
Sintesis dan Karakterisasi Nanopartikel Magnetik CoZnFe₂O₄ dengan Metode Kopresipitasi

Heri Kiswanto^{1*}, Edi Suharyadi², Takeshi Kato³, Satoshi Iwata⁴

¹*Program Studi Fisika, Insitut Teknologi dan Sains Nahdlatul Ulama Pekalongan,
Jl. Karangdowo No. 9 Kedungwuni Pekalongan Jawa Tengah 51173, Indonesia*

²*Departemen Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam,
Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta, Indonesia*

³*Department of Electronics, Nagoya University, Japan*

⁴*Institute of Materials and Systems Sustainability, Nagoya University, Japan*

Penulis Penanggungjawab. E-mail: herikis@itsnupekalongan.ac.id (Heri Kiswanto)

ABSTRAK

Nanopartikel CoZnFe₂O₄ telah berhasil disintesis dengan metode kopresipitasi dan diannealing pada suhu yang berbeda, yaitu 400°C, 600°C, 800°C dan 1000°C selama 2 jam. Ukuran kristalit diestimasi dengan formula Scherrer's dan ditemukan meningkat dari 13,4 hingga 39,2 nm akibat pertumbuhan butir. Parameter kisi ditemukan meningkat dari 8,18 hingga 8,25 Å akibat substitusi Zn akibat substitusi Zn yang memiliki radius ionic lebih besar. Spektra FTIR mengkonfirmasi adanya vibrasi stretching pada bilangan gelombang sekitar 478 dan 586 cm⁻¹ pada kisi tetrahedral dan kisi oktahedral. Baik koersivitas (*H_c*) maupun magnetisasi saturasi (*M_s*) meningkat dari 51-191 emu/g dan 150 – 250 Oe dengan meningkatnya suhu annealing karena adanya pertumbuhan butir serta perubahan mikrostruktur. Citra TEM menunjukkan bahwa morfologi dan mikrostruktur berubah secara signifikan selama annealing. Pada suhu 1000°C memberikan hasil optimum pada nilai *M_s* dan *H_c* nanopartikel CoZnFe₂O₄.

Kata Kunci : Nanopartikel CoZnFe₂O₄; Suhu Annealing; Struktur Kristal; Sifat Kemagnetan.

ABSTRACT

CoZnFe₂O₄ nanoparticles was successfully synthesized by the coprecipitation method and annealed at different temperatures, namely 400°C, 600°C, 800°C and 1000°C for two hours. The size of the crystallites was estimated by the Scherrer's formula and found to increase from 13.4 to 39.2 nm due to grain growth. The lattice parameter was found to increase from 8.18 to 8.25 Å due to Zn substitution which has a larger ionic radius. The FTIR spectra confirm the existence of stretching vibrations in wave numbers around 478 and 586 cm⁻¹ in the tetrahedral lattice and octahedral lattice. Both coercivity and saturation magnetization increased from 51 - 191 emu / g and 150 - 250 Oe with increasing annealing temperature. This can be correlated with grain growth and microstructural changes. TEM images show that morphology and microstructure significantly changed during annealing process. At a temperature of 1000 °C gives optimum results for the *M_s* and *H_c* values of CoZnFe₂O₄ nanoparticles.

Keywords : CoZnFe₂O₄; Annealing temperature; Crystal Structure; Magnetic Properties.

1. Pendahuluan

Nanopartikel magnetik merupakan salah satu jenis nanopartikel yang banyak diteliti karena sifatnya yang unik dan ukuran partikelnya yang dapat dikontrol [1]. Ukuran kristalit tersebut mempengaruhi sifat kemagnetannya [2], oleh karena itu, pengolahan ferit ini menjadi penting dan menarik untuk dikaji. Salah satu nanopartikel yang banyak dikaji saat ini adalah nanopartikel ferit.

Berdasarkan struktur kristalnya, ferit diklasifikasikan menjadi tiga jenis yaitu garnet, magneto-plumbite dan spinel [3]. Dari ketiga jenis tersebut, spinel

spinel ferit merupakan salah satu yang banyak dikaji karena aplikasinya yang luas, misalnya sebagai media penyimpan data, *magnetic devices*, *ferro-fluids*, *drug delivery*, dan lain-lain [4].

Berbagai metode untuk mensintesis nanopartikel ferit telah banyak dikembangkan seperti metode *sol-gel*, *microwave auto-combustion*, *ceramic processing*, *hydrolysis*, *mechanical alloy*, *hot-press sintering* dan kopresipitasi [5]. Di antara metode-metode tersebut, kopresipitasi merupakan salah satu metode yang banyak dipilih karena efektivitas dan produktivitasnya. Selain mudah dalam homogenisasi

prekursor, biaya yang relatif murah, waktu sintesis yang relatif singkat serta dapat dilakukan pada suhu rendah. Selain itu juga memiliki control yang baik terhadap ukuran partikel melalui pendekatan stoikiometrinya [6].

Sementara itu, Sundarajan (2015) menyatakan bahwa sifat kemagnetan nanopartikel selain dipengaruhi oleh komposisi juga dipengaruhi oleh pemanasan pasca sintesis seperti *annealing*. Pemanasan ini bertujuan untuk memperbaiki mikrostruktur dan meningkatkan derajat kristalinitas dari sampel [7]. Hal ini disebabkan karena adanya *recovery*, *recrystallization* dan *grain growth* [8]. Beberapa penelitian terkait pengaruh suhu *annealing* terhadap struktur kristal dan sifat kemagnetan pada nanopartikel dan ferit telah banyak dilakukan, tapi sejauh ini tidak banyak ditemukan penelitian pengaruh suhu *annealing* pada nanopartikel $\text{CoZnFe}_2\text{O}_4$ sehingga menarik untuk dikaji.

Jafari dkk. (2015), meneliti pengaruh suhu *annealing* terhadap fase transisi magnetik pada nanopartikel Fe_3O_4 [9]. Hasil penelitian menunjukkan bahwa M_s dan ukuran kristalit meningkat dengan meningkatnya suhu *annealing*. El-Sayed dkk. (2017) menyatakan bahwa parameter kisi dan ukuran partikel nanopartikel NiFe_2O_4 meningkat seiring meningkatnya suhu *annealing*. M_s dan H_c juga ditemukan meningkat yang dikaitkan ukuran partikel dan distribusi kation [10]. Sedangkan

Dippong dkk. (2017) meneliti pengaruh suhu *annealing* pada struktur kristal dan sifat kemagnetan nanopartikel CoFe_2O_4 - SiO_2 . Intensitas puncak difraksi pada hasil XRD meningkat seiring dengan meningkatnya suhu *annealing* yang mengindikasikan adanya peningkatan derajat kristalinitas [11]. Hasil pengamatan menunjukkan bahwa ukuran kristal, magnetisasi saturasi (M_s) dan koersivitas (H_c) cenderung meningkat dengan meningkatnya suhu *annealing*.

Penelitian ini bertujuan untuk mensintesis dan mengkarakterisasi nanopartikel magnetik $\text{CoZnFe}_2\text{O}_4$ yang disintesis dengan metode kopresipitasi. Karakterisasi struktur Kristal dan sifat kemagnetan nanopartikel $\text{CoZnFe}_2\text{O}_4$ dilakukan dengan *X-Ray Diffractometer (XRD)*, *Transmission Electron Microscopy (TEM)*, *Fourier Transform Infra Red (FTIR) Spectroscopy*, dan *Vibrating Magneto Sample (VSM)*.

2. Bahan dan Metode

Sampel nanopartikel $\text{CoZnFe}_2\text{O}_4$ disintesis dengan metode kopresipitasi. *Precursor* digunakan untuk mensintesis nanopartikel adalah sebagai berikut: FeCl_3 , CoCl_2 , ZnSO_4 , serta HCl dari *Merck*, Jerman. Sedangkan *precursor* untuk membuat larutan basa adalah NaOH dari *Merck*. Sampel hasil kopresipitasi berbentuk

dry powder yang selanjutnya dilakukan proses *annealing* pada suhu 400°C, 600°C, 800°C dan 1000°C yang ditahan selama dua jam.

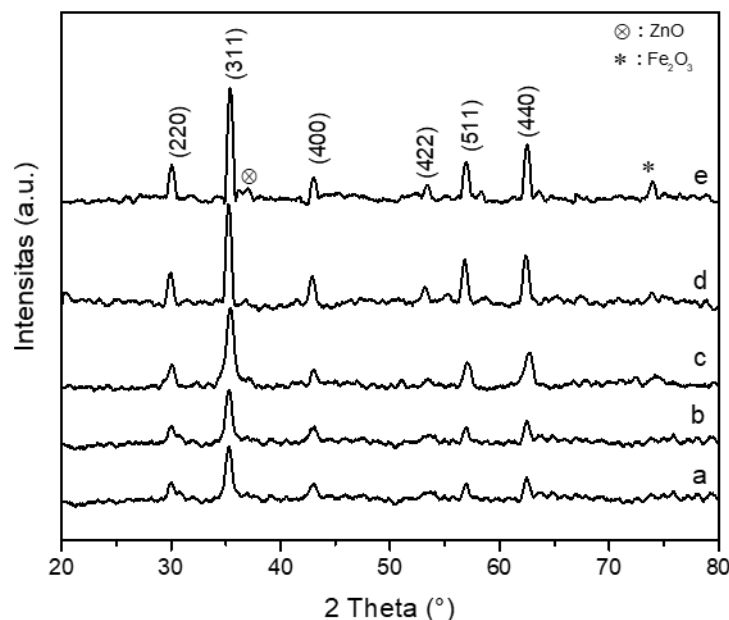
Struktur kristal sampel dikarakterisasi dengan *Rigaku MiniFlex 600 Benchtop X-Ray Diffractometer* (XRD) menggunakan radiasi monokromatik Cu K α ($\lambda = 1,5406 \text{ \AA}$). Pola XRD direkam dalam rentang 20° - 80°. Struktur mikro, ukuran dan bentuk sampel diamati dengan *Transmission Electron Microscopy* (JEOL TEM - 1400) dioperasikan pada 200 kV, sedangkan distribusi ukuran partikel ditentukan dengan menggunakan *software Image-J*. Analisis ikatan diukur dengan *Fourier Transform Infra Red (FTIR Spectroscopy Shimadzu Prestige-21)*

untuk mengkonfirmasi pembentukan fase spinel. Sifat kemagnetan (M_s dan H_c) pada sampel diukur dengan *Vibrating Sample Magnetometer* (VSM Riken Denshi Co Ltd) pada suhu kamar.

3. Hasil dan Pembahasan

Kajian struktur kristal nanopartikel CoZnFe₂O₄ berdasarkan hasil karakterisasi XRD seperti ditunjukkan pada Gambar 1.

Pola XRD mengkonfirmasi bahwa nanopartikel CoZnFe₂O₄ telah berhasil disintesis yang ditandai dengan munculnya puncak difraksi khas spinel ferit. Pola ini telah dicocokkan dengan data standar difraksi CoFe₂O₄ (JCPDS nomor 22-1086) dan ZnFe₂O₄ (JCPDS



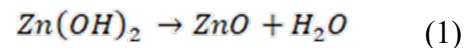
Gambar 1. Pola XRD nanopartikel CoZnFe₂O₄ pada suhu *annealing* (a) *non-annealed*; (b) 400°C; (c) 600°C; (d) 800°C; (e) 1000°C

nomor 82-1049). Terdapat lima puncak difraksi yang diidentifikasi sebagai bidang (220), (311), (400), (422), (511), dan (440) masing-masing pada 2θ di sekitar sudut 29° , 35° , 43° , 56° dan 62° . Puncak difraksi dengan intensitas tertinggi yaitu bidang (311) dipilih untuk menganalisis parameter struktur kristal. Parameter kisi ditemukan meningkat seperti yang dilaporkan oleh Hassadee dkk. [12] Gul [3] [3] dan Tatarchuk dkk. [13] pada penelitian sebelumnya. Hal ini dapat dijelaskan karena jari-jari kation Zn^{2+} ($0,60 \text{ \AA}$) lebih besar daripada jari-jari kation Co^{2+} ($0,58 \text{ \AA}$). Ukuran kristalit nanopartikel diestimasi dengan menggunakan formula *Scherrer* dan ditemukan meningkat dari $13,4 \text{ nm}$ hingga $39,2 \text{ nm}$ dengan meningkatnya suhu *annealing*.

Pada Gambar 1, dapat diamati bahwa intensitas puncak difraksi bidang (311) pada sampel pasca *annealing* memiliki intensitas puncak difraksi yang lebih tinggi dan tajam yang mengindikasikan bahwa derajat kristalinitasnya meningkat seiring dengan meningkatnya suhu *annealing*. Hal ini menyebabkan kisi kristal mengalami pemuaian (*expansion*) sehingga jarak antar bidang difraksi (d) bertambah panjang.

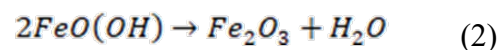
Selain itu, pola XRD pada Gambar 1 juga mengkonfirmasi keberadaan fasa impuritas pada sampel nanopartikel antara lain fasa ZnO dan Fe_2O_3 . Fasa ZnO (JCPDS no. 36-1452) terbentuk melalui mekanisme

reaksi dekomposisi fasa $Zn(OH)_2$ akibat perlakuan panas yang diberikan melebihi titik lelehnya, yaitu $125^\circ C$ (MSDS CAS no. 20427-58-1). Reaksi dekomposisi tersebut memenuhi persamaan (1) berikut,



ZnO merupakan material diamagnetik yang memiliki struktur kristal *hexagonal wurstzite* dengan parameter kisi masing-masing berukuran $a = 3,25 \text{ \AA}$ dan $c = 5,22 \text{ \AA}$ [2]. Keberadaan ZnO dalam sampel material magnetik ferrit akan turut berkontribusi melemahkan respon kemagnetan sampel. Keberadaan ZnO juga menjadi indikasi bahwa terdapat senyawa Zn hidroksida yang tidak berhasil bereaksi membentuk senyawa ferrit $CoZnFe_2O_4$. Akibatnya sampel akan mengalami defisiensi ion Zn dan menyebabkan penyimpangan pola distribusi kation-kation penyusun nanopartikel dari stoikiometri $CoZnFe_2O_4$ yang diharapkan.

Sedangkan Fasa Fe_2O_3 (JCPDS no. 33-0664) terbentuk dari proses dekomposisi termal senyawa $FeO(OH)$ pada suhu diatas $300^\circ C$. Mekanisme reaksi pembentukan senyawa Fe_2O_3 dapat dituliskan sesuai persamaan 2 berikut,



Fasa Fe_2O_3 bersifat ferrimagnetik di bawah suhu $620^\circ C$. Fasa ini memiliki struktur kristal kubik FCC spinel [2].

Secara detail, pengaruh suhu *annealing* terhadap ukuran kristalit, *strain* dan parameter kisi dan densitas disajikan pada Tabel 1 berikut.

Tabel 1. Pengaruh suhu *annealing* terhadap ukuran kristalit, *strain* dan parameter kisi

No	Suhu <i>Annealing</i> (°C)	Ukuran Kristalit (nm)	Strain ($\times 10^{-3}$)	Parameter Kisi (Å)
1	-	10,2	2,94	8,17
2	400	13,4	2,28	8,19
3	600	19,4	1,58	8,24
4	800	29,5	1,03	8,21
5	1000	39,7	0,74	8,25

Sampel nanopartikel $\text{CoZnFe}_2\text{O}_4$ pasca *annealing* memiliki ukuran kristalit yang lebih besar dibandingkan sampel tanpa perlakuan *annealing*. Meningkatnya suhu *annealing* menyebabkan ukuran kristalit meningkat dan menurunkan nilai *strain*. *Strain* berpotensi menyebabkan permukaan kristal menjadi tidak teratur (*surface disorderness*) sehingga dapat menghambat pertumbuhan kristal [14], dengan berkurangnya nilai *strain* mengakibatkan proses pertumbuhan kristalit berlangsung dengan baik sehingga menghasilkan ukuran kristalit yang lebih besar.

Secara matematis, hubungan ukuran butir nanopartikel terhadap suhu *annealing* dapat dinyatakan dengan persamaan Arrhenius,

$$t_{NP} = Ce^{\left(\frac{E}{RT}\right)} \quad (3)$$

dengan t butir NPs adalah ukuran butir nanopartikel; C adalah konstanta laju reaksi spesifik nanopartikel; E menyatakan energi aktivasi nanopartikel; R adalah konstanta umum gas ideal; dan T menyatakan suhu mutlak *annealing*.

Sampel nanopartikel $\text{CoZnFe}_2\text{O}_4$ pasca *annealing* memiliki ukuran kristalit yang lebih besar dibandingkan sampel tanpa perlakuan *annealing*. Berdasarkan Tabel 1, dapat diamati bahwa meningkatnya suhu *annealing* dapat meningkatkan ukuran kristalit dan menurunkan nilai *strain*. *Strain* berpotensi menyebabkan permukaan kristal menjadi tidak teratur (*surface disorderness*) sehingga dapat menghambat pertumbuhan kristal yang akhirnya berdampak pada ukuran kristalit. Oleh karena itu, dengan berkurangnya nilai *strain* mengakibatkan proses pertumbuhan kristalit berlangsung dengan baik sehingga menghasilkan ukuran kristalit yang lebih besar. Selain itu meningkatnya ukuran kristalit juga dapat dikorelasikan dengan energi termal (dalam bentuk difusi panas) yang diberikan pada permukaan nanopartikel sehingga memicu terjadinya pertumbuhan butir baru.

Dalam proses pertumbuhan butir (*grain growth*), nanopartikel mengalami tahap nukleasi. Pada tahap ini, nanopartikel mengalami energi permukaan (*surface energy*) berkurang akibat adanya gaya penggerak (*driving force*) yang bekerja di seluruh bagian permukaan nanopartikel untuk berinteraksi dengan permukaan

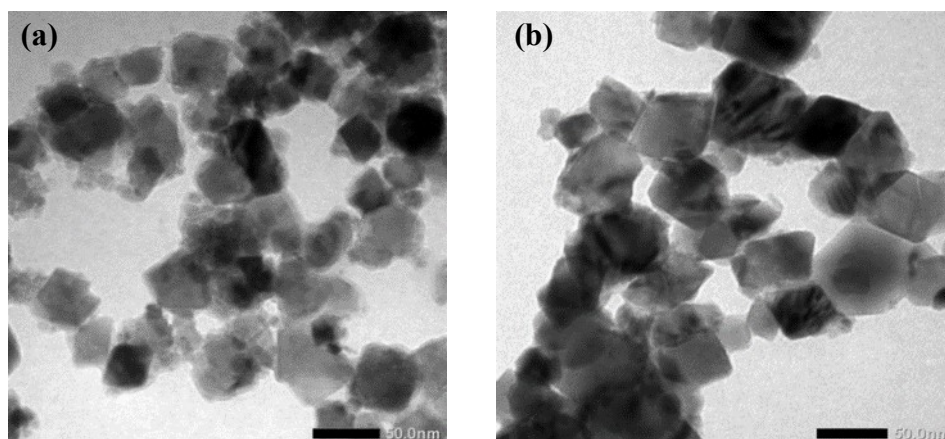
nanopartikel lainnya (*neighbouring grain*) dalam rangka proses koarsening (pertambahan ukuran nanopartikel). Secara termodinamik, gaya penggerak untuk pertumbuhan butir adalah energi yang dilepaskan ketika atom bergerak melintasi batas dari butir dengan permukaan cembung sampai ke butir dengan permukaan cekun. Energi batas butir nanopartikel lebih kecil daripada energi permukaan nanopartikel.

Ketika dua butir nanopartikel yang memiliki arah orientasi kristal berbeda saling kontak, maka akan terjadi proses transport atom antar kedua nanopartikel melalui mekanisme *coalescence*. Kedua butir mengalami rotasi untuk menyerahkan arah orientasi kristal dengan cara mengurangi daerah batas butir sehingga akhirnya permukaan kedua butir saling kontak secara langsung. Atom-atom dari butir yang lebih kecil akan menyatu dalam

matriks butir yang lebih besar, kemudian berdifusi ke dalam butir besar.

Selain itu, perlakuan *annealing* juga berpengaruh terhadap *strain*. Berdasarkan Tabel 1, secara umum nilai *strain* menurun seiring dengan meningkatnya suhu *annealing*. *Strain* berpotensi menyebabkan permukaan kristal menjadi tidak teratur (*surface disorderness*) yang dapat menghambat pertumbuhan kristal sehingga berdampak pada ukuran butir nanopartikel. Berkurangnya *strain* pada kisi kristal menyebabkan pertumbuhan butir menjadi tidak terhambat sehingga menghasilkan butiran nanopartikel yang lebih besar seiring dengan meningkatnya suhu *annealing*.

Pengamatan morfologi dan mikrostruktur sampel nanopartikel dilakukan dengan TEM. Bentuk morfologi butiran nanopartikel $\text{CoZnFe}_2\text{O}_4$ disajikan pada Gambar 2.



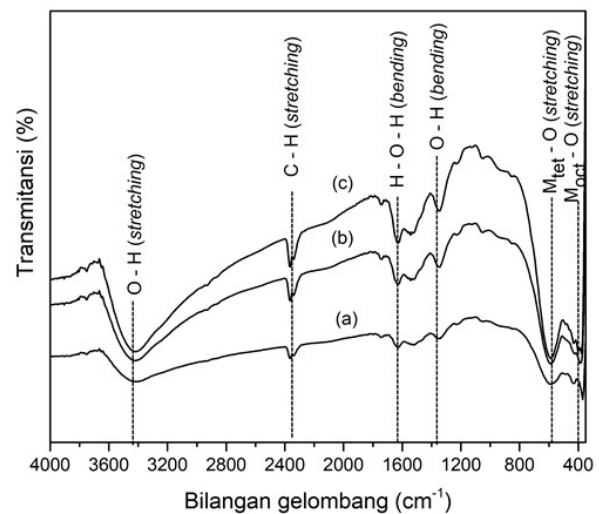
Gambar 2. Hasil TEM $\text{CoZnFe}_2\text{O}_4$ dengan suhu *annealing* (a) 400°C (b) 800°C

Butiran nanopartikel terlihat mengalami aglomerasi dan sebagian membentuk agregat. Berdasarkan hasil karakterisasi TEM, ukuran butir nanopartikel $\text{CoZnFe}_2\text{O}_4$ sebelum di-*annealing* adalah 13,4 nm dan setelah di-*annealing* adalah 39,2 nm. Aglomerasi butir nanopartikel bisa diduga terjadi karena beberapa faktor. Ukuran nanopartikel yang sangat kecil sehingga memiliki luas permukaan spesifik dan tegangan permukaan antar-muka yang besar. Hal ini menyebabkan energi pada permukaan nanopartikel tinggi yang membuat nanopartikel 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. Perlakuan *annealing* menghasilkan nanopartikel dengan ukuran butir yang lebih besar, rendah aglomerasi, densitas lebih tinggi, serta memungkinkan pembentukan butir baru dengan morfologi tertentu.

Berdasarkan Gambar 2, tampak butir-butir nanopartikel $\text{CoZnFe}_2\text{O}_4$ pasca *annealing* yang terbentuk memiliki ukuran butir yang relatif lebih besar daripada sampel yang tidak di-*annealing*. Hal ini dikarenakan selama *annealing* butir-butir nanopartikel mengalami pertumbuhan kristal.

Morfologi butir-butir nanopartikel memiliki bentuk beragam seperti kubus dan segienam. Ragam bentuk tersebut

diduga terjadi akibat perbedaan laju densifikasi yang dialami masing-masing butir selama proses *annealing*. Densifikasi adalah proses pengurangan porositas dalam sampel sehingga membuatnya lebih padat. Gugus fungsi nanopartikel $\text{CoZnFe}_2\text{O}_4$ diidentifikasi dari data spectra FTIR seperti yang disajikan pada Gambar 3.

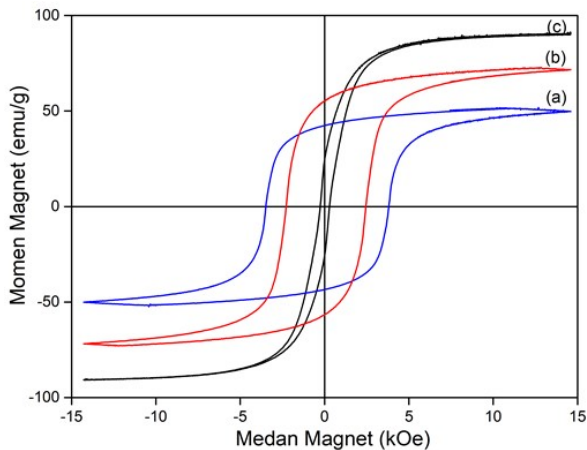


Gambar 3. Spektra FTIR nanopartikel $\text{CoZnFe}_2\text{O}_4$ (a) *non-annealed*; (b) 600 °C; (c) 1000°C

Berdasarkan Gambar 4, teridentifikasi beberapa gugus fungsi dalam sampel nanopartikel $\text{CoZnFe}_2\text{O}_4$. Gugus $\text{M}_{\text{okt}} - \text{O}$ seperti ikatan $\text{Co} - \text{O}$ dan $\text{Fe} - \text{O}$ pada site B terdapat pada bilangan gelombang sekitar 362 - 347 cm^{-1} . Sedangkan gugus $\text{M}_{\text{tet}} - \text{O}$ seperti $\text{Co} - \text{O}$; $\text{Zn} - \text{O}$; dan $\text{Fe} - \text{O}$ pada site A teridentifikasi pada bilangan gelombang 586 - 578 cm^{-1} . Semakin tinggi suhu *annealing*, frekuensi vibrasi gugus tersebut cenderung bergeser ke nilai bilangan gelombang yang lebih besar. Hal ini disebabkan karena perlakuan

annealing menyebabkan perubahan distribusi kation dalam kedua site akibat perubahan panjang ikatan antara kation dengan oksigen.

Karakterisasi sifat kemagnetan dilakukan dengan VSM. Kurva histerisis nanopartikel $\text{CoZnFe}_2\text{O}_4$ disajikan pada Gambar 4.



Gambar 4. Kurva histerisis nanopartikel $\text{CoZnFe}_2\text{O}_4$ (a) non-annealed; (b) 600 °C; (c) 1000°C

Adapun pengaruh suhu *annealing* terhadap koersivitas (H_c) dan magnetisasi saturasi (M_s) disajikan dalam Tabel 2.

Tabel 2. Pengaruh suhu *annealing* terhadap koersivitas (H_c) dan magnetisasi saturasi (M_s)

No	Suhu <i>An-nealing</i> (°C)	H_c (Oe)	M_s (emu/gram)
1	-	122	34,3
2	400	150	51,2
3	600	180	72,5
4	800	210	88,8
5	1000	245	91,4

Berdasarkan Tabel 2, nilai H_c nanopartikel $\text{CoZnFe}_2\text{O}_4$ meningkat dengan meningkatnya suhu *annealing*. Peningkatan suhu *annealing* dapat mengakibatkan proses pertumbuhan butir (*grain growth*) nanopartikel lebih cepat akibat energi termal yang diberikan semakin besar. Energi termal menghasilkan gaya penggerak (*driving force*) yang berperan dalam proses densifikasi dan koarsening. Pengaruh perlakuan *annealing* pada nanopartikel dapat mengakibatkan *spin* pada permukaan nanopartikel memiliki arah acak sehingga akan menghasilkan energi anisotropi permukaan semakin besar. Hal ini berimplikasi pada nilai H_c yang semakin besar.

Sedangkan nilai M_s ditemukan juga meningkat seiring dengan meningkatnya suhu *annealing* yaitu dari 34 emu/gram hingga 91 emu/gram. Peningkatan suhu *annealing* memicu terjadinya pertumbuhan butir baru sebagai hasil dari proses densifikasi dan koarsening. Apabila proses *annealing* berlangsung dengan baik, maka butir baru yang terbentuk akan memiliki ukuran yang lebih besar akibat pengurangan energi pada permukaan butir nanopartikel. Ukuran butir nanopartikel yang lebih besar meningkatkan pergerakan dinding domain nanopartikel sehingga energi dinding domain juga meningkat. Pergerakan dinding domain inilah yang berkontribusi dalam meningkatkan magnetisasi saturasi nanopartikel.

5. Simpulan

Nanopartikel $\text{CoZnFe}_2\text{O}_4$ berhasil disintesis dengan metode kopresipitasi. Peningkatan suhu *annealing* menyebabkan derajat kristalinitas meningkat, ukuran kristalit serta parameter kisi juga meningkat dari 8,18 - 8,25 Å dan 13,4 - 39,2 nm akibat pertumbuhan butir. M_s dan H_c juga meningkat dari 51 - 191 emu/g dan 122 - 245 Oe seiring dengan meningkatnya suhu *annealing*.

6. Referensi

1. Maaz, K., Karim, S. dan Kim, G.H. (2012). Effect Of Particle Size On The Magnetic Properties Of $\text{Ni}_x\text{Co}_{1-x}\text{Fe}_2\text{O}_4$, *Chemical Physics Letters*, 549 : 67-71
2. Gubin, S.P. (2009). *Magnetic Nanoparticles*, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co: KgaA, Weinheim, Jerman.
3. Mohallem, N.D.S., Silva, J.B., Nascimento, G.L.T.N. dan Guimaraes, V.L. (2012). Study of Multifunctional Nanocomposites Formed by Cobalt Ferrite Dispersed in a Silica Matrix Prepared by Sol-Gel Process, *License intench*, 458 - 481.
4. Nasheri, M.G., Saion, B., Hashim, M., Shaari, A.H. dan Ahangar, H.A. (2011). Synthesis and characterization of zinc ferrite nanoparticles by a thermal treatment method, *Solid State Commun.* 151 : 1031-1035.
5. Singhal, S., Namgyal, T., Bansal, S. dan Chandra, K. (2010). Effect of Zn Substitution on the Magnetic Properties of Cobalt Ferrite Nano Particles Prepared Via Sol-Gel Route, *J. Electromagnetic Analysis & Applications*, 2: 376-381.
6. Joshi, S., Kumar, M., Chhoker, S., Srivastava, G., Jewariya, M. dan Singh, V.N. (2014). Structural, magnetic, dielectric and optical properties of nickel ferrite nanoparticles synthesized by co-precipitation method, *J. Mol. Struct.*, 1076 : 55-62.
7. Sundararajan, M., Kennedy, L.J., Aruldoss, U., Pasha, S.K., Vijaya, J.J. dan Dunn, S. (2015). Microwave combustion synthesis of zinc substituted nanocrystalline spinel cobalt ferrite: Structural and magnetic studies, *Materials Science in Semiconductor Processing*, 40: 1-10.
8. Alam, F., Das, H.N. dan Hossain, A.K.M.A. (2012). Effects of Sintering Temperature on the Magnetic Properties of Cr Substituted Mn-Zn Ferrite, *Proceeding of 7th International Conference on Electrical and Computer Engineering*, 443 - 446.
9. Jafari, A., Syayesteh, S.F., Salouti, M. dan Boustani, K. (2015). Effect of annealing temperature on magnetic phase transition in Fe_3O_4 nanoparticles, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 379 : 305-312.

10. El-Sayed, K., Mohamde, M.B., Hamdy, S. dan Ata-Allah, S.S. (2017). Effect of synthesis methods with different annealing temperatures on micro structure, cations distribution and magnetic properties of nano-nickel ferrite, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 423 : 291–300.
11. Dippong, T., Cadar, O., Levei, E.A., Leostean, C. dan Tudoran, L.B. (2012). Effect of annealing on the structure and magnetic properties of $\text{CoFe}_2\text{O}_4:\text{SiO}_2$ nanocomposites, *Ceramics International*, 43 : 9145–9152.
12. Hassadee, A., Jutarosaga, T. dan Onreabroy, W. (2012). Effect of zinc substitution on structural and magnetic properties of cobalt ferrite, *Procedia Engineering*, 32 : 597 – 602.
13. Tatarchuk, T., Bououdina, M., Macyk, W., Shyichuk, O dan Paliychuk, Yaremiy, I., Al-Najar, B. dan Pacia, M. (2017). Structural, optical, and magnetic properties of Zn-Doped CoFe_2O_4 nanoparticles, *Nanoscale Res. Lett.*, 12 : 141 - 145.
14. Kumar, A., Yadav, N., Rana, D.S., Kumar, P., Arora, M. dan Pant, R.P. (2015). Structural and Magnetic Studies of The Nickel Doped CoFe_2O_4 Ferrite Nanoparticles Synthesized by The Chemical Co-Precipitation Method, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 394 : 379-384.