaping the assembly of superparamagnetic nanoparticles. *ACS Nano* **13**, 3015–3022.
- [9] Zhang J, Song JM, Niu HL, Mao CJ, Zhang SY and Shen YH 2015 $ZnFe_2O_4$ nanoparticles: Synthesis, characterization, and enhanced sensing property for acetone. *Sens. Actuators B Chem.* **221**, 55–62.
- [10] Hayati R and Astuti A 2015 Sintesis nanomaterial silika dari pasir pantai Purus Padang Sumatra Barat dengan metode kopresipitasi. *J. Fisika Unand* **4**(3), 282–287.
- [11] Gunanto YE 2018 High purity Fe_3O_4 from local iron sand extraction. *J. Phys.: Conf. Ser.* **1011**, 012014.
- [12] Abdullah JAA, Jiménez-Rosado M, Guerrero A and Romero A 2023 Effect of calcination temperature and time on the synthesis of iron oxide nanoparticles: Green vs. chemical method. *Materials* **16**(5), 1–18.
- [13] Nurpriyanti I, Mastuki M and Sulistyorini E 2024 Synthesis and characterization of $ZnFe_2O_4$ based on iron sand as a magnetic material. *Phys. Mech. New Mater. Their Appl.* Nova Science Publishers, USA.
- [14] Mekuye B and Abera B 2023 Nanomaterials: An overview of synthesis, classification, characterization, and applications. *Nano Select* **4**, 486–501.
- [15] Gestarila C and Puryanti D 2020 Sintesis nanomaterial zink ferit ($ZnFe_2O_4$) dengan metode kopresipitasi dan karakterisasi struktur kristalnya. *J. Fisika Unand* **9**(3), 299–303.
- [16] Restelli S, Albini B, Bonomi S, Bini M, Mozzati MC and Galinetto P 2023 Raman study of the laser-induced decomposition of $ZnFe_2O_4$ nanoparticles. *Mater. Today Commun.* **35**, 106405.
- [17] Puspitasari P, Rizkia UA, Sukarni S, Permanasari AA, Taufiq A and Putra ABNR 2021 Effects of various sintering conditions on the structural and magnetic properties of zinc ferrite ($ZnFe_2O_4$). *Mater. Res.* **24**(1), 1–9.
- [18] Andhare DD, Jadhav SA, Khedkar MV, Somvanshi SB, More SD and Jadhav KM 2020 Structural and chemical properties of $ZnFe_2O_4$ nanoparticles synthesised by chemical co-precipitation technique. *J. Phys.: Conf. Ser.* **1644**, 012014.
- [19] Huerta-Aguilar CA, Diaz-Puerto ZJ, Tecuapa-Flores ED and Thangarasu P 2022 Crystal plane impact of $ZnFe_2O_4$ -Ag nanoparticles influencing photocatalytical and antibacterial properties: Experimental and theoretical studies. *ACS Omega* **7**(38), 33985–34001.
- [20] Kiswanto H 2020 Analisis perumaterial struktur kristal dan distribusi kation kobalt ferrite akibat substitusi zinc. *J. Ilmu dan Inovasi Fisika (JIIF)* **4**(2), 155–163.
- [21] Husain S, Yusup M, Haryanti NH, Suryajaya S, Saukani M, Rodiansono A and Riyanto A 2020 Characteristics of zinc ferrite nanoparticles ($ZnFe_2O_4$) from natural iron ore. *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* **758**, 012001.
- [22] Hall CA, Ferrer P, Grinter DC, Kumar S, da Silva I, Robio-Zuazo J, Bencok P, De Groot F, Held G and Grau-Crespo R 2024 Spinel ferrites MFe_2O_4 ($M = Co, Cu, Zn$) for photocatalysis: Theoretical and experimental insights. *J. Mater. Chem. A* **12**, 29645–29656.