

IDENTIFIKASI FASA DAN SIFAT MAGNETIK NANOPARTIKEL BESI OKSIDA TERIRADIASI

(IDENTIFICATION OF PHASE AND MAGNETIC PROPERTIES OF IRRADIATED IRON OXIDE NANOPARTICLES)

Saeful Yusuf, Yosef Sarwanto, dan Wildan Z.L.

Pusat Sains dan Teknologi Bahan Maju, Badan Tenaga Nuklir Nasional
Kawasan Puspiptek, Serpong, Tangerang Selatan 15340

E-mail: saeful@batan.go.id

Received : 28 Maret 2014; revised : 11 April 2014; accepted : 14 April 2014

ABSTRAK

Makalah ini membahas tentang perubahan fasa nanopartikel magnetik oksida besi setelah mengalami iradiasi dalam reaktor nuklir. Perubahan fasa dianalisis dalam kaitannya dengan perubahan sifat magnetik yang terjadi. Nanopartikel yang digunakan merupakan hasil proses ko-presipitasi baik dalam bentuk oksida besi murni (OB) maupun yang permukaannya telah dimodifikasi dengan asam nitrat, asam sitrat maupun asam oleat dan membentuk sistem *ferrofluid* (FF). Nanopartikel awal ini telah dianalisis memiliki fasa gabungan magnetit/maghemit ($\text{Fe}_3\text{O}_4/\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$). Proses iradiasi dilakukan di Reaktor Serba Guna GAS-BATAN pada fasilitas sistem rabbit dengan fluks neutron sekitar $\pm 1 \times 10^{13} \text{ ncm}^{-2} \text{ detik}^{-1}$, selama 5 menit, 10 menit dan 30 menit. Nanopartikel besi oksida hasil iradiasi dikarakterisasi dengan Difraktometer Sinar-X untuk mendapatkan data tentang perubahan fasa dari nanopartikel. Sifat magnetik dianalisis dari kurva histeresis hasil pengukuran dengan *Vibrating Sample Magnetometer*. Secara umum hasil analisis menunjukkan bahwa iradiasi mengakibatkan terjadinya perubahan sebagian fasa besi oksida dari fasa magnetit/maghemit menjadi fasa hematit dengan hasil akhir penurunan sifat magnetik nanopartikel. Nano partikel besi oksida yang dilapisi penstabil asam nitrat atau asam sitrat memiliki ketahanan iradiasi yang lebih baik dibandingkan besi oksida yang dilapisi asam oleat.

Kata kunci : Nanopartikel magnetik, Besi oksida, Iradiasi, Fasa, Sifat magnetik

ABSTRACT

This paper discusses the phase change of magnetic iron oxide nanoparticles after irradiated in a nuclear reactor . Phase changes were analyzed in relation with the changes of magnetic properties. Nanoparticles used is the result of co-precipitation process in the form of pure iron oxide (OB) and after surface modification with nitric acid, citric acid and oleic acid which forming a system of ferrofluid (FF). The initial nanoparticles have been analyzed to have a combined phase of magnetite / maghemite ($\text{Fe}_3\text{O}_4/\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$). Irradiation process carried out in the Rabbit system Facility of RSG - GAS BATAN at thermal neutron flux $\pm 1 \times 10^{13} \text{ n.cm}^{-2} \text{.s}^{-1}$ for 5 minutes, 10 minutes and 30 minutes. Irradiated nanoparticles were then characterized by X-ray Diffractometer to obtain data on phase changes of nanoparticles. The magnetic properties were analyzed from the hysteresis curve measurement results with Vibrating Sample Magnetometer. In general, the analysis shows that irradiation resulted in a change part of iron oxide phase from magnetite / maghemite into haematite phase with the end result showed as a decrease in the magnetic properties of nanoparticles. Ionically nanoparticle surface modification were analyzed is able to control these changes.

Keywords : Magnetic nanoparticle, Iron oxide, Irradiation, Phase, Magnetic properties

PENDAHULUAN

Nanopartikel magnetik menjadi fokus berbagai penelitian karena bahan ini memiliki potensi aplikasi yang luas mencakup bidang katalis (Schätz *et al.* 2010), biomedis (Scarberry 2008, Frey *et al.* 2009), penyimpan data (Lee

2011), serta remediasi lingkungan (Koehler 2009, Hu *et al.* 2011). Dalam proses aplikasi ini kemampuan bahan yang dapat dimanipulasi secara magnetik dieksplorasi dan dikombinasikan dengan ukuran partikel dalam

skala nano memberikan potensi miniaturisasi, peningkatan efisiensi dan efektifitas serta sensitivitas metoda yang dikembangkan. Mengacu pada potensi ini, salah satu prospek aplikasi nanopartikel magnetik yang banyak dikembangkan dalam bidang biomedis adalah sebagai agen dalam metoda separasi unit biologi (virus, bakteri, sel, dan lain-lain) secara magnetik.

Dalam proses diagnostik *in-vitro* ini, nanopartikel magnetik yang bertindak sebagai agen separasi magnetik akan dikombinasikan dengan bahan organik (enzim antigen, protein maupun target *DNA*) sehingga dapat dikenali dan berinteraksi dengan unit biologi penyebab masalah kesehatan, memisahkan/menseparasi unit biologi yang dimaksud dan selanjutnya unit biologi tersebut yang telah berinteraksi/tergabung dengan sistem nanopartikel magnetik akan dapat diidentifikasi. Untuk mengidentifikasi hasil separasi ini beberapa metoda berbasis sensor fenomena magnetik dikembangkan (Zhu *et al.* 2014 dan Zhang *et al.* 2013), fluoresen (Rodrigues *et al.* 2014) dan *quantum dot* berbasis CdTe (Nabiyyi *et al.* 2014). Tantangan untuk terus meningkatkan sensitivitas yang berarti memberikan potensi diagnosis lebih dini permasalahan kesehatan, membuat penelitian dan pengembangan metoda diagnosis *in-vitro* ini tetap penting untuk dilakukan.

Salah satu prospek metoda yang dapat dikembangkan adalah metoda *assay* berbasis radioaktifitas atau dengan metoda RIA (*Radioimmunoassay*). Metoda ini telah lama dikenal dapat memberikan sensitivitas deteksi yang sangat tinggi. Namun demikian, sulitnya penyiapan, proses aplikasi dan penanganan limbah dari bahan ini menjadi kendala bagi pengguna umum. Penggabungan metoda ini dengan proses separasi magnetik yang memberikan metoda *MARIA* (*Magnetic Radioimmunoassay*), memberikan salah satu solusi untuk kemudahan proses aplikasi. Hingga saat ini metoda ini dikembangkan masih berbasis bahan magnetik berukuran mikro dan penandaan dilakukan dengan menambahkan *tracer* radioaktif pada bahan organik yang terkonjugasi pada partikel magnetik (Ning *et al.* 2007 dan Sallam *et al.* 2011).

Salah satu arah pengembangan metoda *MARIA* yang dilakukan adalah mengembangkan agen separasi magnetik berbasis nanopartikel yang telah diiradiasi. Besi oksida merupakan bahan yang bersifat magnet dan dapat dibuat dalam ukuran nano. Sedangkan unsur Fe dengan isotop ^{58}Fe memiliki penampang lintang reaksi penangkapan neutron termal (n,γ) sekitar 1,31 barn sehingga mampu membentuk inti

radioaktif ^{59}Fe bila ditembak dengan neutron termal (IAEA 1990). Proses iradiasi neutron pada nanopartikel magnetik berbasis besi oksida akan membentuk bahan bersifat radioaktif yang memancarkan sinar gama. Waktu paruh ^{59}Fe selama 44,5 hari sangat mencukupi untuk proses separasi. Selanjutnya sinar gama yang dipancarkan bahan radioaktif ^{59}Fe dapat dideteksi dengan detektor/ *probe* sinar gamma. Dengan pengembangan ini diharapkan dapat diperoleh agen separasi magnetik dengan kemampuan separasi yang lebih akurat karena ukurannya yang kecil sekaligus agen identifikasi dengan sensitivitas yang tinggi.

Penelitian ini merupakan langkah awal dalam pembuatan agen separasi unit biologi (virus, bakteri, sel, dan lain-lain) metode *MARIA*. Nanopartikel magnetik besi oksida dibuat, kemudian diiradiasi dengan neutron termal pada berbagai kondisi antara lain kering dan basah dengan penstabil yang bervariasi di fasilitas *system rabbit* Reaktor G.A. Siwabessy. Nano partikel besi oksida hasil iradiasi diamati fasanya menggunakan *X-ray Diffractometer (XRD)*. Selanjutnya pengaruh iradiasi neutron terhadap perubahan sifat magnetik yang terjadi diamati dengan alat *Vibrating Sample Magnetometer (VSM)*. Dengan memahami radioaktifitas bahan yang terbentuk, perubahan fasa, perubahan sifat pada permukaan bahan dan perubahan sifat magnet yang merupakan parameter kunci dalam menilai kemampuan nanopartikel magnetik sebagai agen separasi maka akan memberikan masukan untuk langkah berikutnya dalam pembuatan agen separasi unit biologi metode *MARIA*.

BAHAN DAN METODE

Bahan

Bahan yang digunakan antara lain $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (sigma aldrich), $\text{FeCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ (sigma aldrich), NH_4OH (Merck), HNO_3 (Merck), asam oleat (sigma aldrich), dan asam sitrat (sigma aldrich)

Metode

1. Penyiapan Nanopartikel Magnetik Besi Oksida

Nanopartikel besi oksida dibuat dengan metoda mengacu pada penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh Mujamilah (2011). Bahan prekursor berupa larutan garam klorida Fe(II) dan Fe(III) dengan perbandingan mol 1:2 ditambahkan larutan NH_4OH hingga pH = 10. Presipitat dicuci, disentrifugasi, diredispersi dalam air. Setelah larutan cuci bebas klorida, diperoleh presipitat berupa besi oksida (OB)

berukuran nanometer. Modifikasi permukaan besi oksida dilakukan dengan mendispersikan nanopartikel dalam beberapa tipe bahan penstabil sehingga terbentuk koloid nanopartikel besi oksida yang stabil *ferrofluid* (FF). Penstabil yang digunakan meliputi asam nitrat, asam sitrat dan asam oleat yang masing-masing akan membentuk *ferrofluid* dengan kode sampel masing-masing FF-N, FF-S dan FF-O.

2. Iradiasi Nanopartikel Magnetik

Iradiasi dilakukan dalam keadaan sampel *ferrofluid* masih lembab yang diperoleh dari pengeringan sampel koloid. Bahan-bahan ini dimasukkan ke dalam *vial polyethylene* yang telah dibersihkan dari kontaminan menggunakan asam nitrat dan air bebas mineral. Sampel diiradiasi pada fasilitas *system rabbit* di Reaktor GA Siwabessy PRSG-BATAN yang memiliki fluks neutron thermal sekitar $\pm 1 \times 10^{13} \text{ n cm}^{-2} \text{ detik}^{-1}$ dengan waktu iradiasi yang bervariasi yaitu 5 menit, 15 menit dan 30 menit.

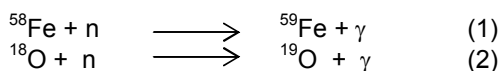
3. Karakterisasi Nanopartikel Magnetik

Sampel nanopartikel magnetik yang telah diperoleh dikarakterisasi fasanya dengan XRD *Phillip PW1710* sedangkan sifat magnetik dianalisis dengan VSM *OXFORD 1.2T*. Kedua kegiatan karakterisasi tersebut dilakukan di Pusat Sains Teknologi Bahan Maju-BATAN dan dikerjakan setelah radioaktivitas bahan meluruh hingga batas aman.

HASIL DAN PEMBAHASAN

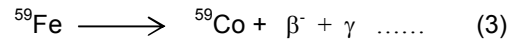
Nanopartikel Besi oksida

Ketika nanopartikel besi oksida yang telah disintesis dengan proses ko-presipitasi diiradiasi dengan neutron termal, maka akan terjadi reaksi (n, γ) sebagai berikut :



Dari kedua reaksi di atas terlihat bahwa terbentuk inti ${}^{59}\text{Fe}$ dan ${}^{19}\text{O}$ yang bersifat radioaktif, yang mana radioaktivitasnya akan berbanding langsung dengan jumlah inti ${}^{58}\text{Fe}$ dan ${}^{18}\text{O}$ yang diiradiasi, fluks neutron thermal, penampang lintang reaksi penangkapan neutron (σ_{th} dan RI) dan lama iradiasi (t_{ir}). Selanjutnya inti-inti ${}^{59}\text{Fe}$ dan ${}^{19}\text{O}$ akan meluruh membentuk

inti stabil dengan memancarkan sinar- β dan sinar- γ seperti ditunjukkan pada persamaan (3) dan (4). Sinar- γ yang dipancarkan tersebutlah yang akan dideteksi dengan probe sinar- γ .

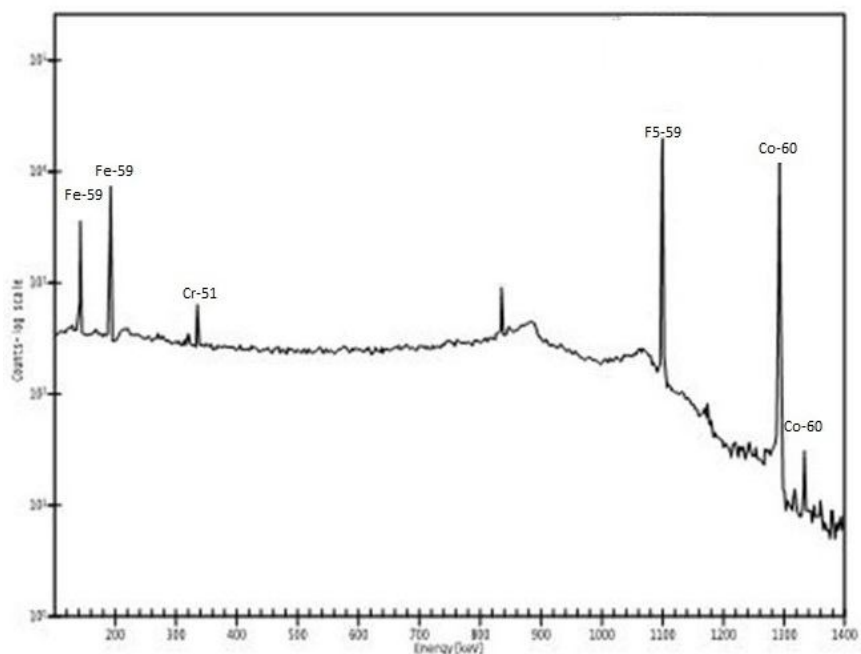


Keberadaan inti radioaktif ${}^{19}\text{O}$ sangat singkat sekali dengan $t_{1/2}$ hanya 26,91 detik, selain itu penampang lintang termal (σ_{th}) dan integralnya (RI) juga sangat kecil yaitu masing-masing 0,00016 dan 0,00081 barn sehingga radioaktivitasnya akan segera hilang ketika bahan besi oksida dikeluarkan dari reaktor. Demikian juga dengan unsur H dan C relatif tidak teraktivasi oleh neutron termal. Sedangkan inti radioaktif ${}^{59}\text{Fe}$ memiliki $t_{1/2}$ yang relatif lebih lama yaitu 44,5 hari di samping memiliki penampang lintang termal (σ_{th}) dan integral (RI) yang relatif besar seperti yang ditunjukkan pada Tabel 1.

Profil spektrum sinar- γ dan data aktifitas nano partikel besi oksida hasil iradiasi ditunjukkan pada Gambar 1 dan Tabel 2. Dari spektrum sinar- γ , isotop ${}^{59}\text{Fe}$ teridentifikasi pada energi 142, 65 keV, 192,35 keV, 1099,25 keV dan 1291,60 keV. Pada spektrum tersebut teridentifikasi pula isotop ${}^{51}\text{Cr}$ (unsur Cr) pada energi 320,08 keV dan ${}^{60}\text{Co}$ (unsur Co) pada energi 1173,24 keV dan 1332,50 keV sebagai impuritis Fe_3O_4 yang digunakan pada penelitian ini dan merupakan unsur-unsur golongan transisi. Pada Tabel 2 ditunjukkan data aktifitas besi oksida hasil iradiasi. Aktifitas besi oksida ini dihitung berdasarkan aktifitas ${}^{59}\text{Fe}$ saja. Iradiasi dilakukan dalam keadaan sampel kering (OBK) dan dalam keadaan masih lembab (OBB) dengan variasi waktu iradiasi. Walaupun isotop ${}^{59}\text{Fe}$ memiliki $t_{1/2}$ yang relatif panjang, namun iradiasi selama 5 menit telah mampu mengaktifkan unsur Fe di dalam sampel. Dari Tabel 2 terlihat bahwa baik untuk cuplikan kering maupun basah, aktifitas cuplikan hasil iradiasi bertambah besar dengan bertambahnya waktu iradiasi, aktifitas_{ir-30} > aktifitas_{ir-15} > aktifitas_{ir-5}. Cuplikan kering memiliki radioaktivitas yang lebih besar dibanding cuplikan basah, sebagai contoh perbandingan adalah aktifitas_{OBK30} > aktifitas_{OBB30}.

Tabel 1 : Data nuklir dari isotop ^{18}O dan ^{58}Fe (IAEA TECDOC 1990)

No	Isotop target	Kelimpahan isotop	σ_{th} (barn)	RI (barn)	Isotop yg terbentuk	$t_{1/2}$	E (keV)	Kelimpahan (%)
1	^{18}O	0,0020	0,00016	0,00081	^{19}O	26,91 (detik)	197,14	95,90
							1356,84	50,40
2	^{58}Fe	0,0028	1,31	1,28	^{59}Fe	44,5 (hari)	142,65	1,02
							192,35	3,08
							1099,25	56,50
							1291,60	43,20



Gambar 1. Spektrum sinar- γ dari besi oksida

Tabel 2. Kondisi iradiasi dan hasil pengukuran itas bahan besi oksida dalam keadaan kering (OBK) dan dalam keadaan lembab (OBB)

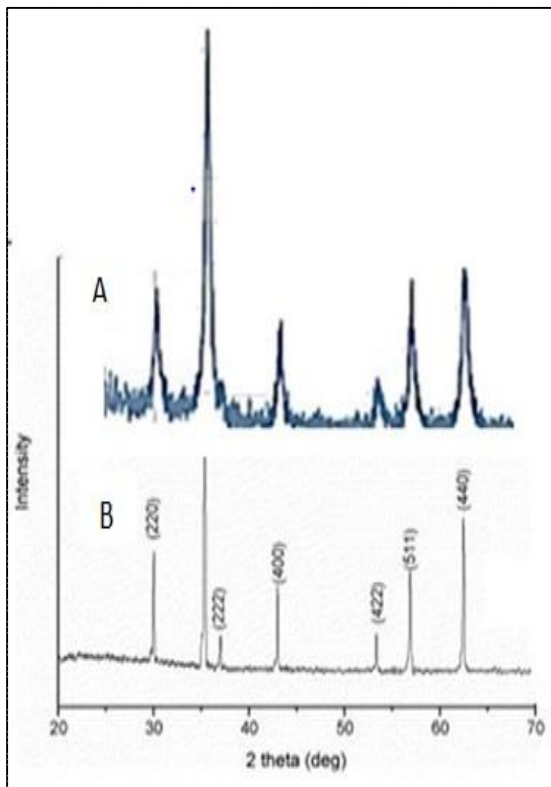
No	Kode	Berat (mg)	t_{ir} (menit)	Aktifitas (cps)	Error (cps)
1	OBK5	99.735	5	41	1,8
2	OBK15	102.518	15	99	2,1
3	OBK30	108.627	30	236	3,3
4	OBB5	88.516	5	1.87	0,07
5	OBB15	135.542	15	21	0,4
6	OBB30	106.964	30	137	1,9

Hal ini mudah dipahami karena pada cuplikan kering jumlah inti Fe yang diiradiasi lebih banyak dibanding cuplikan basah yang mengandung banyak molekul H₂O. Dari pengamatan secara visual terhadap vial yang digunakan sebagai wadah sampel pada saat iradiasi menunjukkan bahwa iradiasi selama 30 menit dalam keadaan basah (lembab) tidak menimbulkan kerusakan pada vial tersebut.

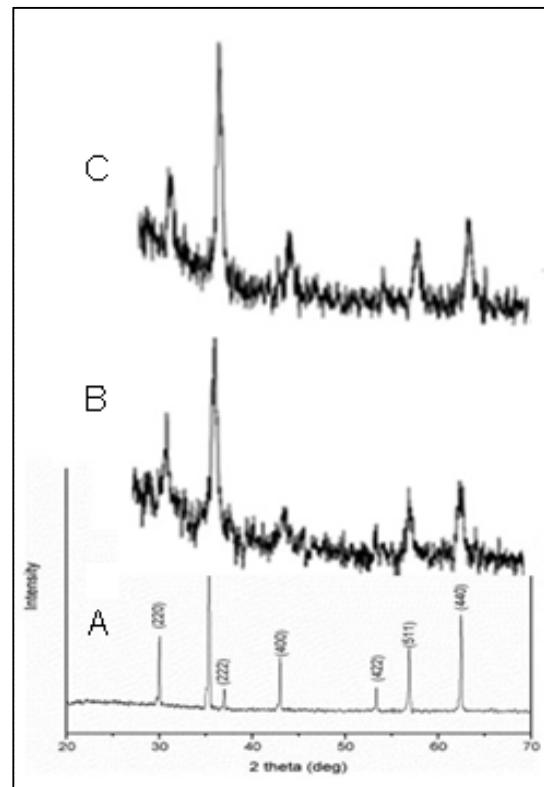
Pola difraksi sinar-X nanopartikel besi oksida yang disintesis dengan proses ko-presipitasi baik sebelum iradiasi (B) yang dibandingkan dengan Fe₃O₄/γ-Fe₂O₃ acuan (A) ditampilkan pada Gambar-2. Analisis pada pola tersebut menunjukkan hadirnya puncak-puncak yang teridentifikasi sebagai fasa Fe₃O₄/γ-Fe₂O₃ (magnetit). Pada difraktogram terlihat adanya penurunan derajat kristalinitas bahan disertai meningkatnya intensitas latar (*background*).

Pada Gambar 3 ditunjukkan pola Difraksi Sinar-X nanopartikel besi oksida

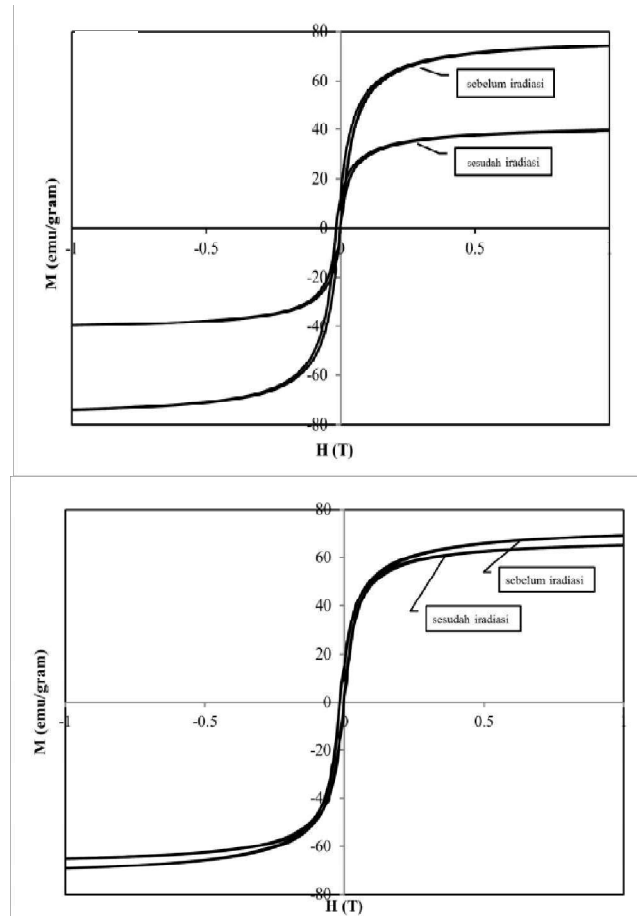
sesudah iradiasi selama 30 menit untuk sampel OBK (gambar-B), sampel OBB (gambar-C) dibandingkan terhadap Fe₃O₄/γ-Fe₂O₃ (magnetit) acuan (gambar-A). Pada pola difraksi sampel hasil iradiasi muncul puncak kontaminan yang teridentifikasi sebagai fasa Fe₃O₄/α-Fe₂O₃ (hematit) akibat oksidasi lanjut dalam proses iradiasi, disamping terjadinya penurunan derajat kristalinitas. Hal ini mengakibatkan penurunan sifat magnetik seperti yang terukur pada kurva histeresis magnetik untuk besi oksida yang ditampilkan pada Gambar 4. Pada sampel OBK, terjadi penurunan sifat magnetik yang cukup besar akibat proses radiasi dibandingkan sampel OBB. Hal ini menunjukkan adanya proteksi oksidasi lanjut partikel besi oksida oleh ikatan FeO-OH pada permukaan sampel dan terjaganya kenaikan temperatur bahan OBB akibat *gamma heating* selama proses radiasi, dimana hal tersebut tidak terjadi pada OBK.



Gambar 2. Pola difraksi sinar-X nanopartikel besi oksida yang disintesis dengan proses ko-presipitasi sebelum diiradiasi dibandingkan Fe₃O₄/γ-Fe₂O₃ acuan



Gambar 3. Pola Difraksi Sinar-X nanopartikel besi oksida sesudah iradiasi selama 30 menit untuk sampel kering (B), sampel basah (C) dibandingkan terhadap Fe₃O₄/γ-Fe₂O₃ acuan (A).



Gambar 4. Kurva histeresis nanopartikel sebelum dan sesudah iradiasi selama 30 menit. Iradiasi dilakukan pada sampel OBK (a) dan sampel OBB (b)

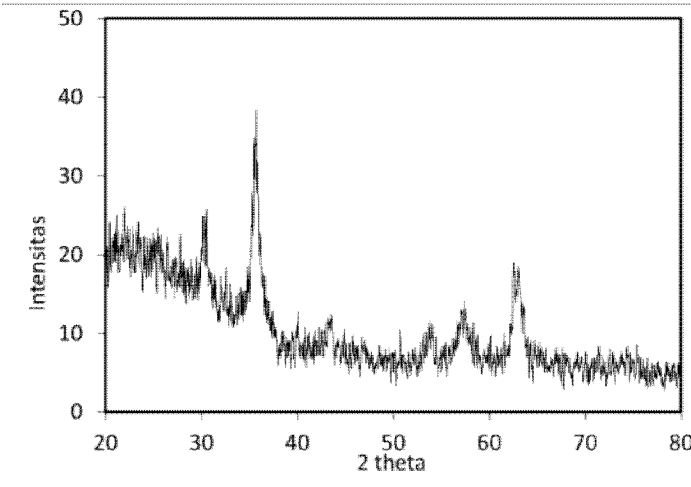
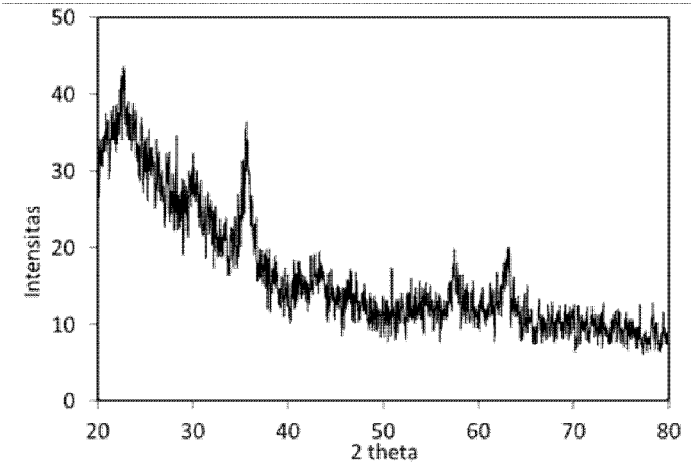
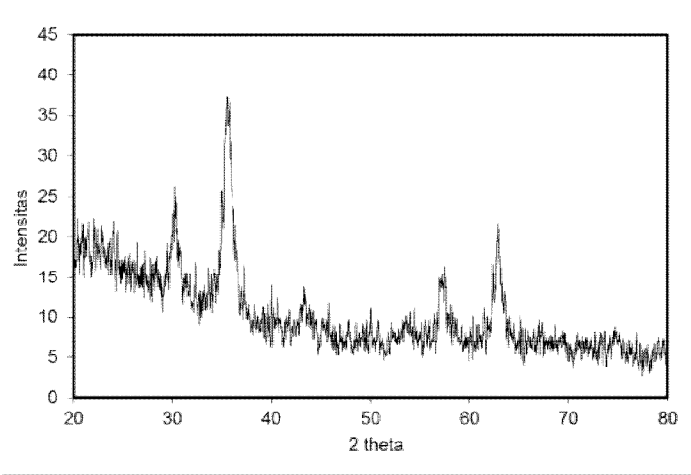
Koloid Nanopartikel Besi Oksida (*Ferrofluid*)

Dari bahan besi oksida ini dapat dilanjutkan proses pembuatan *ferrofluid* dengan menambahkan bahan penstabil atau polimer yang dapat memodifikasi bahan baik secara kovalen maupun ionik yang memberikan permukaan non-polar maupun polar (Mujamilah 2011). Secara umum ada dua tipe *ferrofluid* yaitu berbasis air dan berbasis minyak. Untuk *ferrofluid* berbasis air, nanopartikel akan terdispersi secara stabil dalam larutan berbasis air. Untuk *ferrofluid* berbasis minyak, nanopartikel akan terdispersi secara stabil dalam larutan berbasis minyak. Dalam kegiatan ini diteliti 3 bahan *ferrofluid* yaitu 2 bahan *ferrofluid* berbasis air dengan modifier asam nitrat (*FF-N*) dan asam sitrat (*FF-S*), serta 1 bahan *ferrofluid* berbasis minyak dengan modifier asam oleat (*FF-O*).

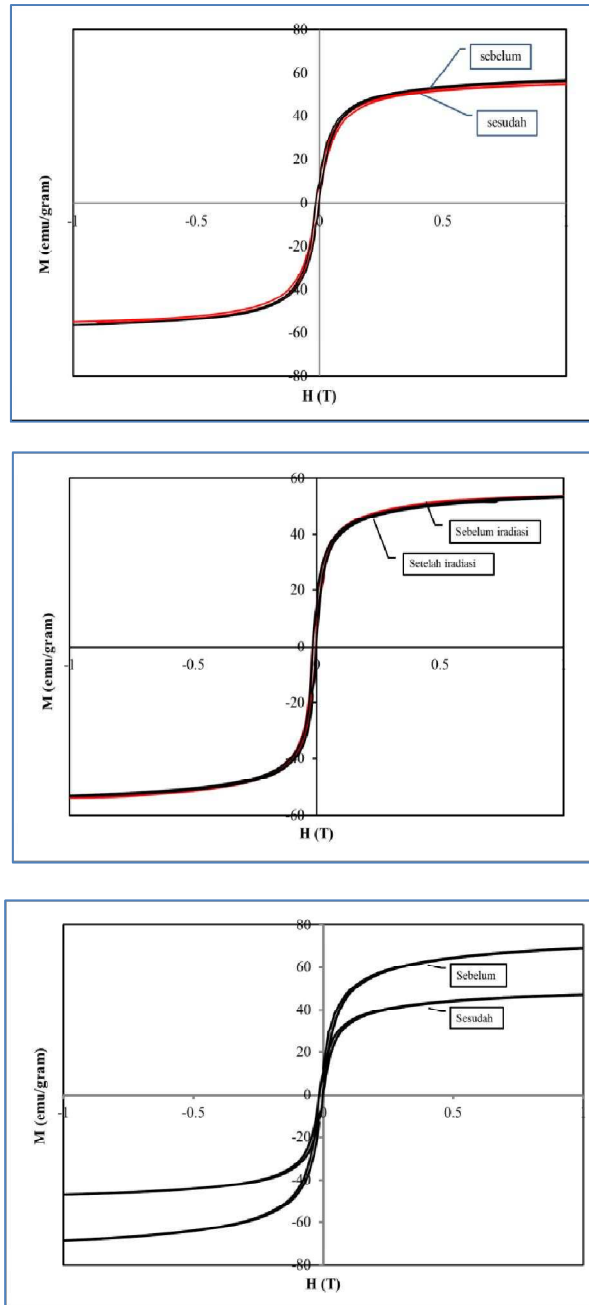
Hasil karakterisasi *XRD* dan *VSM* untuk sampel *FF-N*, *FF-S* dan *FF-O* hasil iradiasi selama 30 menit ditampilkan pada Gambar 5-6. Identifikasi fasa pada pola difraksi sinar-X

kembali menunjukkan hadirnya kontaminan α - Fe_2O_3 selain fasa utama $\text{Fe}_3\text{O}_4/\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ pada *FF-O* (Gambar-5c) yang terkonfirmasi oleh data penurunan nilai magnetisasi saturasi dari 68,7 emu/gram menjadi 47 emu/gram setelah iradiasi selama 30 menit (Gambar-6c). Fasa pada *ferrofluid* berbasis air (asam nitrat dan asam sitrat) cenderung tetap (Gambar 5a dan 5b) yang terkonfirmasi oleh data pengukuran sifat magnetik (Gambar 6a dan 6b).

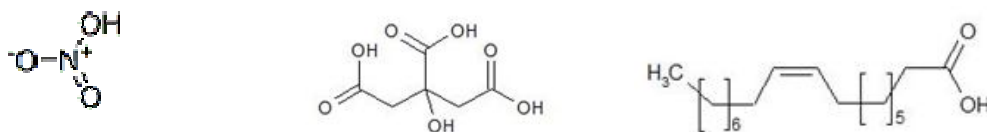
Mengacu pada tipe bahan penstabil atau modifier, data-data hasil pengukuran dan analisis di atas menunjukkan kemampuan ikatan ionik asam nitrat dan asam sitrat pada permukaan partikel besi oksida lebih mampu melindungi terjadinya proses oksidasi yang mengubah $\text{Fe}_3\text{O}_4/\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ (magnetit) menjadi fasa $\text{Fe}_3\text{O}_4/\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ (hematit) akibat proses iradiasi neutron, dibanding ikatan gugus asam oleat pada permukaan partikel. Struktur molekul ketiga bahan tersebut ditampilkan pada Gambar 7 (*The Merck Chemical Database* 2014).



Gambar 5. Pola difraksi sinar-X nanopartikel magnetik setelah iradiasi 30 menit : (a). *Ferrofuid-nitrat* FF-N; (b). *Ferrofuid-sitrat* FF-S ; (c). *Ferrofuid-oleat* FF-O



Gambar 6. Kurva histeresis magnetik nanopartikel setelah iradiasi 30 menit : (a). *Ferrofuid-nitrat FF-N* ; (b). *Ferrofuid-sitrat FF-S* ; (c). *Ferrofuid-oleat FF-O*



Gambar 7. Struktur molekul asam nitrat, asam sitrat dan asam oleat

Dari gambaran struktur pada Gambar 7 dapat dipahami bahwa ikatan besi oksida pada asam nitrat dan asam sitrat yang berantai pendek akan lebih kuat dibanding ikatan asam oleat yang merupakan rantai panjang dan non polar. Kestabilan ikatan dan sifat permukaan ini juga terkonfirmasi dengan adanya kemampuan pada bahan *ferrofluid* berbasis air untuk kembali terdispersi dalam pelarutnya pasca iradiasi tanpa mengalami penggumpalan. Kemampuan ini sangat penting agar *ferrofluid* dapat diproses lebih lanjut untuk pembentukan nanopartikel magnetik bertanda. Dari hasil analisis ini dapat disampaikan bahwa *ferrofluid* terutama dari tipe dengan ikatan ionik yang kuat dapat diiradiasi dengan baik tanpa menimbulkan perubahan sifat permukaan dan sifat magnetik yang berarti. Kestabilan sifat permukaan ini juga menjadikan *ferrofluid* bertanda ini menjadi lebih mudah untuk diproses lebih lanjut dengan pelapisan bahan organik menjadi nanopartikel magnetik bertanda.

KESIMPULAN

Proses iradiasi neutron terhadap besi oksida menghasilkan isotop radioaktif ^{59}Fe yang memancarkan sinar- γ yang dapat digunakan dalam identifikasi proses separasi metode MARIA. Nano partikel besi oksida yang dilapisi penstabil/pelarut, memiliki ketahanan radiasi neutron relatif lebih baik dibandingkan tanpa pelapis. Pada besi oksida tanpa pelapis terjadi perubahan fasa magnetit menjadi fasa hematit disertai penurunan yang signifikan dari sifat magnet. Besi oksida yang dilapisi penstabil asam nitrat atau asam sitrat memiliki ketahanan iradiasi yang lebih baik dibandingkan besi oksida yang dilapisi asam oleat. Nanopartikel besi oksida hasil iradiasi yang mengandung pelarut air dan asam nitrat atau asam sitrat memiliki kestabilan sifat permukaan sehingga relatif mudah didispersikan kembali pasca iradiasi dibanding pelarut asam oleat.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penelitian ini terselenggara dengan dukungan dana dari program insentif PKPP2011 dengan kontrak No. 08/SEK/IPKPP/PPK/III/2011. Untuk itu penulis menyampaikan terima kasih kepada pihak Kemenristek RI sebagai pemberi dana, manajemen BATAN untuk dukungan fasilitas khususnya manajemen PSTBM-BATAN dan PRSG-BATAN, Dra. Mujamilah M.Sc. sebagai Penanggung Jawab Kegiatan Penelitian serta rekan-rekan lain yang terlibat dalam kegiatan penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Hu, X, Juan Yang, Jingdong Zhang. 2011. Magnetic loading of $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2/\text{Fe}_3\text{O}_4$ nanoparticles on electrode surface for photoelectrocatalytic degradation of diclofenac. *Journal of Hazardous Materials*. 196: 220– 227
- IAEA. 1990. *IAEA-TECDOC-564: Practical Aspects Of Operating Neutron Activation Analysis Laboratory*, Vienna, International Atomic Energy Agency
- Koehler, F.M. 2009. Magnetic EDTA: Coupling heavy metal chelators to metal nanomagnets for rapid removal of cadmium, lead and copper from contaminated water. *Chem Commun*. 32 (32): 4862–4864
- Lee, J. 2011. Electrical memory features of ferromagnetic CoFeAlSi nano-particles embedded in metal-oxide-semiconductor matrix. *Thin Solid Films*. 19 (18):6160-6163
- Mujamilah. 2011. *Laporan Teknis Program Insentif PKPP TA 2011*, Jakarta, Kemenristek
- Nabiyyi,A,I,. 2014. Luminol/CsTe quantum dots/sodium periodate system in conjunction with response-surface methodology for chemiluminometric determination of some tetracyclines. *J. of Luminescence*. 151, 57-65
- Ning,W,D,. 2007. Magnetic Microparticle Radioimmunoassay for the Determination of Estriol in Human Serum, *Chinese Journal of Analytical Chemistry*. 35(9),1241-1245
- Rodrigues, S, S, M,. 2014. Fluorescence enhancement of CdTe MPA-capped quantum dots by glutathione for hydrogen peroxide determination. *Talanta*. 122:157-165
- Sallam, Kh. M., R. R. Sheha, A. A. El-Zahhar. 2011. Development of solid phase radioimmunoassay system using new polymeric magnetic micro-spheres”, *J. of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*. 290(2):339-345
- Scarberry, K.E. 2008. Magnetic Nanoparticle-Peptide Conjugates for in Vitro and in Vivo Targeting and Extraction of Cancer Cells. *J.American Chemical Society*, 130 (31):10258–10262
- Schätz, Alexander, O. Reiser, W.J. Stark. 2010. Nanoparticles as Semi-Heterogeneous Catalyst Supports. *Chem Eur J*. 16 (30): 8950–8967

- Zhu, L., Yuhua Cao, Guangqun Cao. 2014. Electrochemical sensor based on magnetic molecularly imprinted nanoparticles at surfactant modified magnetic electrode for determination of bisphenol A. *Biosensors and Bioelectronics*. 54: 258-261
- Zhang, Z,. 2013. A sensitive and selective molecularly imprinted sensor combined with magnetic molecularly imprinted solid phase extraction for determination of dibutyl phthalate. *Biosensors and Bioelectronics*. 49,367-373.