

## KARAKTERISASI STRONSIUM HEKSAFERIT KOERSIVITAS TINGGI HASIL SINTESIS DENGAN METODE KOPRESIPITASI

Ridwan dan Didin S. Winatapura

Pusat Teknologi Bahan Industri Nuklir (PTBIN)-BATAN

Kawasan Puspiptek Serpong 15314, Tangerang

### ABSTRAK

**KARAKTERISASI STRONSIUM HEKSAFERIT KOERSIVITAS TINGGI HASIL SINTESIS DENGAN METODE KOPRESIPITASI.** Stronsium heksaferit ( $\text{SrO} \cdot 6 \text{Fe}_2\text{O}_3$ ) telah berhasil disintesis menggunakan metode kopresipitasi dari larutan  $\text{Sr}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6 \text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9 \text{H}_2\text{O}$  dan Tetramethylammonium Hidroksida (TMAOH). Prekursor yang diperoleh kemudian dikalsinasi pada suhu  $800^\circ\text{C}$  hingga  $1000^\circ\text{C}$  selama 2 jam. Fasa tunggal stronsium heksaferit telah terbentuk pada kalsinasi suhu  $800^\circ\text{C}$  dengan koersivitas magnet 6 kOe dan cenderung menurun dengan peningkatan suhu *annealing*. Saturasi magnet ditentukan dari analisis kurva histeresis magnet menggunakan metode *Jiles-Atherton (JA)*, berkisar dari 66 emu/g hingga 41 emu/g bergantung pada suhu *annealing*. Sifat magnet stronsium heksaferit hasil sintesis jauh lebih baik bila dibandingkan dengan produk komersial dengan koersivitas magnet yang hanya 1,7 kOe.

**Kata kunci:** Magnet,  $\text{SrO} \cdot 6 \text{Fe}_2\text{O}_3$ , Koersivitas magnet, Metode kopresipitasi

### ABSTRACT

**CHARACTERIZATION OF HIGH COERCIVITY STRONTIUM HEXAFERRITE BY COPRECIPITATION.** The Strontium hexaferrite ( $\text{SrO} \cdot 6 \text{Fe}_2\text{O}_3$ ) has been successfully synthesized by coprecipitation method in an aqueous solution of  $\text{Sr}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6 \text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9 \text{H}_2\text{O}$  and Tetramethylammonium Hydroxide (TMAOH). The resulted precursors were then calcinated at temperature of  $800^\circ\text{C}$  to  $1000^\circ\text{C}$  for 2 hours. The results revealed that the single phase of strontium hexaferrite was formed at low annealing temperature of  $800^\circ\text{C}$  for 2 hours with magnetic coercivity of 6 kOe, and tends to decrease with increasing annealing temperature. The saturation magnetization determined from analyzed magnetic hysteresis curve by using *Jiles-Atherton (JA)* method, were obtained from 66 - 41 emu/g depend on the annealing temperatures. The magnetic properties of synthesized strontium hexaferrite obtained in this activities were improved compared to the commercial one which coercivity of 1.7 kOe.

**Keywords:** Magnetic,  $\text{SrO} \cdot 6 \text{Fe}_2\text{O}_3$ , Magnetic coercivity, Coprecipitation method

### PENDAHULUAN

Bahan magnet heksaferit dapat digolongkan dalam 6 (enam) kategori: Tipe M ( $\text{MFe}_{12}\text{O}_{19}$ ), tipe W ( $\text{MMe}_2\text{Fe}_{16}\text{O}_{27}$ ), tipe Y ( $\text{MMe}_2\text{Fe}_{12}\text{O}_{22}$ ), tipe X ( $\text{M}_2\text{Me}_2\text{Fe}_{28}\text{O}_{46}$ ), tipe U ( $\text{M}_4\text{Me}_2\text{Fe}_{36}\text{O}_{60}$ ) dan tipe Z ( $\text{M}_2\text{Me}_2\text{Fe}_{24}\text{O}_{41}$ ) dengan M = Ba, Sr dan Pb sedang Me = Ni, Co, Zn dan Mg [1]. Barium heksaferit ( $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ ) paling banyak digunakan karena mempunyai sifat kimia yang sangat stabil, kekuatan mekanik yang baik dan digolongkan dalam magnet kuat yang ditunjukkan oleh anisotropi, koersivitas dan saturasi magnet yang tinggi sehingga banyak digunakan untuk komponen motor, media penyimpan data dan komponen elektronik lainnya [2-5].

Sifat magnet heksaferit yang dihasilkan dengan cara konvensional melalui metode pencampuran oksida

keramik dengan proses *milling* bahan-bahan  $\text{MCO}_3$  dan  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  membutuhkan suhu kalsinasi yang tinggi, karena mendorong pertumbuhan kristalit sehingga cenderung menurunkan sifat-sifat magnet bahan. Selain itu proses *mechanical milling* terhadap serbuk prekursor ferit dalam rentang waktu yang lama akan terkontaminasi akibat abrasi dari komponen *milling* sehingga juga akan berpengaruh terhadap sifat akhir dari heksaferit yang terbentuk [6]. Oleh sebab itu proses pembentukan prekursor heksaferit menentukan diperoleh bahan heksaferit energi tinggi yang dicirikan oleh remanensi dan koersivitas magnet yang tinggi.

Bahan nanostruktur heksaferit energi tinggi dapat diperoleh apabila dapat dilakukan kontrol terhadap beberapa hal diantaranya: ukuran kristalit dapat

diperkecil hingga dalam skala nanometer yakni melalui penyiapan serbuk prekursor yang homogen dengan ukuran nanometer, sehingga proses interdifusi dalam proses pembentukan fasa heksaferit berjalan dengan cepat pada suhu kalsinasi yang rendah, terbentuk sistem kristalit yang mendorong timbulnya efek magnetokristalin sehingga meningkatkan sifat anisotropi magnet bahan dan mengurangi kemungkinan terjadinya kontaminasi dalam proses pabrikasi, sehingga diperoleh nilai  $B_r$ ,  $H_c$  dan  $(BH)$  yang maksimal [7].

Metode *wet chemical* adalah salah satu cara yang paling mungkin untuk mendapatkan suatu sistem serbuk prekursor bahan heksaferit yang halus, homogen, dengan kontaminasi minimal [8-9]. Untuk menghindari aglomerasi selama proses presipitasi berlangsung akibat efek elektrostatik, maka selain digunakan jenis *surfactant* tertentu yang berfungsi sebagai penstabil sistem larutan juga gelombang ultrasonik untuk memecah aglomerat dan sekaligus mendorong terjadi reaksi kimia yang disebut dengan metode *sonochemistry* [10]. Tujuan dalam penelitian ini adalah memperoleh bahan strontium heksaferit koersivitas dan saturasi magnetik tinggi dengan menggunakan metode *wet chemical*.

Sifat-sifat magnet dari suatu bahan dicirikan oleh dari kurva histeresis magnet yang dapat didekati secara teoritis. Ada beberapa model yang berkaitan dengan karakteristik bahan magnet, misalnya model *Preisach*, model *Stoner-Wohlfarth* dan model *Jiles-Atherton* [11]. Dari metode-metode yang dikembangkan berlandaskan fisika dan matematika tersebut, metode *Jiles-Atherton* adalah yang paling dapat memberikan pendekatan terhadap sifat magnet bahan [12]. Dalam penelitian ini pendekatan perhitungan secara teoritis dilakukan untuk kurva histeresis magnet Stronsium heksaferit ( $SrO \cdot 6 Fe_2O_3$ ) hasil proses sintesis menggunakan metode *Jiles-Atherton*.

## METODE PERCOBAAN

### Sintesis Stronsium Heksaferit

Sintesis prekursor bahan  $SrO \cdot 6 Fe_2O_3$  telah dilakukan dengan cara melarutkan  $Sr(NO_3)_2 \cdot 6 H_2O$  dan  $Fe(NO_3)_3 \cdot 9 H_2O$  dengan kemurnian  $\approx 98,9\%$  produk dari *Merck*, di dalam air suling dengan perbandingan molar antara Sr dan Fe sebesar 1,1 : 11,9. Jumlah Sr sedikit lebih besar bila ditinjau dari sistem stokiometrinya dengan tujuan untuk menjaga jumlah Sr di dalam sistem larutan tetap proporsional setelah proses pencucian. Proses homogenisasi larutan Sr dan Fe nitrat dilakukan menggunakan alat *magnetic stirrer* dengan mengalirkan udara ke dalam larutan selama 3 (tiga) jam. Kemudian ke dalam larutan Sr dan Fe nitrat tersebut, ditambahkan larutan basa Tetramethylammonium hidroksida (TMAOH) 1 M, secara perlahan (10 mL/menit) dengan

tetap dilakukan pengadukan hingga larutan mencapai pH = 12. Proses pengadukan dilanjutkan dengan tetap mengalirkan udara ke dalam larutan selama 3 jam, dan kemudian dibiarkan selama 24 jam sebelum dilakukan pemisahan endapan prekursor dari larutan dengan menggunakan alat *centrifuge*. Prekursor yang diperoleh dari proses presipitasi ini kemudian dicuci menggunakan larutan asam 0,001 %HCl, hingga diperoleh pH prekursor yang mendekati netral. Prekursor yang diperoleh pada tahap ini terlihat berwarna merah bata dan tidak bersifat magnetik.

Prekursor yang dihasilkan dari proses presipitasi tersebut kemudian dikeringkan, dan dibagi dalam beberapa bagian untuk dilakukan perlakuan panas dan sebagian kecil dari prekursor diidentifikasi menggunakan teknik difraksi sinar-X. Perlakuan panas untuk pembentukan fasa  $SrO \cdot 6 Fe_2O_3$  dilakukan pada suhu, 800 °C, 900 °C dan 1000 °C masing-masing selama 2 jam dengan *furnace* dalam suasana atmosfer udara. Identifikasi fasa dilakukan dengan teknik difraksi sinar-X, menggunakan XRD-Philips PW 1710 dengan *Cu-K $\alpha$*  sebagai target pada suhu kamar. Sifat magnetik bahan dalam bentuk serbuk diukur menggunakan *Vibrating Sample Magnetometer (VSM)*, Oxford 1,2 T dengan medan magnet luar maksimum 12 kOe (1,2 *Tesla*), yang terdapat di Pusat Teknologi Bahan Industri Nuklir (PTBIN)-BATAN. Sedangkan morfologi kristalit  $SrO \cdot 6 Fe_2O_3$  diidentifikasi menggunakan *TEM JEOL JEM 1400* yang terdapat di Departemen Kimia, UGM.

### Analisis Kurva Histeresis Magnet dengan Metode *Jiles-Atherton (J-A)*

Pengukuran kurva histeresis dilakukan dengan menggunakan medan magnet luar yang sangat terbatas yakni 10 kOe. Dengan medan magnet yang sangat terbatas tersebut maka kondisi saturasi magnetik sangat sulit untuk dicapai. Oleh sebab itu nilai saturasi magnet  $\sigma_s$  telah ditentukan menggunakan metode *Jiles-Atherton (J-A)* [13]. Dalam model *J-A*, magnetisasi  $\sigma$  dihitung berdasarkan perubahan besar medan magnet luar  $H$ . Magnetisasi total  $\sigma_{tot}$  merupakan penjumlahan magnetisasi reversibel  $\sigma_{rev}$  akibat pergerakan dinding (rotasi) *domain* dan magnetisasi irreversibel,  $\sigma_{irr}$  akibat perpindahan dinding *domain*. Perubahan magnetisasi total berkaitan dengan perubahan medan magnet luar sesuai Persamaan (1) [14] :

$$d\sigma_{tot}/dH = (1-c) [(\sigma_{an} - \sigma_{irr}) / \{ \delta k - \alpha(\sigma_{an} - \sigma_{irr}) \}] + c (d\sigma_{an}/dH) \dots\dots\dots (1)$$

Dimana:

$$\sigma_{an} = \sigma_s \{ \coth(H_e/a) - (a/H_e) \}$$

$$H_e = H + \alpha \sigma_{tot}$$

$\sigma_{an}$  menyatakan magnetisasi *anhysteretic* berupa fungsi *non-linear* terhadap medan magnet efektif,  $H_e$ .

Dengan

$$a = k_B T / \mu_0 m$$

Dimana:

$k_B$  = Konstanta Boltzman

$T(K)$  = Suhu

$m$  = Momen magnet persatuan volume

$\mu_0$  = Permeabilitas pada ruang vakum

Sedangkan konstanta-konstanta lainnya seperti

$c$  = Koefisien reversibilitas

$k$  = Parameter terkait koersivitas

$\delta$  = Parameter yang terkait dengan perubahan arah medan magnetisasi

$\alpha$  = Konstanta yang menyatakan *coupling* antar *domain*

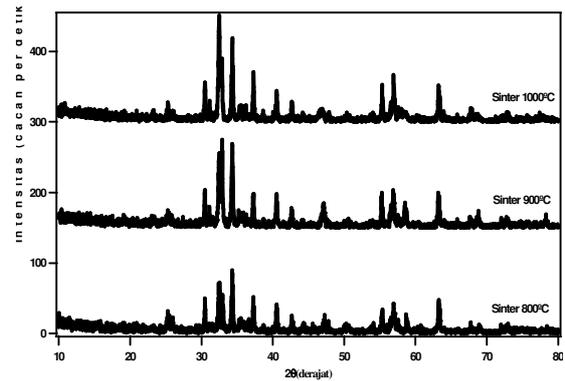
Untuk menyelesaikan Persamaan (1) di atas, sekaligus untuk menentukan parameter-parameter histeresis dan saturasi magnetik telah digunakan perangkat lunak MATLAB [15,16] dengan memanfaatkan fasilitas *genetic algorithm*.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

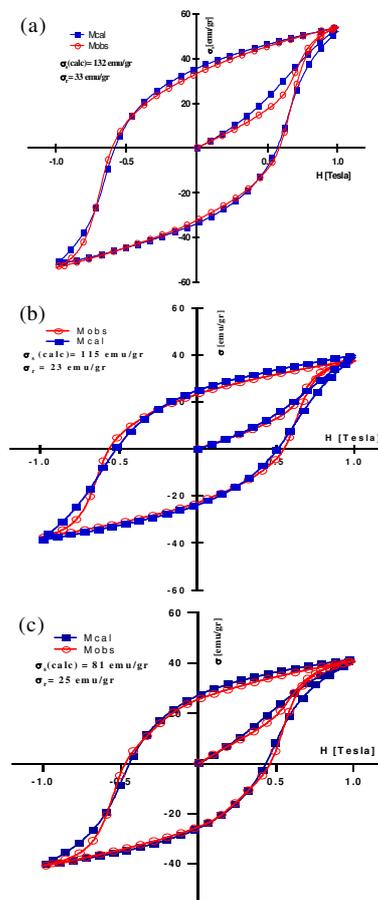
Pada Gambar 1 dapat dilihat pola difraksi sinar-X bahan SrO 6 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> hasil proses pemanasan pada suhu 800 °C, 900 °C dan 1000 °C masing-masing selama 2 jam dari prekursor yang diendapkan dengan menggunakan *Tetramethylammonium Hidroksida (TMAOH)*. Berdasarkan pola difraksi sinar-X, menunjukkan bahwa fasa SrO 6 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> telah terbentuk dengan sempurna. Ukuran kristalit dari prekursor yang sangat halus sangat mungkin mendorong terbentuknya fasa SrO 6 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> berlangsung pada suhu rendah. Ukuran serbuk prekursor yang halus akan membantu proses interdifusi atomik menjadi lebih baik selama proses pemanasan. Proses pembentukan fasa pada suhu rendah dapat membatasi mekanisme pertumbuhan kristalit.

Ukuran kristalit yang cukup halus tersebut akan berpengaruh terhadap mekanisme interaksi magnetik di dalam bahan. Koersivitas magnet bahan yang sangat besar dapat dicapai jika kristalit yang diperoleh berupa *domain* tunggal (*single domain*) karena proses magnetisasi yang terjadi akibat rotasi *spin* dan bukan merupakan pergerakan dinding *domain* [17]. Hal ini dapat terlihat dari sifat magnet bahan hasil pengukuran menggunakan *VSM*, menunjukkan bahan SrO 6 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> hasil sintesis menggunakan *TMAOH* mempunyai nilai koersivitas magnet yang tinggi, diperlihatkan pada Gambar 2 (a), Gambar 2 (b), Gambar 2 (c) dan Tabel 1.

Pada Gambar 2 terlihat pula bahwa semakin tinggi suhu *annealing* maka koersivitas magnet bahan semakin rendah. Hal ini merupakan akibat pengaruh pertumbuhan kristalit sehingga cenderung mengarah pada pembentukan sistem menjadi *multi domain* [18]. Namun demikian berdasarkan hasil perhitungan seperti terlihat pada Tabel 1 perbandingan antara nilai remanensi dan



Gambar 1. Pola difraksi sinar-X dari SrO 6 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> hasil proses presipitasi menggunakan basa TMAOH dan sinter 800 °C, 900 °C dan 1000 °C selama 2 jam dalam bentuk serbuk.



Gambar 2. Kurva histeresis bahan SrO 6 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> hasil pengukuran menggunakan *VSM* pada suhu ruang dengan medan magnet magnet maksimum 1 Tesla, untuk cuplikan setelah proses sinter (a). 800 °C, (b). 900 °C dan (c). 1000 °C selama 2 jam dalam bentuk serbuk. (○) data observasi dan (■) hasil perhitungan.

nilai saturasi magnet ( $\sigma_r/\sigma_s$ ) yang mendekati 0,5 maka dapat dikatakan bahwa bahan magnet SrO 6 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> hasil sintesis masih berada sistem *single domain* [19]. Koersivitas magnet bahan yang tinggi hasil proses *annealing* pada suhu rendah, juga didukung oleh nilai konstanta  $k$  yang tinggi dari hasil perhitungan dan cenderung menurun dengan peningkatan suhu

**Tabel 1.** Karakteristik sifat magnetik SrO 6 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> serta aturasi magnet dan konstanta k dari hasil fitting data observasi menggunakan pendekatan model Jiles-Atherton.

Suhu Annealing (°C)	$\sigma_r$ (emu/g)	H <sub>ci</sub> (kOe)	$\sigma_s$ (emu/g)	$\sigma_r / \sigma_s$	Konstanta Koersiv, k
800	33,5	6,0	66	0,51	5,4 e+05
900	24,8	5,2	57	0,44	4,6e+05
1000	25,5	4,7	41	0,62	4,2e+05

annealing. Konstanta k di definisikan sebagai *pinning site density of domain walls* [13,14,20]

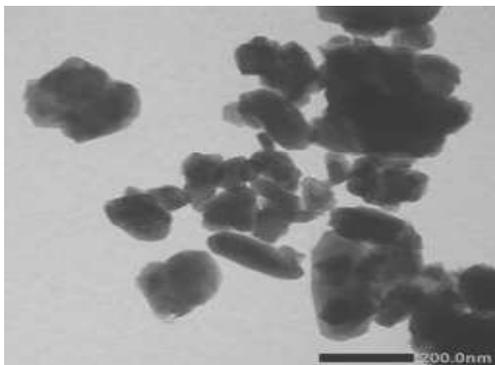
Berdasarkan data hasil pengukuran sifat magnet menggunakan VSM dan perhitungan dengan metode Jiles-Atherton, maka dapat diperkirakan ukuran kristalit bahan SrO 6 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> setelah proses annealing pada suhu 800 °C sangat kecil dan semakin membesar dengan kenaikan suhu annealing. Menggunakan pendekatan diameter kritis ( $D_{krit}$ ) untuk partikel yang berbentuk bola, yakni ukuran diameter partikel di bawah ukuran  $D_{krit}$  akan berupa domain tunggal (*single domain*) sesuai Persamaan (2) :

$$D_{krit} = 9 \chi_s / 2\pi \sigma_s^2 \dots\dots\dots (2)$$

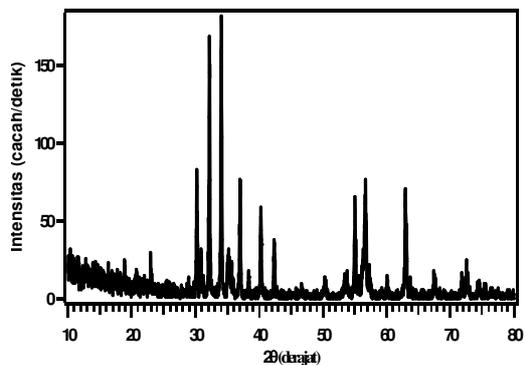
Dimana:

- $k_B$  = Konstanta Boltzman
- $T_c$  = Suhu Curie
- $a$  = Konstanta kisi kristal yang terpendek
- $K_1$  = Magnetocrystalline anisotropy constant

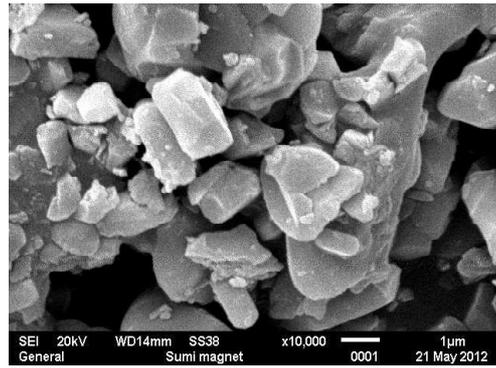
Dimana  $\chi_s$  adalah *Specific wall energy* :



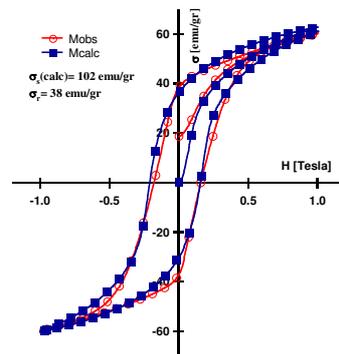
**Gambar 3.** Morfologi partikel SrO 6 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> hasil proses sintesis pada suhu annealing 800 °C menggunakan TEM



**Gambar 4.** Pola difraksi sinar-X dari SrO 6 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> produk komersial dalam bentuk serbuk.



**Gambar 5.** Morfologi partikel SrO 6 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> komersial hasil pengamatan dengan SEM



**Gambar 6.** Kurva histeresis magnet SrO 6 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> komersial hasil pengukuran (○) dan perhitungan menggunakan metode Jiles-Atherton (■)

$$\chi_s = (2 k_B T_c |K_1| / a)^{0.5} \dots\dots\dots (3)$$

Dari Persamaan (2) tersebut maka dapat diperkirakan bahwa  $D_{krit}$  untuk SrO 6 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> akan meningkat dengan kenaikan suhu annealing. Hal ini berdasarkan pada hasil perhitungan saturasi magnetik hasil fitting menggunakan metode Jiles-Atherton dari data observasi, seperti terlihat pada Tabel 1. Selain itu menggunakan data karakteristik magnet SrO 6 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, telah diperkirakan bahwa ukuran domain tunggal bahan SrO 6 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> diperoleh sekitar 300 nm [22]. Dari kurva histeresis magnet SrO 6 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> hasil proses annealing 800 °C menunjukkan bahwa nilai koersivitas magnet intrinsik mencapai 6 kOe mendekati nilai koersivitas magnet tertinggi bahan SrO 6 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> yang pernah dilaporkan, yakni 7,1 kOe [23]. Kurva awal proses magnetisasi juga menunjukkan ciri yang khas untuk bahan terdiri dari domain tunggal [24].

Hal ini didukung dengan hasil pengamatan dengan TEM (Gambar 3) yang menunjukkan bahwa ukuran butiran kristalit SrO 6 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> hasil proses sintesis pada suhu annealing 800 °C di bawah 200 nm, namun jauh lebih besar dari 30 nm yakni batas terkecil ukuran partikel yang menyebabkan bahan SrO 6 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> berubah menjadi superparamagnet [22].

Nilai koersivitas magnet SrO 6 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> hasil proses sintesis dalam percobaan ini sangat tinggi bila dibandingkan dengan nilai koersivitas magnet

dari bahan SrO 6 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> yang diperoleh dari produk komersial. Pola difraksi sinar-X bahan SrO 6 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> komersial dalam bentuk serbuk dapat di lihat pada Gambar 4.

Puncak difraksi yang relatif sangat tajam mencerminkan bahwa bahan mengkristal dengan sangat baik. Lebar puncak difraksi yang relatif sempit menunjukkan bahwa ukuran kristalit bahan relatif besar. Hal ini terlihat dari hasil pengamatan SEM seperti pada Gambar 5.

Pada Gambar 5, dengan jelas terlihat bahwa ukuran partikel SrO 6 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> sangat besar (mikron), jauh lebih besar bila dibandingkan dengan hasil sintesis pada suhu 800 °C. Ukuran butiran kristalit yang besar mengakibatkan koersivitas magnet bahan terukur hanya 1,7 kOe (Gambar 6), jauh lebih rendah bila dibandingkan dengan hasil sintesis dalam penelitian ini yakni  $H_{ci} = 6,0$  kOe. Namun demikian, untuk bahan komersial magnetisasi saturasi hasil perhitungan dan magnetisasi remanensi masih cukup tinggi, sebesar  $\sigma_s = 51$  emu/g dan  $\sigma_r = 38$  emu/g.

Pengamatan lebih jauh terhadap kurva histeresis awal magnetisasi SrO 6 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> hasil sintesis pada suhu 800 °C dan bahan komersial, terlihat adanya perbedaan (Gambar 2(a) dan Gambar 6), hasil proses sintesis dengan suhu *annealing* 800 °C mencirikan bentuk kurva untuk sistem *single domain*, sedangkan kurva awal magnetisasi bahan komersial lebih sesuai ciri bahan berbentuk *multidomain*.

## KESIMPULAN

Bahan magnet SrO 6 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> telah berhasil disintesis dengan metode kopresipitasi. Hasil pengukuran sifat magnetik menggunakan VSM menunjukkan bahan SrO 6 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> hasil *annealing* pada suhu 800 °C mempunyai nilai koersivitas magnet tertinggi sebesar  $H_{ci} = 6,0$  kOe dan saturasi magnetisasi hasil perhitungan dengan metode *Jiles-Atherton* diperoleh  $\sigma_s = 66$  emu/g dan cenderung menurun dengan kenaikan suhu *annealing*. Koersivitas magnet yang sangat tinggi ini sangat mungkin disebabkan ukuran kristalit sangat halus mendekati *domain* tunggal, hal ini didukung oleh bentuk kurva awal magnetisasi yang mencirikan bahan terbentuk oleh kristalit dengan domain tunggal. Koersivitas magnet SrO 6 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> hasil sintesis dalam penelitian ini jauh lebih tinggi dibandingkan bahan komersial dengan  $H_{ci} = 1,7$  kOe. Dengan demikian bahan SrO 6 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> yang diperoleh dari kegiatan ini dapat digolongkan pada bahan magnet heksaferit berenergi tinggi yang sangat berpotensi untuk dapat digunakan sebagai bahan komponen pembangkit energi.

## DAFTAR ACUAN

[1]. C. SUDAKAR et al., *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, **268** (2004) 75-88

[2]. V.N. DHAGE, M.L. MANE, A.P. KECHE, C.T. BIRAJDAR, K.M. JADHAV, *Phys. B: Condens. Matter*, **406** (2011) 789

[3]. A.S. DEHLINGER, M. LE BERRE, B. CANUT, J. P. CHALETON, D. ALBERTINI, S. PERROT, D. GIVORT, J. J. ROUSSEAU, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, **322** (2010) 3293

[4]. U. TOPAL, H.I. BAKAN, *J. Eur. Ceram. Soc.*, **30** (2010) 3167

[5]. H. XU, W. ZHANG, B. PENG, W. ZHANG, *Appl. Surf. Sci.*, **257** (2011) 2689

[6]. S. BLACKBURN, T. P. JOHNSON, C. B. PONTON, M. H. L. WISE, *Trans. Inst. Chem. Eng.*, **73** (Part A) (1995) 71

[7]. G. K THOMPSON and B. J. EVANS, *J. Appl. Phys.*, **67** (9) (1990)

[8]. A. DRMOTA et al., *Journal of Physics: Conference Series*, **200** (2010) 082005

[9]. H. I. HSIANG, R. Q. YAO, *Materials Chemistry and Physics*, **104** (2007) 1-4

[10]. M. SIVAKUMAR et al., *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, **268** (2004) 95-104

[11]. A. IVANYI, *Hysteresis Model in Electromagnetic Computation*, Akademiai Kiado, Budapest (1997)

[12]. ESZTER SAROSPATAKI and MIKLOS KUCZMAN, *Journal of Electrical Engineering*, **57** (8) (2006) 40-43

[13]. D.C. JILES and D. L. ATHERTON, *J. Phys. D. Appl. Phys.*, **17** (1984) 1265

[14]. D.C. JILES and D. L. ATHERTON, *J. Magn.Magn.Mater.*, **61** (1986) 48

[15]. AHMAD YANI, RIDWAN dan MUJAMILAH, *Jurnal Sains Materi Indonesia, Edisi Khusus*, (2006) 85

[16]. PETER R. WILSON, J. NEIL ROSS and ANDREW D. BROWN, *IEEE Trans. Magn.*, **37** (2) (2001) 989

[17]. C. DOROFTEI, E. REZLESCU, P.D. POPA, and N. REZLESCU, *J. Optoelectron. Adv. Mater.*, **8** (3) (2006) 1023

[18]. J. YU, S. TANG, L. ZAI, Y. SHI, Y. DU, *Phys. B: Condens. Matter*, **404** (2009) 4253

[19]. P. SHEPHERD, K.K. MALLICK, R. J. GREEN, *J. Magn. Magn. Mater.*, **311** (2007) 683

[20]. M. MORDJAOUI, B. BOUJEMA, M. CHABANE and R. DAIRA, *International Journal of Electrical, Computer and Systems Engineering*, 1:1 (2007) 50-56

[21]. C. DOROFTEI, E. REZLESCU, P.D. DOPA, N. REZLESCU, *Journal Optoelectronics and Advanced Materials*, **8** (3) (2006)

[22]. J. DING, D. MAURICE, W. F. MIAO, P. G. McCORMIK, R. STREET, *J. Magn. Magn. Mater.*, **150** (1995)

[23]. J. DING, W. F. MIAO, P. G. McCORMIK, R. STREET, *Journal of Alloys and Compounds*, **281** (1998)