

Sintesis Nanopartikel Cobalt Ferrite (CoFe_2O_4) dengan Metode Kopresipitasi dan Karakterisasi Sifat Kemagnetannya

Eko Arief Setiadi, Nanda Shabrina, Hesti Retno Budi Utami, Nur Fadhilah Fahmi,
Takeshi Kato, Satoshi Iwata dan Edi Suharyadi

Jurusan Fisika, Fakultas MIPA, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta, Indonesia
Department of Quantum Engineering, Nagoya University, Furo-cho Chikusaka-ku, Nagoya, Jepang
esuharyadi@ugm.ac.id

Received 21-02-2013, Revised 12-03-2013, Accepted 18-03-2013, Published 25-04-2013

ABSTRACT

Magnetic nanoparticles of cobalt ferrite (CoFe_2O_4) have been synthesized by co-precipitation method with various synthesis temperature and concentration of NaOH. The structural characteristics and particle size of CoFe_2O_4 were determined by X-ray diffraction (XRD) and Transmission Electron Microscopy (TEM), its showed that nanoparticles well crystallized with various grain size which depend on synthesis parameters. The grain sizes estimated using the Scherrer formula were found that the grain size increased with increasing temperature synthesis and decreasing concentration of NaOH. Magnetic characterization of CoFe_2O_4 nanoparticles was investigated by using a Vibrating Sample Magnetometer (VSM). Sample with various concentration of NaOH showed that coercivity was decrease with the decrease of particle size. In other hand, samples with various synthesis temperature found that sample with smallest grain size have high coersivity. The saturation magnetization increase when crystallinity increase. Based on the results, it can be concluded that magnetic characterization of CoFe_2O_4 was influenced by grain size and crystallinity.

Keywords: nanoparticles, CoFe_2O_4 , co-presipitation

ABSTRAK

Nanopartikel magnetik *Cobalt Ferrite* (CoFe_2O_4) telah berhasil disintesis dengan metode kopresipitasi dengan memvariasi parameter suhu dan konsentrasi NaOH. Struktur dan ukuran partikel hasil analisa *X-Ray Diffraction* (XRD) dan *Transmission Electron Microscopy* (TEM) menunjukkan bahwa nanopartikel mengkristal dengan baik dan ada ketergantungan ukuran butir nanopartikel terhadap dua variasi parameter sintesis tersebut. Ukuran butir yang dihitung menggunakan persamaan *Scherrer* menunjukkan bahwa ukuran butir meningkat seiring peningkatan suhu dan berkurangnya konsentrasi NaOH. Sifat kemagnetan CoFe_2O_4 hasil analisa *Vibrating Sample Magnetometer* (VSM). Sampel dengan variasi konsentrasi NaOH, semakin kecil ukuran butir nanopartikel, medan koersivitasnya semakin rendah. Sementara untuk sampel dengan variasi suhu, semakin kecil ukuran butir, medan koersivitasnya semakin tinggi. Hasil VSM juga menunjukkan bahwa semakin tinggi kristalinitas sampel, nilai magnetisasi satu-rasanya semakin tinggi. Dengan demikian dapat disimpulkan bahwa ukuran butir dan kristalinitas mempengaruhi sifat kemagnetan nanopartikel CoFe_2O_4 .

Kata kunci: nanopartikel, CoFe_2O_4 , kopresipitasi

PENDAHULUAN

Nanopartikel magnetik telah banyak menarik minat bidang penelitian karena sifat fisik maupun kimianya yang unik dibanding dengan partikel ukuran kasar (*bulk*). Berbagai metode dikembangkan dalam mensintesis nanopartikel magnetik, di antaranya, metode kopresipitasi, dekomposisi termal, mikroemulsi dan hidrotermal^[1]. Selain itu ada pula metode poliol^[2], sonokimia^[3] dan metode lainnya. Di antara metode tersebut, metode kopresipitasi merupakan metode yang cukup efektif dan relatif sederhana dibanding metode lainnya. Metode ini menghasilkan distribusi ukuran butir yang relatif sempit dan dapat dilakukan pada kondisi lingkungan normal^[1].

Salah satu keunikan dari sifat nanopartikel magnetik adalah adanya fenomena sifat superparamagnetik. Sifat superparamagnetik merupakan sifat material yang memiliki magnetisasi tinggi ketika diberi medan magnet eksternal, namun ketika tidak ada medan magnet eksternal nilai magnetisasi rata-ratanya adalah nol. Sifat superparamagnetik ini muncul pada umumnya dari ferromagnetik dan ferrimagnetik dengan ukuran material sangat kecil (orde nanometer). Oleh karena itu dibutuhkan kajian penelitian berkaitan dengan pengontrolan distribusi ukuran nanopartikel beserta sifat kemagnetannya. Dengan pengontrolan distribusi ukuran ini diharapkan dapat diperoleh efektivitas fungsionalisasi nanopartikel hasil sintesis.

Salah satu material nanopartikel yang banyak diteliti adalah nanopartikel CoFe_2O_4 (*cobalt ferrite*). Selain berpotensi memiliki sifat superparamagnetik, sifat khusus yang membedakan nanopartikel CoFe_2O_4 dengan nanopartikel magnetik lain adalah CoFe_2O_4 memiliki nilai konstanta anisotropi yang lebih tinggi dibanding Fe_3O_4 (*magnetite*) dan $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ (*maghemite*)^[4]. Meski begitu, nanopartikel CoFe_2O_4 lebih sulit direaksikan melalui metode kopresipitasi dibanding Fe_3O_4 karena berasal dari garam dengan jenis ion logam yang berbeda. Ahn dkk^[5] menemukan bahwa intensitas sifat superparamagnetik CoFe_2O_4 terlihat seiring dengan semakin kecil ukuran partikelnya sementara suhu Curie akan meningkat secara linier seiring dengan kenaikan ukuran partikelnya.

Nanopartikel CoFe_2O_4 berpotensi dalam berbagai aplikasi, misalnya dalam biomedis sebagai bahan magnetik halus yang berperan sebagai pembawa target dalam pengiriman obat^[6], cairan magnetik^[7], katalis^[3] dan aplikasi lainnya. Li dkk^[8] menyatakan bahwa sampel CoFe_2O_4 memiliki potensi untuk diaplikasikan dalam bidang biomedis apabila memiliki distribusi ukuran yang sempit, kemagnetan saturasi relatif tinggi dan sifat superparamagnetik pada suhu kamar. Maka dari itu kontrol ukuran butir beserta sifat kemagnetan nanopartikel CoFe_2O_4 menjadi hal menarik untuk diteliti.

Berkaitan dengan ukuran butir, berdasar penelitian kelompok lain untuk nanopartikel Fe_3O_4 dapat dikontrol dengan berberapa cara, salah satunya dengan perbedaan metode sintesis^[2]. Dalam metode kopresipitasi sendiri, perbedaan suhu dan lama pengadukan juga dapat dijadikan parameter untuk mengontrol ukuran nanopartikel Fe_3O_4 hasil sintesis^[9]. Pada nanopartikel CoFe_2O_4 juga telah berhasil dibuktikan ketergantungan suhu terhadap distribusi ukuran butirnya. Hasil penelitiannya menunjukkan bahwa semakin besar suhu pengendapan dalam sintesis maka ukuran butir nanopartikel CoFe_2O_4 yang dihasilkan juga akan semakin besar^[10].

Pada penelitian ini akan fokus pada analisa ketergantungan ukuran butir nanopartikel terhadap variasi konsentrasi kopresipitan (NaOH). Ketergantungan terhadap variasi suhu juga akan diinvestigasi. Sifat kemagnetan serta kristalinitas dari sampel juga akan dipelajari. Dengan demikian diharapkan hasil penelitian ini kelak dapat menambah informasi dalam upaya

pengontrolan ukuran nanopartikel CoFe_2O_4 untuk mendapatkan karakter yang efektif untuk pengaplikasiannya.

METODE

Bahan utama sintesis nanopartikel CoFe_2O_4 ini adalah $\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ dan $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ sebagai penyedia ion Co^{2+} dan Fe^{3+} dengan perbandingan koefisien reaksi 1:2. Sintesis dengan metode kopresipitasi dilakukan dengan mencampurkan; 1,188 gram $\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$; 2,703 gram $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ dan 3,5 mL HCl (37%) di dalam 22,25 mL aquades hingga homogen. Kemudian masukkan campuran larutan tersebut ke dalam 200 mL larutan NaOH 1,5 M tetes demi tetes secara perlahan sambil diaduk menggunakan *magnetic stirrer* dengan kecepatan 1000 rpm selama 120 menit dengan variasi suhu 60, 80 dan 120°C (Tabel 1). Untuk sampel dengan variasi konsentrasi NaOH dilakukan dengan cara yang sama pada suhu 80°C dengan variasi konsentrasi NaOH sebanyak 1,5 M; 5 M dan 15 M (Tabel 2).

Setelah larutan terbentuk, tempatkan gelas beker berisi larutan tersebut di atas magnet permanen agar CoFe_2O_4 yang terbentuk cepat mengendap. Setelah terbentuk endapan, pisahkan endapan dengan larutannya. Kemudian cuci endapan dengan aquades kurang lebih 10 kali pengulangan untuk meminimalisir garam terlarut yang masih tertinggal. Untuk memperoleh CoFe_2O_4 serbuk maka panaskan endapan dalam *furnace* sampai kering pada suhu sekitar 70°C .

Tabel 1. Parameter sintesis Nanopartikel CoFe_2O_4 variasi suhu sintesis

No	Nama Sampel	Massa $\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (g)	Massa $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (g)	Volume HCl (37%) (mL)	Konsentrasi NaOH (M)	Durasi Pengadukan (menit)	Suhu Sintesis ($^\circ\text{C}$)
1	T60	1,188	2,703	3,5	1,5	120	60
2	T80	1,188	2,703	3,5	1,5	120	80
3	T120	1,188	2,703	3,5	1,5	120	120

Tabel 2. Parameter sintesis Nanopartikel CoFe_2O_4 variasi konsentrasi NaOH

No	Nama Sampel	Massa $\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (g)	Massa $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (g)	Volume HCl (37%) (mL)	Konsentrasi NaOH (M)	Durasi Pengadukan (menit)	Suhu Sintesis ($^\circ\text{C}$)
1	C1	1,188	2,703	3,5	1,5	120	80
2	C2	1,188	2,703	3,5	5,0	120	80
3	C3	1,188	2,703	3,5	15,0	120	80

Sampel CoFe_2O_4 dari berbagai variasi suhu dan konsentrasi NaOH yang telah terbentuk kemudian dikarakterisasi dengan *X-ray Diffraction* (Shimadzu model XD-3H) dengan tabung $\text{CuK}\alpha$ (panjang gelombang $1,5406 \text{ \AA}$) untuk mengetahui fase yang terkandung dalam sampel. Perhitungan distribusi ukuran sampel dilakukan dengan menggunakan persamaan Scherrer, yang dituliskan sebagai,

$$t = \frac{k\lambda}{D \cos \theta} \quad (1)$$

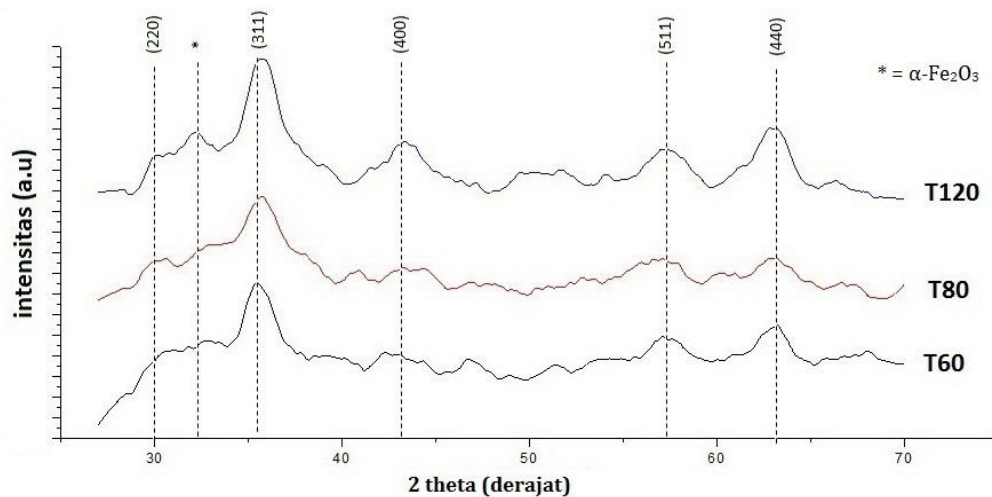
Dengan t adalah ukuran butir kristal, k adalah konstanta Scherrer (0,9), λ adalah panjang gelombang sinar-x dan D adalah lebar setengah puncak (*full width at half maximum = fwhm*) dari puncak utama. Hasil perhitungan akan dikonfirmasi dari pengamatan *Transmission Electron Microscopy* (Jeol JEM 1400) dan karakterisasi sifat kemagnetan dengan *Vibrating Sample Magnetometer* (Riken Denshi Co. Ltd).

HASIL DAN PEMBAHASAN

Nanopartikel CoFe_2O_4 telah berhasil disintesis dengan metode kopresipitasi dengan melarutkan $\text{FeCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ dan $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ pada HCl yang kemudian ditambahkan pada NaOH sebagai kopresipitan. Hasilnya akan terbentuk partikel yang berwarna hitam.

Untuk mengetahui fasa nanopartikel yang dihasilkan dari sintesis, maka digunakan *X-Ray Diffraction* (XRD). Pola XRD dari sampel seperti ditunjukkan pada Gambar 1 dan Gambar 2. Hasil XRD menunjukkan nanopartikel mengkristal baik dengan puncak-puncak yang mengidentifikasi karakter CoFe_2O_4 , dengan puncak-puncak utama pada daerah 2θ sekitar 35° yang merupakan puncak bidang (311) dari CoFe_2O_4 yang berbentuk kubik spinel. Analisa ini diperkuat dengan kemunculan puncak-puncak lain yang juga merupakan karakteristik dari CoFe_2O_4 yaitu puncak bidang (220), (400), (511) dan (440).

Pada analisa XRD ketiga sampel yang disintesis dengan memvariasikan suhu (Gambar 1), diperoleh nilai parameter kisi sampel dengan suhu sintesis 60°C (dinotasikan dengan T60), 80°C (dinotasikan dengan T80) dan 120°C (dinotasikan dengan T120) masing-masing adalah 8,363; 8,364 dan 8,325 Å. Nilai parameter kisi ini mendekati dengan nilai parameter kisi pada CoFe_2O_4 ukuran *bulk* yaitu 8,395 Å [10]. Dilihat dari ketinggian puncak utama, sampel T120 memiliki intensitas paling tinggi dan paling tajam dibanding sampel T60 dan T80. Hal ini menunjukkan bahwa sampel T120 memiliki derajat kristalinitas yang paling tinggi dari ketiga sampel.

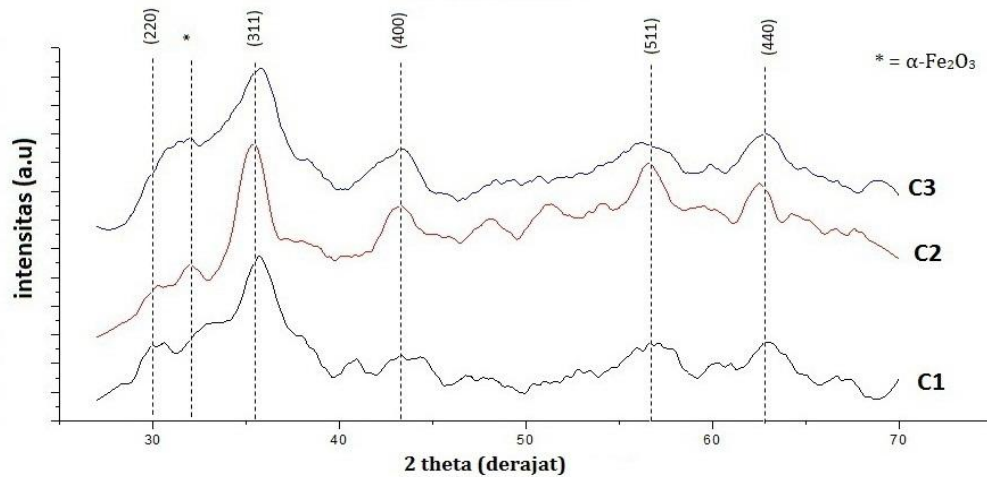


Gambar 1. Hasil pengujian XRD sampel dengan variasi suhu sintesis

Berdasarkan persamaan Scherrer diperoleh nilai ukuran butir kristal yaitu 8,844; 8,898 dan 9,656 nm untuk masing-masing sampel T60, T80 dan T120. Hal ini menunjukkan bahwa ukuran partikel meningkat seiring dengan kenaikan suhu sintesis. Maka dapat disimpulkan bahwa parameter suhu memegang peranan dalam menentukan ukuran butir nanopartikel.

Selanjutnya, hasil analisa XRD pada nanopartikel yang disintesis dengan memvariasikan konsentrasi NaOH (Gambar 2) diperoleh nilai parameter kisi 8,364; 8,408 dan 8,379 Å masing-masing untuk sampel yang disintesis dengan konsentrasi NaOH 1,5 M (dinotasikan dengan C1), 5 M (dinotasikan dengan C2) dan 15 M (dinotasikan dengan C3). Nilai ini mendekati dengan referensi CoFe_2O_4 ukuran *bulk* yaitu 8,395 Å^[10] yang menunjukkan bahwa ketiga sampel mengkristal dengan baik. Dari ketiga sampel, sampel C2 merupakan sampel dengan

derajat kristalinitas yang paling tinggi dilihat dari ketinggian dan ketajaman puncak utama dibandingkan dua sampel lainnya.

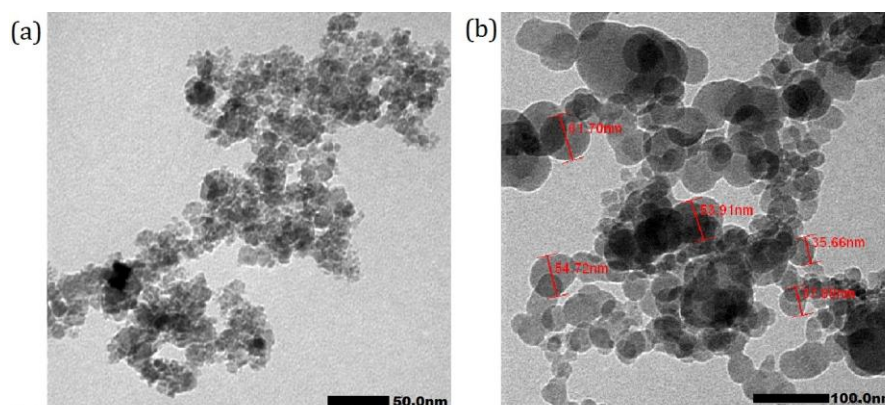


Gambar 2. Pola hasil pengujian XRD sampel dengan variasi konsentrasi NaOH

Berdasarkan persamaan Scherrer ukuran butir kristal diperoleh 8,898; 8,692 dan 7,664 nm masing-masing untuk sampel C1, C2 dan C3. Hasil ini menunjukkan bahwa ukuran butir kristal nanopartikel menurun seiring dengan meningkatnya konsentrasi NaOH. Maka dapat disimpulkan pula bahwa besarnya konsentrasi NaOH juga memegang peranan dalam menentukan besarnya ukuran butir nanopartikel.

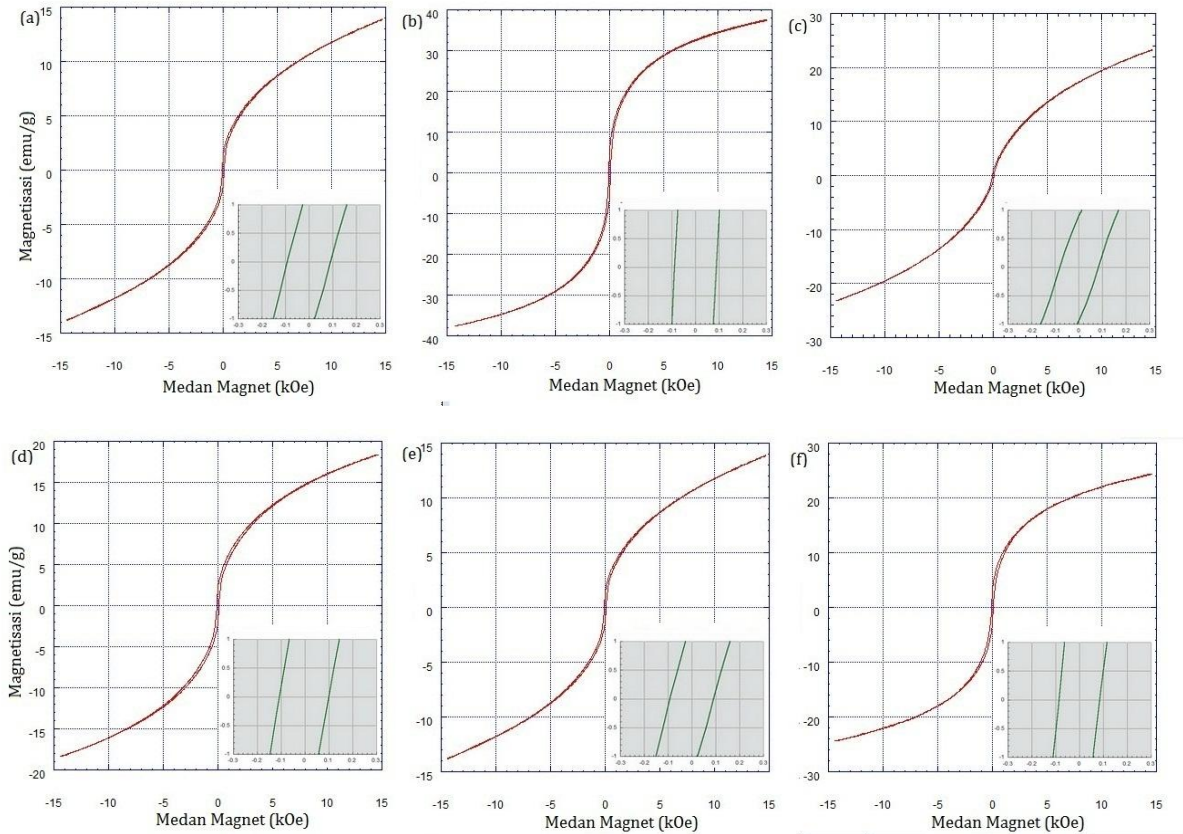
Selain adanya puncak-puncak yang merupakan karakteristik CoFe_2O_4 , ada pula puncak lain yang terlihat pada hasil analisa XRD. Puncak ini merupakan puncak karakter dari fasa lain yaitu fasa $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ (*hematite*) yang merupakan pengotor yang bersifat antiferomagnetik.

Gambar 3 merupakan struktur morfologi nanopartikel dengan menggunakan *Transmission Electron Microscopy* (TEM). Pada Gambar 3(a) merupakan pencitraan nanopartikel CoFe_2O_4 yaitu sampel C2 dengan distribusi ukuran partikel di bawah 12 nm, dan ukuran diameter rata-ratanya 8,448 nm, yang konsisten dengan hasil perhitungan dengan persamaan *Scherrer* pada analisa XRD yaitu 8,692 nm. Pada Gambar 3(b) merupakan gambar pencitraan nanopartikel CoFe_2O_4 (sampel C2) yang telah dimodifikasi dengan PEG-4000 dengan tujuan menambah stabilitas kimianya. Setelah dimodifikasi PEG-4000 ukuran diameter butir nanopartikel menjadi lebih besar dengan distribusi ukuran butir di atas 30 nm, dengan diameter rata-rata 42,42 nm.



Gambar 3. (color online) Hasil pecitraan TEM nanopartikel (a) CoFe_2O_4 ; (b) CoFe_2O_4 +PEG-4000

Pada pengujian VSM masing-masing sampel yang diuji menunjukkan karakter yang berbeda-beda seperti yang diperlihatkan pada Gambar 4. Dari pengamatan VSM menunjukkan bahwa nilai koersivitas nanopartikel hasil sintesis memiliki nilai relatif kecil. Ketika kurva histeresis diperbesar (pada inset) dapat terlihat nilai koersivitas sampel dengan nilai yang beragam (Tabel 3 dan 4).



Gambar 4. (color online) Kurva histeresis pengamatan VSM untuk sampel (a) C1; (b) C2; (c) C3; (d) T60; (e) T80 dan (f) T120

Tabel 3. Hasil pengamatan VSM pada sampel dengan variasi konsentrasi NaOH

No	Nama Sampel	Parameter Kisi (Å)	Ukuran Butir (nm)	Ketinggian Intensitas Puncak (311) (a.u)	Koersivitas (Oe)	Magnetisasi Saturasi (emu/g)
1	C1	8,364	8,898	48,888	92,17	13,85
2	C2	8,408	8,692	77,468	85,10	37,56
3	C3	8,379	7,664	59,417	73,59	23,21

Tabel 4. Hasil pengamatan VSM pada sampel dengan variasi suhu

No	Nama Sampel	Parameter Kisi (Å)	Ukuran Butir (nm)	Ketinggian Intensitas Puncak (311) (a.u)	Koersivitas (Oe)	Magnetisasi Saturasi (emu/g)
1	T60	8,363	8,844	59,091	107,50	18,38
2	T80	8,364	8,898	48,888	92,17	13,85
3	T120	8,325	9,656	82,222	87,66	24,35

Pada sampel dengan variasi konsentrasi NaOH diperoleh nilai koersivitas 92,17; 85,10 dan 73,59 Oe masing-masing untuk sampel C1, C2 dan C3. Hasil ini menunjukkan bahwa besarnya medan magnet eksternal yang dibutuhkan oleh nanopartikel yang termagnetisasi untuk

kembali ke posisi nol akan semakin kecil seiring dengan semakin kecilnya ukuran butir. Besarnya koersivitas nanopartikel menurun seiring dengan semakin kecil ukuran butir nanopartikel^[4, 9, 10]. Pada sampel dengan variasi suhu diperoleh nilai koersivitas 107,50; 92,17 dan 87,66 Oe masing-masing untuk sampel T60, T80 dan T120. Nilai koersivitas dari sampel mengecil seiring dengan meningkatnya ukuran butirnya. Hal ini berbeda dengan hasil kelompok lain^[10] di mana semakin besar ukuran diameter butir, nilai koersivitasnya juga akan semakin besar. Perbedaan ini diduga terjadi karena adanya penggumpalan (aglomerasi). Pengaruh derajat kristalinitas dan adanya pengotor juga mungkin terjadi. Namun hal ini masih belum dapat dibuktikan lebih rinci.

Nilai koersivitas pada semua sampel jauh lebih kecil dibanding dengan CoFe_2O_4 ukuran *bulk* yaitu 980 Oe^[10]. Berdasarkan nilai koersivitas yang jauh dari nilai *bulk* ini menunjukkan bahwa sampel mulai menuju ke sifat superparamagnetik, meski belum bisa dikatakan sebagai sampel superparamagnetik karena nilai koersivitasnya yang tidak nol.

Nilai magnetisasi saturasi nanopartikel dengan variasi konsentrasi NaOH yaitu untuk sampel C1, C2 dan C3 masing-masing adalah 13,85; 37,56 dan 23,21 emu/g. Sedangkan untuk sampel variasi suhu sintesis nilai saturasinya 18,38; 13,85 dan 24,35 emu/g masing-masing untuk sampel T60, T80 dan T120. Nilai magnetisasi saturasi yang berbeda-beda ini disebabkan oleh beberapa faktor, yaitu ukuran butir nanopartikel, derajat kristalinitas serta kehadiran fasa pengotor $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ [9]. Namun dari analisa data menunjukkan bahwa derajat kristalinitas memiliki peranan lebih dominan dalam menentukan tingkat saturasi nanopartikel CoFe_2O_4 hasil penelitian ini. Hal ini terlihat dari nilai saturasi sampel semakin naik seiring dengan semakin tinggi intensitas puncak hasil XRD (lihat Tabel 3 dan 4). Ketinggian intensitas puncak XRD ini mempresentasikan derajat kristalinitas sampel. Semakin tinggi intensitas puncak sampel maka derajat kristalinitasnya semakin tinggi. Untuk sampel variasi konsentrasi NaOH, sampel C2 memiliki derajat kristalinitas paling baik dengan tinggi intensitas puncak utama 77,468 a.u dengan nilai saturasi paling tinggi yaitu 37,15 emu/g. Sedangkan pada sampel dengan variasi suhu sintesis, derajat kristalinitas paling tinggi ditunjukkan pada sampel T120 dengan tinggi intensitas puncak utama 82,222 a.u dengan nilai saturasi 24,34 emu/g. Dari hasil ini dapat disimpulkan bahwa nilai saturasi sampel nanopartikel CoFe_2O_4 akan semakin tinggi seiring dengan derajat kristalinitas sampel yang semakin tinggi.

Jika nilai saturasi sampel C2 dibandingkan dengan sampel T120, berdasarkan derajat kristalinitasnya seharusnya nilai magnetisasi saturasi T120 lebih besar dibanding sampel C2. Namun hasil penelitian menunjukkan bahwa magnetisasi saturasi C2 ternyata lebih besar dibanding T120. Hasil ini diprediksi terjadi karena adanya pengaruh kehadiran fase pengotor $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ yang bersifat antiferomagnetik. Fase ini terlihat jelas keberadaannya pada kedua sampel seperti yang terlihat pada hasil pengujian XRD. Hasil analisa kami menunjukkan bahwa pada sampel T120 memiliki presentase pengotor yang lebih besar yaitu 18,95% dibanding sampel C2 yaitu 11,83%.

KESIMPULAN

Nanopartikel CoFe_2O_4 telah berhasil disintesis dengan metode kopresipitasi. Sintesis dilakukan dengan memvariasi parameter sintesis yaitu suhu sintesis dan konsentrasi kopresipitan (NaOH). Hasilnya menunjukkan bahwa ukuran butir meningkat seiring dengan kenaikan suhu sintesis dan akan menurun seiring dengan kenaikan konsentrasi NaOH yang terlibat dalam sintesis. Berdasarkan analisa sifat kemagnetan, untuk sampel dengan variasi konsentrasi NaOH menunjukkan bahwa ketika ukuran butir semakin kecil maka nilai koersivitasnya juga semakin kecil yang menunjukkan sifat nanopartikel yang mulai bertransformasi dari ferromagnetik ke sifat superparamagnetik. Sedangkan untuk sampel dengan variasi suhu

menunjukkan semakin kecil ukuran butir maka koersivitasnya ternyata semakin besar, yang diguga karena adanya aglomerasi. Pada pengamatan magnetisasi saturasi menunjukkan nilai magnetisasi saturasi yang semakin tinggi seiring dengan semakin tingginya derajat kristalinitasnya.

DAFTAR PUSTAKA

- 1 Lu, A. H., Salabas, E. L., and Schüth F. 2007. Magnetic Nanoparticles; Synthesis, Protection, Functionalization and Application, *Angew. Chem. Int. Ed., Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA*, Weinheim, Vol. 46, pp. 1222-1244.
- 2 Shen, Y. F., Tang, J., Nie, Z. H., Wang, Y. D., Ren, Y., and Zuo, L. 2009. Tailoring Size and Structural Distortion of Fe₃O₄ Nanoparticles for The Purification of Contaminated Water, *Bioresource Technology*, Vol. 100, pp. 4139-4146.
- 3 Senapati, K. K., Borgohain, C., and Phukan, P. 2011. Synthesis of Highly Stable CoFe₂O₄ Nanoparticles and Their Use as Magnetically Separable Catalyst for Knoevenagel Reaction in Aqueous Medium, *Journal of Molecular Catalysis A: Chemical*, Vol. 339, pp. 24-31.
- 4 Castillo, V. L. C. D. 2005. *Synthesis and Characterization of Cobalt-Substituted Ferrite Nanoparticles Using Reverse Micelles*, Thesis, University of Puerto Rico, Mayagüez Campus.
- 5 Ahn, Y., Choi E. J., and Kim, E. H. 2003. Super paramagnetic Relaxation in Cobalt Ferrite Nanoparticles Synthesized from Hydroxide Carbonate Precursors, *Rev. Adv. Mater. Sci*, Vol. 5, pp. 477-480.
- 6 Tamhankar, P. M., Kulkarni, A. M., and Watawe, S. C. 2011. Functionalization of Cobalt Ferrite Nanoparticles with Alginate Coating for Biocompatible Applications, *Materials Sciences and Applications*, Vol. 2, pp. 1317-1321.
- 7 Pauline, S., and Amaliya, A.P. 2011. Synthesis and Characterization of Highly Monodisperse CoFe₂O₄ Magnetic Nanoparticles by Hydrothermal Chemical Route, *Archives of Applied Science Research*, Vol. 3 No.5, pp. 213-223.
- 8 Li, X. H., Xu C. L., Han, X. H., Qiao, L., Wang, T., and Li, F. S. 2010. Synthesis and Magnetic Properties of Nearly Monodisperse CoFe₂O₄ Nanoparticles Through a Simple Hydrothermal Condition, *Nanoscale Res Lett*, Vol. 5, pp. 1039-1044.
- 9 Riyanto, A. 2012. *Sintesis Nanopartikel Fe₃O₄ dan Potensinya sebagai Material Aktif pada Permukaan Sensing Biosensor Berbasis SPR*, Thesis, Program Pascasarjana, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta.
- 10 Kim, Y. I., Kim, D., and Lee, C. S. 2003. Synthesis and Characterization of CoFe₂O₄ Magnetic Nanoparticles Prepared by Temperature-controlled Coprecipitation Method, *Physica B*, Vol. 337, pp. 42-51.