

**SINTESIS NANOPARTIKEL MAGNETIK OKSIDA BESI DENGAN  
METODE KOPRESIPITASIDAN PENCIRIANNYA**  
(*Synthesis Iron Oxide Nanoparticles Magnetic by Using  
Coprecipitation Method and Its Characterization*)

Agrin Febrian Pradana<sup>1</sup>, Sri Sugiarti<sup>2</sup>, Mujamilah<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Sekolah Tinggi Analis Kimia Cilegon-Banten

<sup>2</sup> Jurusan Kimia, Fakultas MIPA, Institut Pertanian Bogor, Bogor

<sup>3</sup> Pusat Sains dan Teknologi Bahan Maju, BATAN Serpong, Tangerang Selatan

**ABSTRAK**

Nanopartikel magnetik oksida besi telah berhasil disintesis dengan metode kopresipitasi dan dicirikan. Hasil pola XRD menunjukkan keberadaan pola puncak difraksi dari  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  pada parameter *mixer* dan sonikasi. Nilai magnet saturasi diperoleh dari data hasil VSM yang menunjukkan nilai magnet yang cukup besar, yaitu berada di rentang 70-89 emu/gram. Nilai magnet saturasi terbesar diperoleh pada sampel perlakuan *mixer* M5. Ukuran partikel diukur dalam bentuk sampel supernatan dan berada dalam rentang ukuran nanometer untuk setiap sampel perlakuan *mixer* dan sonikasi.

**Kata kunci:** Oksida besi, nanopartikel magnetik, kopresipitasi, pengadukan, sonikasi

**ABSTRACT**

*The iron oxide magnetic nanoparticles have been successfully synthesized by coprecipitation methods and characterized. The XRD pattern results show the existence of the diffraction peak pattern of  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  on the mixer and sonication parameters. The saturation magnet value is obtained from the VSM result data which shows the magnetic value is large enough, that is in the range of 70-89 emu / gram. The largest magnet saturation value was obtained in M5 mixer treatment sample. The particle size was measured in the supernatant sample form and was in the nanometer size range for each sample of mixer and sonication treatment.*

**Key words:** iron oxide, magnetic nanopartikel, co-precipitation, mixer, sonication

**1. PENDAHULUAN**

Nanopartikel oksida besi telah menjadi fokus penelitian yang mendalam selama dekade terakhir (Yallapu *et al.*, 2011). Nanopartikel oksida besi memiliki sifat magnet yang dapat dimanfaatkan dalam berbagai aplikasi diantaranya aplikasi biomedis (Yuet *et al.*, 2012), *magnetic resonance imaging* (MRI) (Corr *et al.*, 2008), *targeting drug delivery system* (Misra 2008), sensor (Peng *et al.*, 2011), pengolahan limbah air (Chen *et al.*, 2011), dan

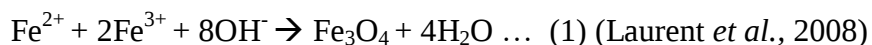
sebagai bahan dasar pembuatan magnet (Ridwan 2003). Kelimpahan oksida besi di alam yang paling banyak berupa mineral *hematite* ( $\alpha$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), *maghemite* ( $\gamma$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), *magnetite* (Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>), dan *wustite* (FeO) (Waychunaset *al.*, 2005). Beberapa tipe oksida besi lainnya dan sifat respon magnetnya ditampilkan pada Tabel 1.

**Tabel. 1 Respons magnet beberapa tipe oksida besi**

| Mineral           | Rumus molekul                                      | Responsmagnet       |
|-------------------|----------------------------------------------------|---------------------|
| Goetit            | $\alpha$ -FeOOH                                    | antiferromagnetik   |
| <i>AkaganÈite</i> | $\beta$ -FeOOH                                     | antiferromagnetik   |
| Lepidokrosit      | $\gamma$ -FeOOH                                    | antiferromagnetik   |
| <i>Feroxyhyte</i> | $\delta'$ -FeOOH                                   | ferrimagnetik       |
| Ferrihidrit       | Fe <sub>5</sub> HO <sub>8</sub> ·4H <sub>2</sub> O | antiferromagnetik   |
| Hematit           | $\alpha$ - Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>          | ferrimagnetik lemah |
| Maghemit          | $\gamma$ - Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>          | ferrimagnetik       |
| Magnetit          | Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>                     | ferrimagnetik       |

Sumber: Harris (2002)

Metode sintesis oksida besi salah satunya dengan menggunakan metode kopresipitasi. Metode kopresipitasi merupakan salah satu metode sintesis yang didasarkan pada pengendapan lebih dari satu substansi secara bersama-sama ketika melewati titik jenuhnya. Teknik kopresipitasi adalah cara yang paling mudah dan efisien secara kimia untuk membuat oksida besi. Melalui metode ini oksida besi (Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>) biasanya disintesis dengan campuran stoikiometri garam besi Fe<sup>2+</sup> dan Fe<sup>3+</sup> dalam medium basa. Persamaan reaksi dari pembentukan oksida besi Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> dapat ditulis sebagai persamaan 1 sebagai berikut ini



Keuntungan utama dalam metode kopresipitasi ini adalah sejumlah besar nanopartikel dapat disintesis. Namun, kontrol distribusi ukuran partikel masih terbatas karena hanya faktor kinetik yang dapat mengontrol pertumbuhan kristal. Menurut Tartaj *et al.*,(2006) dalam proses kopresipitasi ada dua tahap yang terlibat, yaitu terjadi nukleasi saat konsentrasi jenuh kritis tercapai dan pertumbuhan secara lambat dari inti oleh difusi zat

terlarut ke permukaan kristal. Untuk menghasilkan nanopartikel oksida besi yang monodispersi maka dua tahap itu harus dipisahkan, yaitu proses nukleasi dihindari saat tahap pertumbuhan kristal berlangsung (Schwarzer dan Peukert 2004).

Oksida besi dilakukan untuk mendapatkan informasi fasa, distribusi ukuran partikel, dan sifat magnetiknya. Fasa ditentukan dengan menganalisis pola difraksi sinar-X sampel dengan menggunakan XRD. Distribusi ukuran partikel ditentukan dengan menggunakan *particle size analyzer* (PSA). Sifat magnetik dianalisis dari kurva histeresis hasil pengukuran dengan *vibrating sample magnetometer* (VSM).

Praktik lapangan ini bertujuan membuat oksida besi yang berukuran nano dengan metode kopresipitasi dan mencirikan sifat-sifatnya meliputi fasa, ukuran partikel, dan sifat magnetiknya. Praktik lapangan ini dilaksanakan di laboratorium biomedis Pusat Studi Teknologi Bahan Maju (PSTBM)-BATAN Gedung 42 Kawasan Puspiptek, Serpong, Tangerang Selatan. Praktik kerja lapangan ini dilaksanakan selama 2 bulan dengan sistem 5 hari kerja dalam satu minggu dan dimulai dari tanggal 1 Juli sampai 31 Agustus 2012. Waktu praktik lapangan dilaksanakan dari hari Senin hingga Jumat pukul 08.00 sampai 16.00 WIB.

## **2. BAHAN DAN METODE**

### **A. Alat dan Bahan**

Proses sintesis menggunakan alat-alat yang meliputi neraca analitik, *mixer*, *ultrasonic probe* “Sonics”, *centrifuge*, indikator universal, dan batang magnet. Pereaksi dan bahan yang digunakan ialah garam Fe;  $\text{FeCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$  dan  $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  dari katalog Merck, pelarut *DI water*, NaOH dari katalog Merck dan  $\text{AgNO}_3$  1%.

### **B. Prosedur Penelitian**

#### **Preparasi Sistem Sintesis Nanopartikel Magnetik Oksida Besi**

Seluruh sistem peralatan sintesis (*mixer*, ultrasonik, sentrifuse), pelarut *DI water*, dan bahan-bahan yang akan digunakan disiapkan.

#### **Preparasi Larutan Garam $\text{Fe}^{2+}$ dan $\text{Fe}^{3+}$ 1:2 (Modifikasi Wildan *et al.* 2014)**

Larutan garam besi  $\text{Fe}^{2+} : \text{Fe}^{3+} = 1 : 2$  untuk perlakuan *mixer* dibuat dengan melarutkan 8.6189 gram  $\text{FeCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$  dan 23.4499  $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  gram dalam 200 mL *DI water*. Larutan tersebut diaduk sampai terbentuk warna merah bata. Dengan cara yang sama, larutan garam besi  $\text{Fe}^{2+} : \text{Fe}^{3+} = 1 : 2$  untuk perlakuan sonikasi dibuat dengan melarutkan 8.6012 gram  $\text{FeCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$  dan 23.3340  $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  gram dalam 200 mL *DI water*.

### **Preparasi Larutan NaOH**

Larutan NaOH untuk perlakuan *mixer* dan sonikasi masing-masing dibuat dengan melarutkan 13.8624 gram dan 13.8349 padatan NaOH dalam 250 mL *DI water*. Larutan diaduk dengan batang pengaduk hingga semua padatan NaOH larut semua.

### **Pembuatan Nanopartikel Magnetik Oksida Besi**

Campuran larutan garam besi  $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+} 1 : 2$  dimasukkan secara langsung ke dalam NaOH dan segera di *mixer* dengan kecepatan 618 rpm selama 10 menit (perlakuan *mixer*) dan di sonikasi selama 10 menit (perlakuan sonikasi). Selama proses tersebut akan terbentuk suspensi berwarna hitam pekat. Suspensi tersebut diukur pH dan didiamkan semalam untuk menyempurnakan reaksi kopresipitasi. Endapan hitam yang terbentuk dipisahkan dari supernatan dengan menggunakan batang magnet permanen.

Endapan kemudian ditambahkan dengan *DI water* dan diaduk dengan *mixer* pada kecepatan 300 rpm selama 5 menit untuk masing-masing perlakuan. Endapan hitam kembali dipisahkan dari supernatan dengan batang magnet permanen. Bila endapan susah dipisahkan dengan batang magnet permanen, pemisahan dilakukan dengan *centifuge* pada kecepatan 12.000 rpm selama 10 menit. Supernatan diukur pH dan kandungan ion  $\text{Cl}^-$  nya menggunakan  $\text{AgNO}_3 1\%$ . Pencucian endapan diulang hingga tercapai nilai pH sama dengan nilai pH *DI water* serta kandungan ion  $\text{Cl}^-$  nya negatif. Supernatan dari setiap pencucian dimasukkan kedalam *syringe* tertutup dan disimpan di *refrigerator*. Endapan basah terakhir dikeringkan dalam cawan petri pada suhu kamar. Setelah kering endapan tersebut ditimbang dan siap diukur untuk menganalisis sifat bahan.

### **Pencirian Sampel**

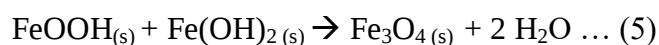
Karakterisasi fasa dilakukan menggunakan alat XRD Shimadzu XD-610 (3 kW; 60kV; 60 mA) dengan tabung X-Ray CuK $\alpha$ , rentang 2 $\theta$  dari 10-80° dengan kecepatan pemayaran sebesar 0,05°/s, penentuan ukuran partikel dilakukan menggunakan *Particle Size Analyzer*, Zetasizer Nano ZS, Malvern dan sifat magnetik diukur menggunakan *Vibrating Sample Magnetometer* OXFORD 1.2H.

## **2. HASIL DAN PEMBAHASAN**

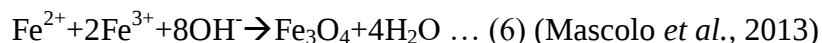
### **Pembentukan Oksida Besi dengan Metode Kopresipitasi**

Oksida besi disintesis dengan metode kopresipitasi mengikuti persamaan 1 dengan rasio Fe<sup>2+</sup>: Fe<sup>3+</sup> adalah 1:2. Menurut Mascolo *et al.*, (2013) rasio tersebut adalah rasio stoikiometri untuk mendapatkan magnetit (Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>) yang menghasilkan kemurnian yang tinggi. Beberapa faktor yang dapat menjadi parameter dalam sintesis oksida besi dengan metode kopresipitasi, yaitu rasio garam besi, medium alkali, pH, dan temperatur (Babes *et al.*,)

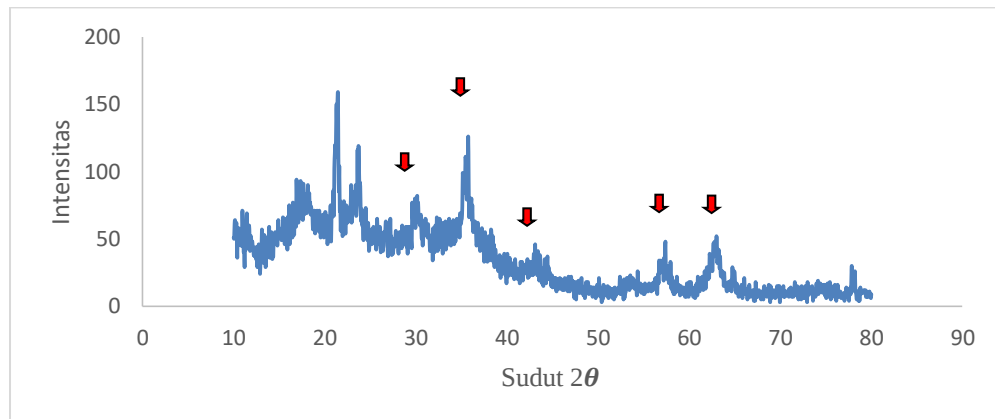
Persamaan reaksi dalam mekanisme pembentukan Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> mengikuti persamaan dibawah ini:



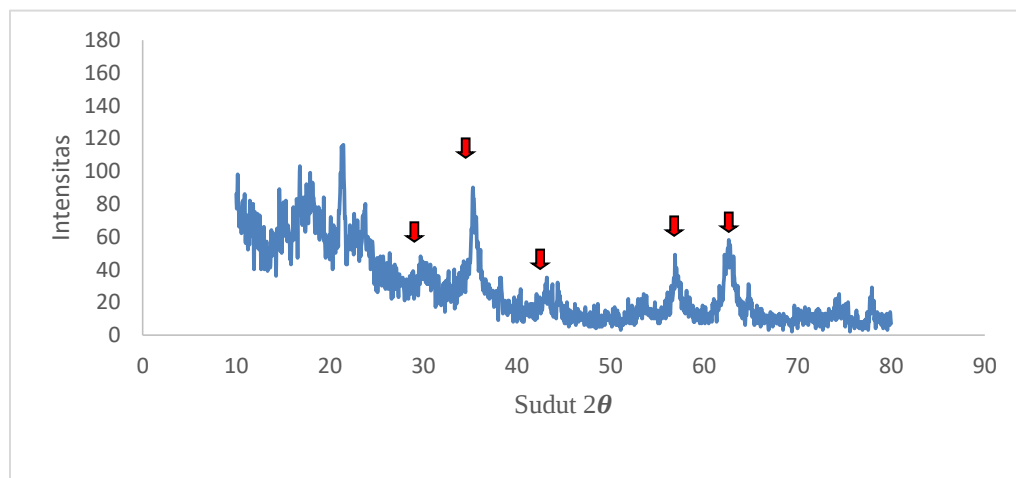
Memberikan persamaan reaksi keseluruhan:



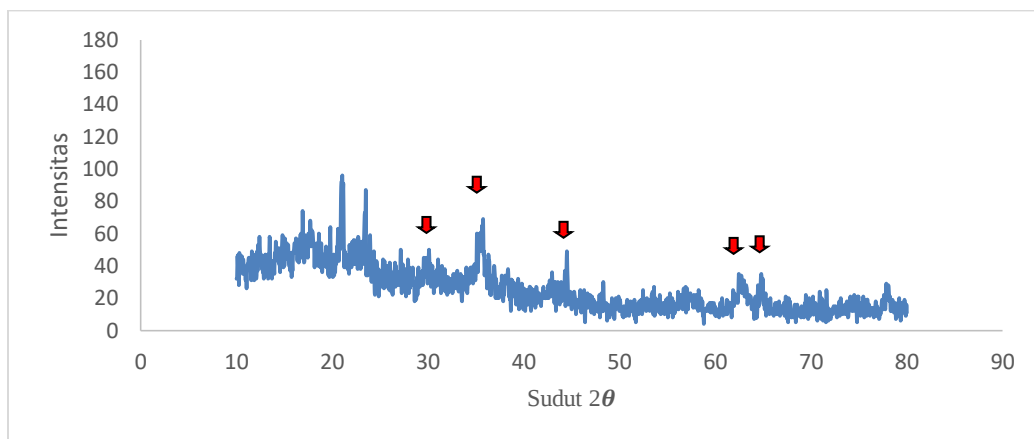
Ion Fe<sup>2+</sup> dan Fe<sup>3+</sup> secara bersama-sama mengendap menjadi besi (II) dan besi (III) hidroksida dengan cepat. Selanjutnya Besi (III) hidroksida terdekomposisi secara perlahan menjadi FeOOH<sub>(s)</sub> yang akan bereaksi dengan Besi (II) hidroksida membentuk endapan hitam nanopartikel magnetik Fe<sub>3</sub>O<sub>4(s)</sub>.



Gambar 2. Pola difraksi sinar-X oksida besi  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  dengan mixer hari ke-0



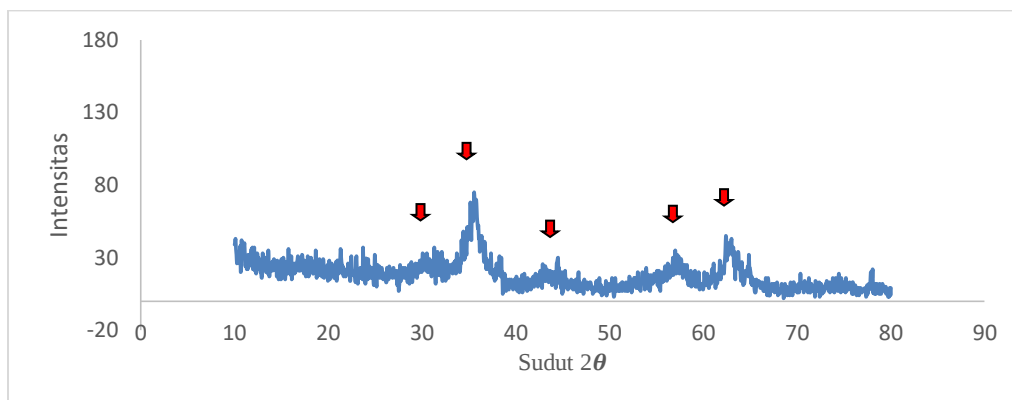
Gambar. 3 Pola difraksi sinar-X oksida besi  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  dengan mixer hari ke-5



Gambar. 4 Pola difraksi sinar-X oksida besi  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  dengan mixer hari ke-13

Berdasarkan hasil kesesuaian pola difraksi tersebut, tiga sampel M0, M5, dan M13 menunjukkan adanya pola puncak-puncak  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  yang berarti pada tiga sampel hasil produk sintesis tersebut telah terbentuk fasa  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ . Namun, pada daerah sudut theta yang kecil (*small angle*), terlihat adanya puncak-puncak difraksi yang tidak dapat diidentifikasi sebagai puncak  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ . Puncak-puncak tersebut kemungkinan adalah puncak-puncak difraksi yang dimiliki oksida besi lainnya, yaitu FeO. Berdasarkan data JCPDS untuk FeO (No. 46-1312) menunjukkan puncak-puncak difraksi dengan intensitas relatif tinggi berada di daerah tersebut, yaitu sudut  $16.503^\circ$ ,  $19.070^\circ$ , dan  $27.083^\circ$ . Hal ini dapat terjadi karena kemungkinan pada perlakuan *mixer* sebelum terbentuk fasa  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ , fasa FeO terbentuk terlebih dahulu.

Berbeda dengan sintesis dengan perlakuan sonikasi, pada pola difraksi sinar-X yang dihasilkan tidak ditemukan pola dengan puncak yang relatif tinggi di daerah *small angle*. Gambar 4 menunjukkan pola difraksi sinar-X dengan sonikasi.



Gambar. 5 Pola difraksi sinar-X oksida besi  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  dengan sonikasi

Pola difraksi sinar-X yang dihasilkan dari sampel SS tersebut memiliki pola yang sama dengan pola difraksi sinar-X  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  yang menandakan produk sintesis dengan sonikasi berhasil membentuk  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  yang diinginkan. Namun, puncak-puncak yang dihasilkan sangat lebar. Beberapa hal dapat membuat puncak pada kurva XRD melebar yaitu, kesalahan pada alat dan bentuk kristalin yang tidak teratur (Ermrich dan Oppen 2011).

#### **Analisis Ukuran Partikel dengan PSA**

Salah satu cara analisis untuk mengetahui ukuran dari suatu partikel adalah dengan menggunakan *particle size analyzer* (PSA). Pada pengukuran ini digunakan sampel supernatan yang berisi nanopartikel magnetik terdispersi dalam medium *DI water* dan membentuk koloid. Supernatan yang diukur diambil dari beberapa tahapan hasil pencucian nanopartikel magnetik.

Lampiran 4 menunjukkan hasil tiga kali ulangan pengukuran ukuran partikel dengan menggunakan PSA. Hasilnya menunjukkan partikel-partikel pada sampel berukuran berada di rentang skala nanometer, yaitu berkisar 0.2-1000 nm (Buzea *et al.* 2007). Beberapa peneliti ada yang membatasi ukuran untuk suatu nanopartikel, yaitu 50 nm (Krishnan 2010) atau 100 nm (Bormet.*al*2006). Hal tersebut didasarkan atas fakta bahwa beberapa sifat fisik nanopartikel dibutuhkan dalam ukuran tersebut untuk kepentingan tertentu. Namun, kisaran yang di klasifikasikan sebagai ukuran nanopartikel secara umum adalah 1 mikron atau 1000 nm (Buzea *et al.* 2007).

Hasil pengukuran pada sampel SM0-10 Gambar 6 (Lampiran 4) menunjukkan hasil yang berbeda dari sampel yang lainnya yang hanya berkisar antara 35-45 nm (Tabel 2). SM0-10 terukur rata-rata ukuran partikelnya sebesar 1157 nm dan menghasilkan *polydispersity index* (PdI) yang sangat besar, yaitu 0.789 . Nilai PdI yang besarnya lebih dari 0.7 menunjukkan bahwa sampel memiliki distribusi ukuran yang sangat luas dan tidak cocok diukur menggunakan teknik *dynamic light scattering*(DLS) pada PSA (Malvern 2011). Kemungkinan sampel SM0-10 saat diukur pada PSA membentuk agregat dalam koloid yang menyebabkan ukurannya bertambah besar, sehingga terbaca pada PSA sebesar 1157 nm. Hal ini dibuktikan dengan hasil Z-Average pada sampel SM0-10 sebesar 3643.0. Nilai yang cukup besar dari sampel nanopartikel magnetik yang lainnya (Tabel 2). Nilai Z-Average adalah parameter yang paling stabil untuk pengukuran dengan teknik DLS pada bentuk koloid. Pengukuran Z-Average sangat sensitif dengan perubahan kecil di dalam sampel sampai bisa mendeteksi kehadiran agregat di sampel (Malvern 2011)

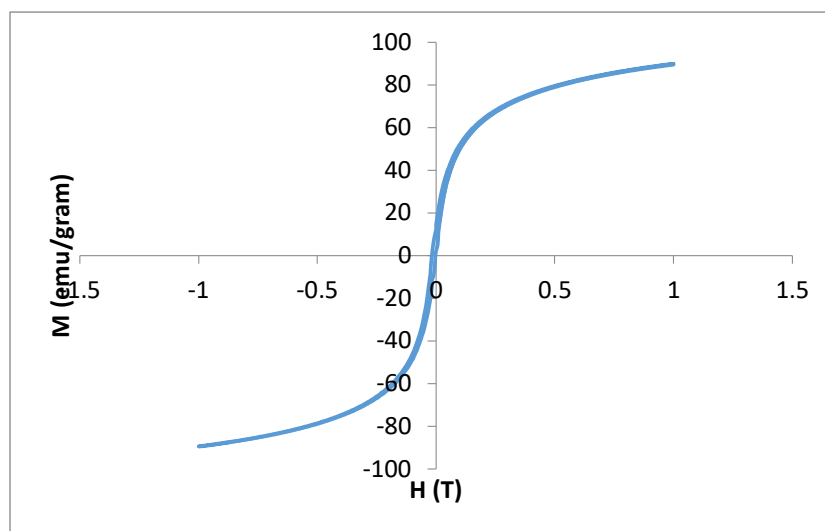
Tabel. 2 Karakteristik beberapa sampel supernatan nanopartikel magnetik

| Sampel | Z-Average | Ukuran (d.nm) | Polydispersity Index |
|--------|-----------|---------------|----------------------|
| SM0-8  | 227.0     | 37.10         | 0.277                |
| SM0-10 | 3643.0    | 1157.00       | 0.789                |
| SM5-2  | 125.8     | 40.38         | 0.363                |
| SM5-8  | 520.9     | 33.02         | 0.512                |
| SS-6   | 79.4      | 37.83         | 0.261                |
| SS-12  | 126.4     | 45.82         | 0.287                |

### **Analisis Sifat Magnet dengan VSM**

Sifat magnet dari nanopartikel oksida besi dianalisis dengan menggunakan alat *vibrating sample magnetometer* (VSM). Sampel yang diukur berupa supernatan dan padatan nanopartikel magnetik oksida besi dari sintesis dengan menggunakan *mixer* dan

sonikasi. Gambar 11-14 (Lampiran 5) menunjukkan kurva histeresis hubungan antara nilai magnet saturasi ( $M_s$ ) per gram dengan medan magnet ( $H$ ) untuk sampel perlakuan *mixer* dan Gambar 15 (Lampiran 5) untuk perlakuan sonikasi.



Gambar. 6 Sifat magnetik padatan nanopartikel magnetik pada sampel M5

Berdasarkan kurva histeresis yang dihasilkan seperti pada Gambar 6, oksida besi menunjukkan sifat magnet yang bersifat superparamagnetik. Sifat tersebut membuat oksida besi akan bersifat magnet jika diberi medan magnet, namun akan kembali normal jika medan magnet dihilangkan (Hervault dan Nguyen 2014).

Tabel. 3 Sifat magnet saturasi beberapa sampel padatan nanopartikel magnetik

| Sampel | $M_s$ (emu/gram) |
|--------|------------------|
| M0     | 70.4             |
| M5     | 89.4             |
| M13    | 70.8             |
| M42    | 74.6             |
| SS     | 56.4             |

Pengaruh waktu pada perlakuan *mixer* tidak berpengaruh besar terhadap nilai magnet saturasi sampel padatan nanopartikel oksida besi. Tabel 3 menunjukkan nilai magnet saturasi (Ms) per gram sampel. Dapat dilihat nilai Ms untuk sampel *mixer*, yaitu M0, M5, M13, dan M42 secara umum tidak berbeda jauh. Namun, pada sampel M5 menunjukkan nilai magnet saturasi yang paling besar dari semua sampel yang dianalisis dengan VSM, yaitu sebesar 89,4 emu/gram. Harga Ms maksimal untuk  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  adalah 92 emu/gram (Harris 2002). Berbeda dengan perlakuan sonikasi nilai Ms yang diperoleh sangat kecil diantara semua sampel, yaitu sebesar 56.4 emu/gram. Hal ini berkorelasi dengan hasil pola XRD sampel SS (Gambar 5) yang menunjukkan ketidakteraturan kristalin, sehingga menyebabkan nilai magnet yang rendah.

Perlakuan sonikasi memungkinkan partikel padatan oksida besi yang terbentuk lebih kecil dibanding dengan perlakuan *mixer*. Hal itu dapat menyebabkan nilai magnet saturasinya berbeda, yang semakin kecilnya partikel maka semakin kecil juga nilai magnet saturasinya.

#### **4. KESIMPULAN**

Nanopartikel magnetik oksida besi telah berhasil disintesis dengan metode kopresipitasi dan dicirikan. Hasil pola XRD menunjukkan keberadaan pola puncak difraksi dari  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  pada parameter *mixer* dan sonikasi. Nilai magnet saturasi diperoleh dari data hasil VSM yang menunjukkan nilai magnet yang cukup besar, yaitu berada di rentang 70-89 emu/gram. Nilai magnet saturasi terbesar diperoleh pada sampel perlakuan *mixer* M5. Ukuran partikel diukur dalam bentuk sampel supernatan dan berada dalam rentang ukuran nanometer untuk setiap sampel perlakuan *mixer* dan sonikasi.

#### **5. SARAN**

Perlu ada penelitian lebih lanjut untuk mengoptimalkan sintesis nanopartikel magnetik oksida besi. Perlakuan sebaiknya dilakukan dengan kondisi inert atau dengan bantuan aliran gas  $\text{N}_2$  pada setiap perlakuan. Pengulangan pengerjaan juga perlu dilakukan

agar memperoleh akurasi dan ketepatan nilai yang baik. Penggunaan basa yang sesuai diperlukan guna mencapai kondisi yang optimum terhadap nilai magnet saturasi. Pengukuran ukuran partikel sebaiknya juga diukur sampel padatannya sehingga dapat membandingkan ukuran partikel dalam fasa padatan maupun dalam fasa supernatan koloid.

### **DAFTAR PUSTAKA**

- Abareshi M. 2010. Fabrication, characterization, and measurement of thermal conductivity of  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  nanofluids. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 322:3895-3901.
- Borm P J A, Robbins D, Haubold S, Kuhlbusch T, Fissan H, Donaldson K, Schins R P F, Stone V, Kreyling W, Lademann J, Krutmann J, Warheit D, Oberdorster E. 2006. The potential risks of nanomaterials: a review carried out for ECETOC (review). *Particle and Fibre Toxicol*. 3(11)
- Buzea C, Blandino IIP, Robbie K. 2007. Nanomaterials and nanoparticles: sources and toxicity. *Biointerphases*. 2(4)
- Chen C, Gunawan P, Xu R. 2011. Self-assembled  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ -layered double hydroxide colloidal nanohybrids with excellent performance for treatment of organic dyes in water. *Journal of Materials Chemistry*. 21(4): 1218–1225.
- Corr SA, Byrne SJ, Tekoriute R, Meledandri CJ, Brougham DF, Lynch M, Kerskens C, O'Dwyer L, Gun'ko YK. 2008. Linear assemblies of magnetic nanoparticles as MRI contrast agents. *Journal of the American Chemical Society*. 130:4214–4215.
- Ermrich M, Oppen D. 2013. *XRD for the Analyst Getting Acquainted with the Principle*. Almelo (NL): PANalytical
- Harris LA. 2002. Polymer stabilized magnetite nanoparticle and poly(propylene oxide) modified styrene-dimethacrylate network [disertasi]. Blacksburg, Virginia (US): Polytechnic Institute and State University
- Hervault A, Nguyen TKT. 2014. Magnetic nanoparticle-based therapeutic agents for thermo-chemotherapy treatment of cancer. *Nanoscale*. 6:11553-11573. doi: 10.1039/c4nr03482a
- Krishnan KM. 2010. Biomedical nanomagnetism: A spin through possibilities in imaging, diagnostics, and therapy. *IEEE Transactions on Magnetics*. 46(7):2523-2558. doi: [10.1109/TMAG.2010.2046907](https://doi.org/10.1109/TMAG.2010.2046907)

- Laurent, S.; Forge, D.; Port, M.; Roch, A.; Robic, C.; Vander Elst, L.; Muller, R.N. 2008. Magnetic iron oxide nanoparticles: Synthesis, stabilization, vectorization, physicochemical characterizations, and biological applications. *Chemical Review*.108:2064–2110.
- Mascolo MC, Pei Y, Ring TA. 2013. Room temperature co-precipitation synthesis of magnetite nanoparticles in large pH window with different bases. *Materials*.6:5549-5567. doi: 10.3390/ma6125549
- Misra RDK. 2008. Magnetic nanoparticles carrier for targeted drug delivery:perspective, outlook and design. *Material Science Technology*. 24:1011–1019.
- Peng XH, Wang YJ, Tang XL, Liu WS. 2011. Functionalized magnetic coreshell  $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2$  nanoparticles as selectivity-enhanced chemosensor for Hg(II). *Dyes and Pigment*. 91:26-32.
- Ridwan, Sulungbudi GT, Mujamilah. 2009. Sintesis bahan magnet barium hexaferrite memanfaatkan sumber daya alam lokal. *Jurnal Sains Materi Indonesia*. 5(1):29-33
- Schwarzer HC, Peukert W, 2004. Tailoring particle size through nanoparticle precipitation. *Chemical Engineering Communications*. 191:580–608.
- Tartaj P, Morales MP, Veintemillas-Verdaguer S, GonzalezCT, SernaCJ. 2003. The preparation of magnetic nanoparticles for applications in biomedicine. *Journal of PhysicsD: Applied Physics*. 36:182-197
- Tartaj P, Morales MP, Veintemillas-Verdaguer S, GonzalezCT, SernaCJ. 2006. Synthesis, properties, and biomedical applications of magnetic nanoparticles. *Handbook of Magnetic Materials*. 16:403-482
- Waychunas GA, Kim CS, Banfield JF. 2005. Nanoparticulate iron oxide minerals in soils and sediments: unique properties and contaminant scavenging mechanism. *Journal of Nanoparticle Research*. 7: 409-433
- Wildan ZL, Salam R, Pramano EY. 2014. Pembuatan nanopartikel oksida Fe dengan metode kopresipitasi. *Laporan Teknis PSTBM BATAN*
- Yallapu MM, Othman SF, Curtis ET, Gupta BK, Jaggi M, Chauhan SC. 2011. Multifunctional magnetic nanoparticles for magnetic resonance imaging and cancer therapy. *Biomaterials*. 32:1890–1905.
- Yu MK, Park J, Jon S. 2012. Targeting strategies for multifunctional nanoparticles in cancer imaging. *Theranostics*. 2(1):3-44. doi: 10.7150/thno.3463