

Struktur Kristal dan Sifat Kemagnetan Nanopartikel *Mn-Ferrite* yang Disintesis dari Bahan Alam Pasir Besi

Heri Kiswanto¹, Abdul Hakim Prima Yuniarto¹, Nurul Imani Istiqomah², Edi Suharyadi²

¹ Program Studi Fisika, Institut Teknologi dan Sains Nahdlatul Ulama Pekalongan
Jl. Karangdowo No 9 Kedungwuni Pekalongan

² Departemen Fisika, Fakultas Matematika Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Gadjah Mada
Jl. Bulak Sumur, Sekip Utara BLS, Yogyakarta

Info Artikel

Histori Artikel:

Diajukan: 10 Agustus 2021
Direvisi: 02 September 2021
Diterima: 21 September 2021

Kata kunci:

struktur kristal
sifat kemagnetan
nanopartikel
Mn-ferrite
pasir besi

Keywords:

synthesis
characterization
nanoparticles
Mn-ferrite
iron sand

Penulis Korespondensi:

Heri Kiswanto
Email: herryfis011@gmail.com

ABSTRAK

Nanopartikel *Mn-ferrite* berbasis bahan alam pasir besi telah berhasil disintesis dengan metode kopresipitasi. Penelitian ini bertujuan untuk memperoleh nanopartikel *Mn-ferrite* dari pasir besi dan menganalisis struktur kristal serta sifat kemagnetannya. Sampel disintesis dengan memvariasikan konsentrasi NaOH yaitu 3 M, 6 M, dan 9 M. Karakterisasi sampel dilakukan dengan *X-ray diffractometer* (XRD), *tunneling electron microscopy* (TEM), dan *vibration sample magnetometer* (VSM). Pola XRD menunjukkan bahwa nanopartikel *Mn-ferrite* telah berhasil disintesis yang ditandai dengan munculnya puncak difraksi khas spinel ferit. Pola XRD juga mendeteksi beberapa puncak difraksi lain yang diidentifikasi sebagai $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ (*hematite*). Parameter kisi ditemukan meningkat dari 8,32 hingga 8,38 Å seiring dengan meningkatnya konsentrasi NaOH. Ukuran kristalit diestimasi dengan persamaan *Scherrer* yang ditemukan antara 20 hingga 26 nm. Hasil TEM menunjukkan sampel mengalami aglomerasi akibat interaksi magnetik serta tingginya tegangan permukaan antar-butir nanopartikel. Kurva histeresis magnetik menunjukkan bahwa sampel bersifat *soft-magnetic*. Magnetisasi saturasi terukur antara 11,2 emu/g hingga 12,5 emu/g, sedangkan koersivitas antara 98 Oe hingga 106 Oe. Hal ini dipengaruhi oleh keberadaan fase impuritas yang bersifat anti-ferromagnetik dengan persentase berbeda-beda untuk masing-masing sampel.

Mn-ferrites nanoparticles based on iron sand have been successfully synthesized by coprecipitation method. This study aims to obtain Mn-Ferrite nanoparticles from iron sand and analyze the crystal structure and magnetic properties. Samples were synthesized by varying the concentration of NaOH, namely 3 M, 6 M, and 9 M. Samples were characterized by X-ray diffractometer (XRD), tunneling electron microscopy (TEM), and vibration sample magnetometer (VSM). The XRD pattern shows that Mn-ferrite nanoparticles have been successfully synthesized which is characterized by the appearance of a typical diffraction peak of spinel ferrite. The XRD

identified as $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ as the NaOH concentration increased. The crystallite size was estimated by the Scherrer equation which was found to be between 20 and 26 nm. The TEM results showed that the samples had agglomeration due to magnetic interactions and the high surface tension between the nanoparticles. The magnetic hysteresis curve shows that the sample is soft-magnetic. The saturation magnetization measured between 11.2 emu/g to 12.5 emu/g, while the coercivity was between 98 Oe to 106 Oe. This is influenced by the presence of an anti-ferromagnetic impurity phase with different percentages for each sample.

Copyright © 2021 Author(s). All rights reserved



I. PENDAHULUAN

Sebagai negara kepulauan, Indonesia memiliki potensi pasir besi yang besar. Potensi sumber daya alam tersebut dapat diolah menjadi bahan atau produk yang memiliki nilai ekonomi lebih tinggi. Potensi pasir besi yang melimpah di Indonesia memiliki daya tarik tersendiri untuk dikembangkan menjadi produk yang lebih bernilai ekonomi dan berdaya guna (Yulianto *et al.*, 2013). Pasir besi ditengarai dapat diolah menjadi bahan magnet yang dapat dijadikan berbagai produk industri. Dengan potensi tersebut, saat ini telah banyak dikembangkan proses sintesis berbasis nanoteknologi untuk meningkatkan *performance* agar diperoleh bahan magnet dengan sifat yang lebih unggul.

Sejauh ini, pemanfaatan pasir besi masih sangat terbatas pada pemanfaatan secara langsung yaitu sebagai material bangunan. Pemanfaatan tersebut belum melibatkan proses lebih lanjut sehingga nilai ekonomisnya tergolong rendah. Kandungan dalam pasir besi di beberapa daerah di Indonesia memiliki kandungan mineral Fe_2O_3 49%, Fe_3O_4 29% dan TiO_2 11% (Sufiandi, 2015). Kandungan dari pasir besi ini menunjukkan potensi pengembangan lebih lanjut dari material ini. Pengembangan teknologi berbasis material magnet saat ini telah banyak diteliti. Beberapa studi menunjukkan bahwa pasir besi mengandung mineral magnetit (Fe_3O_4) yang berpotensi dikembangkan menjadi bahan industri magnet.

Industri bahan magnet adalah kegiatan industri yang memanfaatkan sifat kemagnetan suatu bahan untuk tujuan atau aplikasi tertentu. Bahan magnet saat ini banyak diminati karena aplikasinya yang luas di berbagai bidang. Pemanfaatan bahan magnet di beberapa negara maju seperti Jepang, telah menjadi ujung tombak kegiatan industri manufakturnya. Salah satu material magnet yang banyak dikembangkan adalah material *ferrite*. Hal ini dikarenakan material ini memiliki keunggulan sifat fisika maupun kimia dibandingkan material lain sehingga menarik untuk diteliti dan dikembangkan. Keunggulan berbagai sifat tersebut dipengaruhi oleh metode sintesis, suhu sintesis, pH, serta perlakuan *annealing* yang dapat mempengaruhi struktur kristalnya (Kiswanto, 2020)(Houshiar and Jamilpanah, 2018). Beragam pengembangan terus dilakukan untuk mendapatkan material *ferrite* secara lebih efisien misalnya dilakukan pada suhu rendah atau dengan menggunakan prekursor dari bahan alam sehingga dapat menekan biaya produksi. Saat ini telah banyak penelitian mengenai material *ferrite* yang disintesis dari bahan kimia, namun belum banyak penelitian material *ferrite* yang disintesis dari bahan alami. Padahal potensi bahan alami seperti pasir besi di Indonesia sangat melimpah, yang dapat diolah menjadi material *ferrite*.

Salah satu jenis *ferrite* yang menarik perhatian para peneliti saat ini adalah *Mn-ferrite* karena aplikasinya yang luas di berbagai bidang. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mensintesis nanopartikel *Mn-ferrite* berbahan dasar bahan alam pasir besi dan menganalisis struktur kristal serta sifat kemagnetannya. Sintesis nanopartikel dilakukan dengan metode kopresipitasi karena kemudahan pencampuran bahan, waktu sintesis relatif singkat, serta dapat dilakukan pada suhu rendah. Penelitian dilakukan dengan memvariasikan konsentrasi NaOH untuk mendapatkan komposisi optimum pada sintesis nanopartikel *Mn-ferrite*. Penelitian ini sangat berpotensi untuk dikembangkan karena akan memberikan manfaat bagi dunia industri dalam pengembangan bahan baku magnet untuk berbagai aplikasi serta dalam rangka mengoptimalkan potensi kekayaan sumber daya alam Indonesia. Beberapa bidang yang telah dikembangkan dalam pemanfaatan bahan magnet antara lain: industri transportasi atau Otomotif seperti *Anti Lock Braking System (ABS)*, *electric vehicles*, *hybrid cars*, di bidang industri kesehatan seperti *magnetic resonance imaging (MRI)*, media penghantaran obat (*drug delivery*), dll.), di bidang industri misalnya produk *audio-visuals*, industri perangkat elektronik, dan lain-lain (Sharma *et al.*, 2016).

II. METODE

2.1 Tahap Preparasi (Ekstraksi Pasir Besi)

Bahan dasar pasir besi yang digunakan adalah pasir besi yang berasal dari pantai Pangandaran Jawa Barat. Pasir besi diekstraksi dari pengotor dengan menggunakan magnet permanen, untuk kemudian dilakukan penyaringan dengan ayakan 200 mesh untuk mendapatkan bahan pasir besi dengan ukuran yang lebih homogen.

2.2 Tahap Sintesis

Sintesis sampel dilakukan dengan mencampurkan prekursor $\text{Mn}(\text{NO}_3)_2$ Merck Germany sebanyak 4,18 gram dan ekstrak pasir besi sebanyak 8,00 gram dengan cara dilarutkan pada 25 ml HCl 12 M dan dilakukan *stirring* selama 60 menit pada suhu 60°C . Hasil campuran berupa filtrat kemudian dicuci dengan aquades untuk membuang residunya. Selanjutnya larutan diendapkan dalam larutan NaOH dengan variasi molaritas sebagai berikut 3 M, 6 M, dan 9 M. Kemudian campuran larutan tersebut diaduk dengan *magnetic stirrer* selama 60 menit pada suhu 80°C . Hasil larutan berupa *presipitat* (endapan) MnFe_2O_4 basah kemudian diletakkan diatas magnet permanen untuk dipisahkan dari pelarutnya. Sampel dikeringkan dalam *furnace* pada suhu 90°C selama 2 jam untuk memperoleh sampel kering. Setelah itu, sampel digerus dan dilakukan pemanasan *annealing* pada suhu 500°C untuk meningkatkan kristalinitasnya.

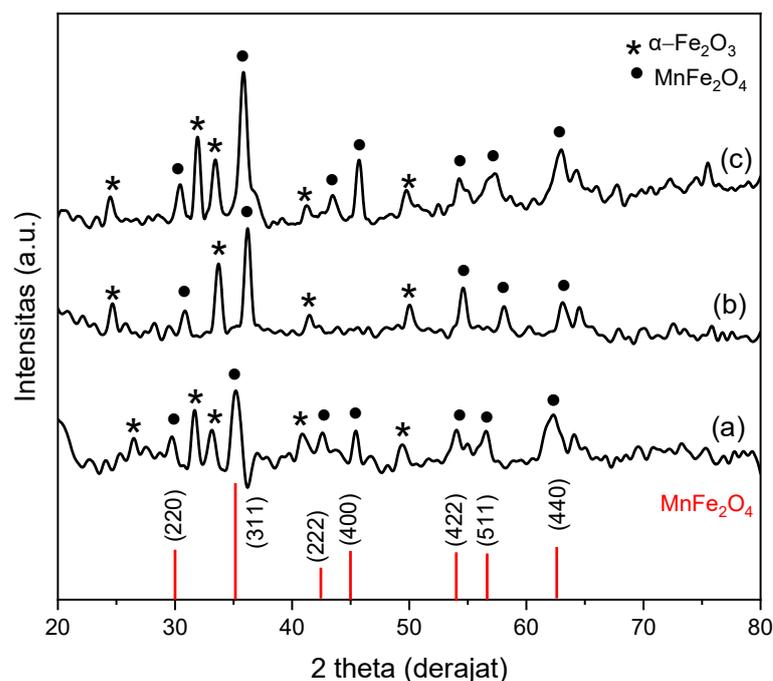
2.3 Tahap Karakterisasi

Karakterisasi struktur kristal dilakukan dengan *X-Ray diffractometer* yang dikondisikan pada 40 kV, 30 mA, serta sudut perekaman (2θ) pada rentang $20^\circ - 80^\circ$. Panjang gelombang sinar-X (λ *Cu K α*) yang digunakan adalah 1,5406 Å. Pengamatan mikrostruktur dan morfologi pada sampel dilakukan dengan *tunneling electron microscopy* (TEM) yang dioperasikan pada tegangan 200 kV, sedangkan penentuan ukuran partikel dilakukan dengan *software Image-J*. Karakterisasi sifat kemagnetan dilakukan dengan *vibrating sample magnetometer* (VSM).

III. HASIL DAN DISKUSI

3.1 Struktur Kristal

Kajian struktur kristal nanopartikel MnFe_2O_4 didasarkan pada hasil karakterisasi XRD. Pola XRD nanopartikel MnFe_2O_4 ditunjukkan pada Gambar 1. Pola XRD pada gambar 1 mengkonfirmasi bahwa nanopartikel MnFe_2O_4 telah berhasil disintesis yang ditandai dengan munculnya puncak difraksi khas spinel ferit. Terdapat beberapa puncak difraksi yang diidentifikasi sebagai bidang (220), (311), (222), (400), (422), (511), dan (440). Pola ini telah dicocokkan dengan data standar difraksi MnFe_2O_4 yaitu JCPDS nomor 10-0319 dengan struktur *face center cubic* dan termasuk ke dalam kelompok Fd-3m. Puncak difraksi dengan intensitas tertinggi yaitu bidang (311) dipilih untuk menganalisis parameter struktur kristal yang meliputi derajat kristalinitas, ukuran kristalit dan parameter kisi.



Gambar 1 Pola XRD nanopartikel MnFe_2O_4 untuk variasi NaOH: (a) 3 M, (b) 6 M, (c) 9 M

Pada Gambar 1 tampak bahwa konsentrasi NaOH berpengaruh terhadap derajat kristalinitas sampel. Derajat kristalinitas cenderung meningkat seiring dengan meningkatnya konsentrasi NaOH. Hal ini ditandai dengan meningkatnya intensitas puncak difraksi. Derajat kristal yang tinggi ditandai dengan intensitas puncak difraksi yang tinggi. Selain puncak-puncak difraksi nanopartikel $MnFe_2O_4$, pada gambar 1 juga ditemukan puncak lain yang ditandai dengan tanda bintang. Puncak tertinggi pada fasa tersebut terbaca pada daerah 2θ sekitar 33° yang diidentifikasi sebagai bidang (104) dan merupakan puncak utama dari fasa $\alpha-Fe_2O_3$ (*hematite*). Puncak-puncak lain yang muncul telah dicocokkan dan diidentifikasi sebagai puncak bidang (012), (110), (113), dan (024) yang dikonfirmasi sebagai fase $\alpha-Fe_2O_3$ berdasarkan data JCPDS no. 24-0027. Munculnya puncak-puncak tersebut diduga akibat terjadinya perubahan fasa pada saat sampel dipanaskan melalui proses *annealing*. Ketika material besi oksida (Fe_3O_4) yang dalam hal ini berasal dari pasir besi, dipanaskan pada suhu antara $150 - 650^\circ C$, maka akan terjadi perubahan fasa menjadi $\alpha-Fe_2O_3$ (Agusu *et al.*, 2019). Fasa $\alpha-Fe_2O_3$ merupakan fase stabil dari Fe_3O_4 saat terjadi peningkatan temperatur (Agusu *et al.*, 2019)(Tatarchuk *et al.*, 2018). Menurut Gubin dalam Tawainella dkk. (2014), fasa $\alpha-Fe_2O_3$ muncul akibat sintesis nanopartikel dilakukan pada suhu dibawah 950 K (Tawainella *et al.*, 2014). Munculnya puncak difraksi $\alpha-Fe_2O_3$ ini merupakan fasa impuritas dari $MnFe_2O_4$. Persentase fasa impuritas $\alpha-Fe_2O_3$ terhadap $MnFe_2O_4$ dapat diestimasi dengan Persamaan (1),

$$p(\%) = \frac{I_M}{I_M + I_f} \times 100\% \quad (1)$$

dimana I_M adalah intensitas fase $MnFe_2O_4$, sedangkan I_f adalah intensitas puncak difraksi fasa impuritas. Fase impuritas tertinggi terdapat pada sampel dengan dengan konsentrasi NaOH 9 M. Tawainella dkk (2014) menyatakan kemunculan fase impuritas $\alpha-Fe_2O_3$ ini sebagai akibat ion-ion sampel dan ion-ion oksigen yang saling bereaksi (Tawainella *et al.*, 2014). Nilai parameter kisi dan ukuran kristalit disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1 Parameter kisi, ukuran kristalit, serta *lattice strain*

Kode Sampel	Parameter Kisi (Å)	Ukuran Kristalit (nm)	Lattice Strain ($\times 10^{-3}$)	Purity (%)
a	8,32	25	1,238	65,07
b	8,34	26	1,938	66,03
c	8,38	20	2,647	59,79

Selain munculnya fase impuritas, pola XRD pada Gambar 1 terlihat bahwa puncak difraksi bidang (311) pada sampel c mengalami pelebaran (*broadening peak*) dan pergeseran puncak. Hal ini disebabkan karena adanya *strain*. *Strain* merupakan indikasi adanya defek atau cacat kristal. *Strain* terjadi akibat pola distribusi ion nanopartikel yang tidak semestinya akibat adanya dislokasi kisi, *stacking faults*, serta *triple junction* pada nanopartikel (Kumar *et al.*, 2020). *Strain* dapat menyebabkan terjadinya pelebaran puncak (*peak broadening*). Semakin besar pelebaran sudut puncak difraksi, semakin besar pula *strain* pada kisi kristal tersebut. Pelebaran puncak difraksi erat kaitanya dengan derajat kistalinitas struktur kristal. Derajat kristalinitas (*crystallinity*) yang tinggi ditandai dengan *peak* dengan intensitas yang tinggi (*sharp peak*) dan tidak melebar (*low broadness*). *Strain* (regangan) digunakan untuk mengidentifikasi defek pada kristal. Terjadinya regangan akibat adanya cacat pada kristal. *Strain* dapat dihitung dengan Persamaan (2),

$$\varepsilon = \frac{\beta \cos \theta}{4} \quad (2)$$

dimana β adalah FWHM pada bidang (311) dan θ merupakan sudut *Bragg*.

Untuk menentukan ukuran kristalit pada nanopartikel, digunakan metode *Scherrer* yang dinyatakan dalam Persamaan (3),

$$t = \frac{k\lambda}{B \sin \theta} \quad (3)$$

Nilai t menyatakan ukuran kristalit orde dalam nanometer, k menyatakan konstanta *Scherrer* (0,89), sedangkan β menyatakan FWHM (*fullwidth half maximum*) dalam satuan radian. Untuk menentukan parameter kisi dapat dihitung dengan persamaan (4),

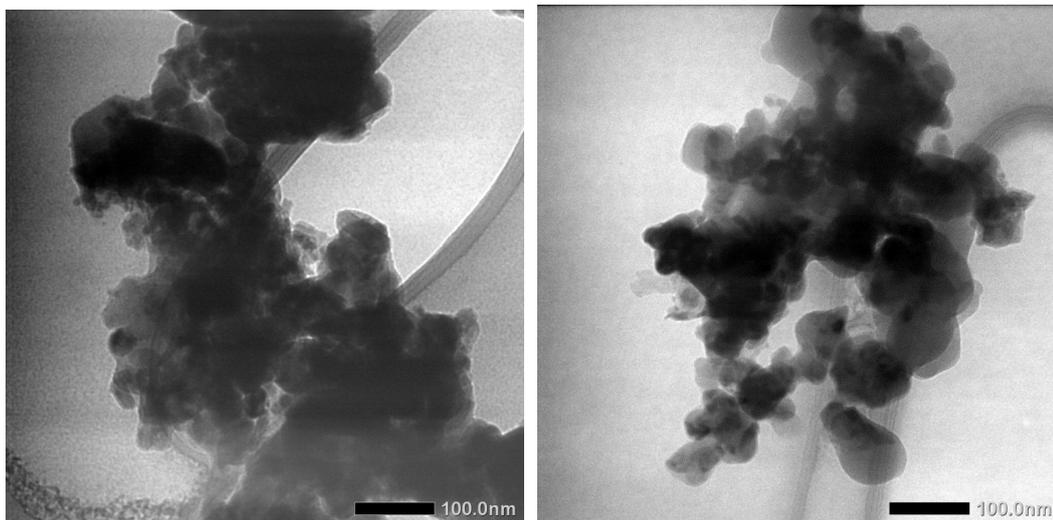
$$a = d\sqrt{h^2 + k^2 + l^2} \quad (4)$$

dimana a adalah parameter kisi, λ adalah panjang gelombang, θ adalah sudut *Bragg*, d adalah jarak antar bidang dan $(h k l)$ adalah indeks *Miller*.

3.2 Pengamatan Morfologi

Bentuk morfologi butiran nanopartikel MnFe_2O_4 dan distribusinya dari hasil karakterisasi TEM yang disajikan pada Gambar 2. Sampel nanopartikel memiliki bentuk serbuk (*powder*) serta mengalami aglomerasi karena terlihat saling terkumpul dan membentuk agregat. Aglomerasi butiran tersebut diduga terjadi karena beberapa faktor, ukuran butir nanopartikel yang sangat kecil menyebabkan luas permukaan nanopartikel menjadi sangat besar sehingga meningkatkan tegangan permukaan antar-butir nanopartikel (Kiswanto *et al.*, 2018). Oleh karena itu, energi permukaan menjadi sangat tinggi sehingga menyebabkan nanopartikel menjadi tidak stabil. Ketidakstabilan tersebut berakibat pada menyatunya antara partikel yang satu dengan partikel lain dan saling berikatan untuk mencapai kondisi kembali stabil. Ikatan antar partikel tersebut yang menyebabkan terjadinya aglomerasi sehingga sampel membentuk agregat. Selain itu, fenomena aglomerasi tersebut juga menandakan adanya reaktivitas antar butir yang disebabkan oleh interaksi magnetostatik dan interaksi pertukaran momen magnetik dipol (*exchange interaction*) pada nanopartikel (Theyvaraju and Muthukumar, 2015). Oleh karena itu, diperlukan *heating treatment* seperti *annealing* pasca sintesis yang bertujuan untuk mengurangi tegangan permukaan batas butir supaya butiran nanopartikel menjadi lebih terdispersi (Kiswanto *et al.*, 2020).

Berdasarkan Gambar 2, meningkatnya konsentrasi NaOH berpengaruh terhadap ukuran partikel. Ukuran partikel pada sampel dengan konsentrasi NaOH 3 M relatif lebih kecil dan terlihat lebih menggumpal. Berdasarkan olah data menggunakan software *image-J* ditemukan bahwa ukuran partikel cenderung meningkat seiring dengan meningkatnya konsentrasi NaOH. Hasil ini juga didukung dengan hasil XRD yang menyatakan bahwa ukuran kristalit meningkat seiring dengan meningkatnya konsentrasi NaOH.



Gambar 2 Hasil TEM nanopartikel MnFe_2O_4 dengan variasi NaOH (a) 3 M, (b) 9 M

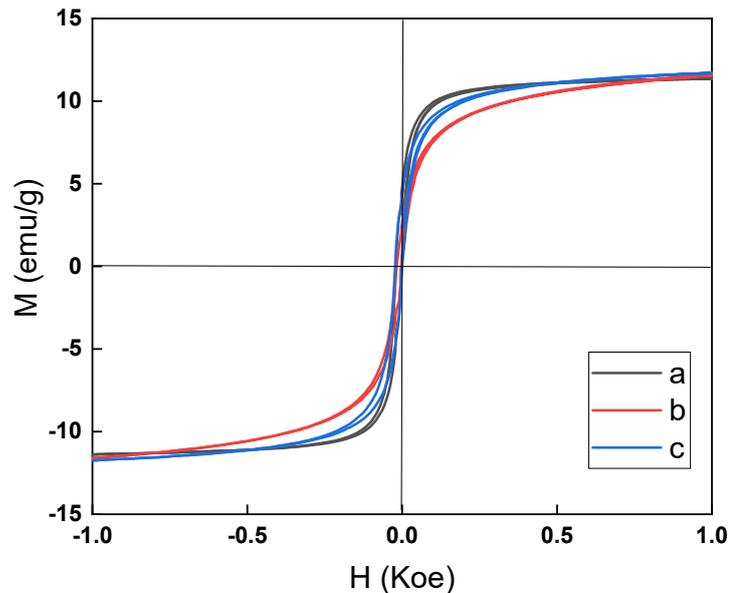
3.3 Sifat Kemagnetan

Karakterisasi sifat kemagnetan nanopartikel MnFe_2O_4 dilakukan dengan VSM yang ditunjukkan dalam kurva histeresis pada Gambar 3. Pada Gambar 3, terlihat bahwa kurva histeresis (M-H) yang terbentuk memiliki luasan yang sempit sehingga dapat disimpulkan sampel nanopartikel MnFe_2O_4 termasuk dalam material magnet lunak. Luasan kurva histeresis yang sempit menunjukkan bahwa material tersebut mudah untuk dimagnetisasi (tidak membutuhkan medan magnet yang besar)

sehingga material ini tergolong dalam magnet lunak (*soft magnetic*). Secara detail, nilai magnetisasi saturasi (M_s), magnetisasi remanen (M_r) serta koersivitas (H_c) pada masing-masing sampel disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2 Magnetisasi saturasi (M_s), magnetisasi remanen (M_r) dan koersivitas (H_c)

Sampel	M_s (emu/g)	M_r (emu/g)	H_c (Oe)
a	11,2	4,7	101
b	11,4	3,1	106
c	12,5	4,2	98



Gambar 3 Kurva histeresis nanopartikel $MnFe_2O_4$ (a) 3 M, (b) 6 M, (c) 9 M

Berdasarkan Tabel 2, terlihat bahwa konsentrasi NaOH berpengaruh terhadap nilai magnetisasi saturasi (M_s), magnetisasi remanen (M_r), serta koersivitas (H_c). Nilai M_s cenderung meningkat seiring dengan meningkatnya konsentrasi NaOH. Nilai M_s yang paling rendah terdapat pada sampel c yaitu sebesar 11,2 emu/g. Hal ini dikarenakan sample c memiliki fasa impuritas dengan persentase yang lebih tinggi jika dibandingkan dengan sampel lain. Hal ini dapat diamati dari intensitas puncak difraksi dari pola XRD pada gambar 1. Terlihat bahwa intensitas puncak difraksi fasa impuritas pada sampel c relatif lebih tinggi dari sampel yang lain. Keberadaan fasa impuritas tersebut menyebabkan nilai magnetisasi saturasinya menurun. Hal ini dapat dipahami karena fasa impuritas tersebut bersifat anti-ferromagnetik. Nilai magnetisasi saturasi sangat dipengaruhi adanya fase primer maupun fase sekunder, serta susunan atom pada masing-masing sub-ruang yaitu sub-ruang tetrahedral dan octahedral (Kiswanto *et al.*, 2020). Omelyanchik menyatakan bahwa nilai magnetisasi saturasi tidak hanya dipengaruhi oleh komposisi serta atom-atom penyusunnya, akan tetapi juga dipengaruhi oleh keberadaan impuritas (Omelyanchik *et al.*, 2019).

Selain itu, variasi nilai magnetisasi saturasi juga diduga akibat pengaruh ukuran partikel. Semakin besar ukuran partikel, maka semakin tinggi pula nilai koersivitasnya. Hasil ini sekaligus mengkonfirmasi kesesuaian teori yang menyatakan bahwa semakin kecil ukuran partikel, semakin mudah partikel untuk mengalami magnetisasi (Rao *et al.*, 2018). Berkurangnya ukuran partikel menyebabkan ketidakstabilan momen magnetik. Ketidakstabilan tersebut diakibatkan oleh rendahnya energi anisotropi yang dimiliki oleh partikel, sehingga ketika partikel diberikan medan magnet eksternal, momen magnetik pada partikel dengan ukuran yang lebih kecil lebih reaktif daripada partikel berukuran lebih besar dalam memberikan respon terhadap medan eksternal (Tawainella *et al.*, 2014).

Sementara itu, nilai H_c pada mulanya meningkat dengan meningkatnya konsentrasi NaOH dari 3 M menjadi 6 M, namun pada konsentrasi 9 M nilai H_c menurun. Nilai koersivitas ditemukan pada kisaran 98 Oe hingga 106 Oe. Hal ini dapat dikorelasikan dengan persamaan yang menyatakan hubungan medan koersivitas terhadap magnetokristalin anisotropi, yaitu:

$$H_c = \frac{2K}{\mu_0 M_s} \quad (5)$$

dimana H_c menyatakan nilai koersivitas, K merupakan konstanta anisotropik, sedangkan M_s adalah nilai magnetisasi saturasi. Hal ini dipengaruhi oleh keberadaan fase impuritas yaitu $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ yang bersifat anti-ferromagnetik pada masing-masing sampel. Tingginya kandungan fasa impuritas menyebabkan menurunnya nilai koersivitas, semakin tinggi kandungan impuritasnya maka semakin rendah nilai koersivitasnya.

IV. KESIMPULAN

MnFe_2O_4 telah berhasil disintesis dari pasir besi menggunakan metode kopresipitasi. Magnetisasi saturasi (M_s) dipengaruhi oleh kehadiran fasa impuritas, sampel dengan konsentrasi NaOH 6 M memiliki nilai M_s tertinggi yaitu 12,5 emu/g. Sedangkan koersivitas (H_c) selain dipengaruhi oleh kehadiran fasa impuritas, juga dipengaruhi oleh ukuran kristalit. Nilai koersivitas terbesar dimiliki oleh sampel dengan konsentrasi NaOH 6 M yaitu sebesar 106 Oe, hal ini diduga karena sampel tersebut persentase fasa impuritas paling rendah dengan ukuran kristalit paling besar. Diperlukan riset lebih lanjut sebelum dapat diaplikasikan untuk berbagai aplikasi.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada Direktorat Riset dan Pengabdian Masyarakat (DRPM) Kementerian Pendidikan dan Kebudayaan, Riset dan Teknologi yang telah memfasilitasi pembiayaan penelitian ini melalui skema Penelitian Dosen Pemula dengan Nomor Kontrak 3/062004/PG/SP2H/TD/2021 serta Laboratorium Fisika Material dan Instrumentasi, Universitas Gadjah Mada atas penggunaan peralatan dan tempat penelitian.

DAFTAR PUSTAKA

- Agusu, L., Ahmad, L.O. and Firihu, M.Z. (2019), "Crystal and microstructure of MnFe_2O_4 synthesized by ceramic method using manganese ore and iron sand as raw materials", *Journal of Physics: Conference Series*, Vol. 1153, pp. 2–9.
- Houshiar, M. and Jamilpanah, L. (2018), "Effect of Cu dopant on the structural, magnetic and electrical properties of Ni-Zn ferrites", *Materials Research Bulletin*, Elsevier, Vol. 98 No. October 2017, pp. 213–218.
- Kiswanto, H. (2020), "Analisis Perubahan Struktur Kristal dan Distribusi Kation Cobalt Ferrite Akibat Substitusi Zinc", *Jurnal Ilmu Dan Inovasi Fisika*, Vol. 4, pp. 155–163.
- Kiswanto, H., Puspitasari, A., Suharyadi, E., Kato, T. and Iwata, S. (2018), "Effect of Zinc on Crystal Structure and Magnetic Properties of $\text{Co}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Fe}_2\text{O}_4$ Nanoparticles Synthesized by Coprecipitation Method", *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Vol. 367 No. 1, p. 012001.
- Kiswanto, H., Suharyadi, E., Kato, T. and Iwata, S. (2020), "Sintesis dan Karakterisasi Nanopartikel Magnetik $\text{CoZnFe}_2\text{O}_4$ dengan Metode Kopresipitasi", *Wahana Fisika*, Vol. 5, pp. 51–61.
- Kumar, S., Kumari, K., Alharthi, F.A., Ahmed, F., Aljawfi, R.N., Alvi, P.A., Kumar, R., *et al.* (2020), "Investigations of TM (Ni, Co) doping on structural, optical and magnetic properties of CeO_2 nanoparticles", *Vacuum*, Vol. 181.
- Omelyanchik, A., Singh, G., Volochaev, M., Sokolov, A., Rodionova, V. and Peddis, D. (2019), "Tunable magnetic properties of Ni-doped CoFe_2O_4 nanoparticles prepared by the sol-gel citrate self-combustion method", *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Vol. 476 No. August 2018, pp. 387–391.
- Rao, B.P., Dhanalakshmi, B., Ramesh, S. and Rao, P.S.V.S. (2018), "Cation distribution of Ni-Zn-Mn ferrite nanoparticles", *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Elsevier, Vol. 456, pp. 444–450.

- Sharma, R., Thakur, P., Kumar, M., Thakur, N., Negi, N.S., Sharma, P. and Sharma, V. (2016), "Improvement in magnetic behaviour of cobalt doped magnesium zinc nano-ferrites via co-precipitation route", *Journal of Alloys and Compounds*, Elsevier B.V, Vol. 684, pp. 569–581.
- Sufiandi, D. (2015), "Konsentrasi Pasir Besi Titan Dari Pengotornya Dengan Cara Magnetik", *Metallurgi*, Vol. 26 No. 1, p. 15.
- Tatarchuk, T.R., Paliychuk, N.D., Bououdina, M., Al-Najar, B., Pacia, M., Macyk, W. and Shyichuk, A. (2018), "Effect of cobalt substitution on structural, elastic, magnetic and optical properties of zinc ferrite nanoparticles", *Journal of Alloys and Compounds*, Elsevier B.V, Vol. 731, pp. 1256–1266.
- Tawainella, R.D., Riana, Y., Fatayati, R., Kato, T. and Iwata, S. (2014), "Sintesis Nanopartikel Manganese Ferrite ($MnFe_2O_4$) dengan Metode Kopersipitasi dan Karakterisasi Sifat Kemagnetannya", Vol. XVIII No. April, pp. 1–7.
- Theyvaraju, D. and Muthukumar, S. (2015), "Preparation, structural, photoluminescence and magnetic studies of Cu doped ZnO nanoparticles co-doped with Ni by sol-gel method", *Physica E: Low-Dimensional Systems and Nanostructures*, Vol. 74, pp. 93–100.
- Yulianto, A., Sulhadi, S., Azis, A.L.I. and Dayati, E. (2013), "Synthesis of iron sand into nano Mn-ferrite", *Malaysian Journal of Fundamental and Applied Sciences*, Vol. 9 No. 4.