

PENGENDALIAN SUHU ULTRASONIKASI PADA PELAPISAN NANOPARTIKEL MAGNET (Fe_3O_4) DENGAN KITOSAN

Grace Tj. Sulungbudi, Wildan Z.L., Rohmad Salam dan Mujamilah

Pusat Sains dan Teknologi Bahan Maju (PSTBM)
Badan Tenaga Nuklir Nasional (BATAN)
Kawasan Puspiptek, Serpong, Tangerang Selatan, 15314

E-mail : grace@batan.go.id

Received: 8 Mei 2017; revised: 16 Mei 2017; accepted: 27 September 2017

ABSTRAK

PENGENDALIAN SUHU ULTRASONIKASI PADA PELAPISAN NANOPARTIKEL MAGNET (Fe_3O_4) DENGAN KITOSAN. Telah dilakukan pelapisan nanopartikel magnetik Fe_3O_4 dengan proses ultrasonikasi terkendali. Pengendalian ultrasonikasi dilakukan dengan menambahkan fasilitas pendingin baik menggunakan air maupun es serta dengan pengaturan suhu pembatas pada fasilitas ultrasonikasi untuk memastikan suhu sampel maksimal $50\text{ }^\circ\text{C}$ selama proses pelapisan kitosan. Nanopartikel hasil pelapisan dianalisis sifat magnetik dan distribusi ukuran partikelnya masing-masing menggunakan VSM (*Vibrating Sample Magnetometer*) serta PSA (*Particle Size Analyzer*). Hasil sintesis menunjukkan bahwa penambahan sistem pendingin cukup efektif dalam mengendalikan suhu dan menurunkan waktu total proses pelapisan serta ukuran nanopartikel terlapis kitosan. Namun pola perubahan ukuran yang terjadi tidak mengikuti sepenuhnya kaidah standar karena adanya proses re-aglomerasi nanopartikel magnetik akibat interaksi magnetik antar nanopartikel yang cukup kuat. Diperoleh hasil pelapisan optimum dengan ukuran nanopartikel magnetik terlapis kitosan sebesar $\sim 36,5\text{ nm}$ dan nilai magnetisasi 45 emu/gram pada proses dengan sistem pendingin air. Kondisi ini dicapai dengan waktu total proses pelapisan 60 menit untuk waktu efektif proses ultrasonikasi 10 menit.

Kata kunci : Nanopartikel Fe_3O_4 , Kitosan, Ultrasonikasi, Pelapisan

ABSTRACT

ULTRASONICATION TEMPERATURE CONTROL ON COATING PROCESS OF MAGNETIC NANOPARTICLE (Fe_3O_4) WITH CHITOSAN. Chitosan coating on Fe_3O_4 magnetic nanoparticles with organic materials chitosan has been carried out by controlled ultrasonication process. Controlling was done by employing cooling facility base on water and ice as well as setting the ultrasonication temperature to keep the sample temperature below $50\text{ }^\circ\text{C}$ during chitosan coating process. The chitosan-coated nanoparticles were then analyzed for its magnetic properties and particle size distribution using Vibrating Sample Magnetometer (VSM) and Particle Size Analyzer (PSA) respectively. It was found that the addition of the cooling system was effective in controlling the temperature of the sample, reducing the total processing time of coating and also reducing the size of coated nanoparticles. However, the pattern of change in size did not fully follow the standard rules because magnetic nanoparticles tend to re-agglomerates due to strong magnetic interaction between the nanoparticles. The optimum coated nanoparticles having the size of $\sim 36.5\text{ nm}$ and magnetization value of 45 emu/gram was achieved for the process using water as cooler with 60 minutes total coating process and 10 minutes effective ultrasonic time.

Keywords: Fe_3O_4 nanoparticles, Chitosan, Ultrasonic, Coating

PENDAHULUAN

Nanopartikel magnetik akhir-akhir ini menjadi obyek penelitian yang menarik minat banyak pihak untuk dikembangkan dalam berbagai bidang aplikasi biomedis, misalkan sebagai bahan pengontras pada proses diagnostik dengan teknik *Magnetic Resonance Imaging* (Estelrich, Sanchez-Martin, dan Busquets 2015) dan pembangkit panas pada proses hipertermia untuk terapi kanker (Hoque

et al. 2016). Dalam aplikasi biomedis, nanopartikel magnetik haruslah dilapis dengan bahan yang bersifat kompatibel dengan tubuh serta terdispersi secara merata dan stabil dalam medium pelarutnya.

Berbagai jenis bahan polisakarida seperti asam poli-laktat (PLA), dekstran serta kitosan telah diteliti sebagai bahan pelapis (Strbak et al. 2015; Khalkhali et al. 2015; Estelrich, Sanchez-

Martin, dan Busquets 2015). Berbagai karakteristik partikel terlapis yang terbentuk, selain dipengaruhi oleh tipe polimer, juga akan dipengaruhi oleh teknik dan parameter proses pelapisan yang digunakan. Pelapisan nanopartikel magnetik dengan PLA (*Poly-Lactic Acid*) dengan teknik pengadukan menggunakan *mixer* hanya mampu menghasilkan partikel terlapis dengan ukuran mikrometer (Hossain, Patel, dan Ahmed 2014). Dengan teknik pengadukan yang lebih cepat misalkan ultrasonikasi, dapat diperoleh partikel magnetik terlapis PLA dengan ukuran nanometer (Yulianti, Sulungbudi, dan Mujamilah 2009). Ukuran dan distribusi ukuran nanopartikel terlapis PLA juga akan dipengaruhi oleh waktu proses (Hapsari *et al.* 2010).

Proses ultrasonikasi memang merupakan teknik unggul dalam menghasilkan partikel berukuran nanometer (Yamaguchi, Mashima, dan Iyoda 2015). Namun demikian dalam proses ini akan terbentuk panas tinggi yang dapat mempengaruhi karakteristik bahan yang diproses. Untuk nanopartikel magnetik terlapis kitosan, kondisi pelapisan optimal biasanya dicapai setelah proses ultrasonikasi efektif 30 menit (Podreps dan Leitgeb 2013). Proses ini tidak dapat dilakukan dalam satu tahap waktu tanpa pengendalian suhu mengingat kitosan dapat mengalami proses dekomposisi pada suhu $\sim 79^\circ\text{C}$. Uji coba pengendalian suhu proses tetap dibawah 50°C dengan proses ultrasonikasi bertahap yaitu dengan menghentikan proses setelah suhu mencapai 50°C (*off*) dan melanjutkan kembali setelah suhu turun (*on*), menghasilkan waktu total proses mencapai hampir 3 jam untuk 100 mL volume sampel untuk waktu proses efektif 30 menit (Mujamilah dan Sulungbudi 2013). Makin besar volume sampel tentunya akan makin lama waktu proses yang dibutuhkan yang menjadikan teknik ini kurang efisien dari segi waktu.

Secara umum, pada proses ultrasonikasi, iradiasi gelombang suara transversal dengan frekuensi tinggi (20 kHz) pada larutan kimia akan menyebabkan reaksi sonokimia sehingga terbentuk titik gelembung awal dalam larutan. Tahap selanjutnya adalah peningkatan ukuran gelembung akibat proses difusi larutan kedalam gelembung dan dilanjutkan dengan tahap ketiga pecahnya gelembung saat ukurannya telah mencapai maksimal. Pecahnya gelembung ini dapat meningkatkan suhu sekitar gelembung hingga 5000 K (4727°C) dan tekanan hingga ratusan atmosfer (Yamaguchi, Mashima, dan Iyoda 2015). Kondisi ekstrim ini dapat menyebabkan putusannya ikatan kimia bahan-bahan yang ada di sekitar gelembung.

Tahap pemecahan gelombang ini berlangsung dalam orde nano detik dan selanjutnya akan terjadi pendinginan cepat dalam larutan. Suhu akhir setelah pecahnya

gelembung, T_{max} dinyatakan dengan Persamaan 1 (Gedanken 2003):

$$T_{max} = T_o [P_{ex}(x - 1) / P_{bub}] \quad (1)$$

dimana, T_o adalah suhu wadah sonikasi; P_{ex} adalah tekanan eksternal atau jumlah tekanan hidrostatik dan akustik; P_{bub} adalah tekanan gas dalam gelembung pada saat pecah; dan x adalah rasio antara panas jenis pada tekanan tetap (C_p) dan panas jenis pada volume tetap (C_v)

Pada proses pelapisan dengan teknik ultrasonikasi, nilai T_{max} akan menentukan suhu sampel selama proses pelapisan. Seperti telah disampaikan diatas, untuk pelapisan dengan kitosan suhu sampel selama proses pelapisan haruslah selalu berada dibawah suhu dekomposisi kitosan. Mengacu pada Persamaan (1), salah satu cara untuk mengendalikan T_{max} adalah dengan mengendalikan T_o atau dengan mengendalikan suhu wadah proses sonikasi. Pada artikel ini disampaikan hasil studi proses pelapisan kitosan pada nanopartikel Fe_3O_4 dengan menambahkan sistem pendingin berbasis air pada suhu ruang maupun air es pada wadah sonikasi selama proses pelapisan untuk menurunkan T_o . Selain itu waktu efektif proses ultrasonikasi juga divariasikan untuk mempelajari kaitan antara penambahan fasilitas pendingin dengan waktu total proses pelapisan dan karakteristik nanopartikel terlapis terutama sifat magnetik dan distribusi ukuran partikel.

BAHAN DAN METODE

Bahan

Bahan-bahan yang digunakan untuk sintesis nanopartikel magnetik oksida besi adalah garam *iron(II) chloride tetrahydrate* ($\text{FeCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$), *iron(III) chloride hexahydrate* ($\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) serta basa *Sodium hydroxide* (NaOH) p.a produk Merck, serta serbuk kitosan (*medium molecular weight, 75-85% deacetylated, Aldrich*). Air deionisasi, 18.2 M Ω -cm, Millipore, digunakan sebagai pelarut garam-garam dan pencuci sisa klor dalam sintesis nanopartikel magnetik. Asam asetat p.a Merck (CH_3COOH) 1%(v/v) digunakan sebagai pelarut kitosan.

Metode

Proses Pelapisan Kitosan

Kegiatan diawali dengan sintesis nanopartikel magnetik dengan metode ko-presipitasi yang dilakukan dengan mengacu pada literatur (Mujamilah dan Sulungbudi 2013). Endapan nanopartikel magnetik hasil sintesis dalam keadaan lembab disimpan dalam tabung tertutup sebelum proses pelapisan. Untuk pelapisan kitosan, larutan kitosan 1 %(b/v)

disiapkan dengan mengaduk serbuk kering kitosan dalam cairan asam asetat 1 % (v/v) hingga diperoleh larutan bening. Selanjutnya sejumlah endapan basah nanopartikel magnetik ditambahkan dalam larutan kitosan dan dilakukan proses ultrasonikasi menggunakan *ultrasonic irradiator* Sonics, Vibra-Cell® VC-750, dengan mengatur pembatas suhu pada nilai 50 °C. Pengaturan pembatas suhu ini menyebabkan proses akan berhenti (“off”) pada saat suhu sampel telah mencapai 50 °C dan kembali menyala (“on”) saat suhu sampel < 50 °C secara otomatis.

Proses pelapisan selanjutnya dilakukan baik dengan menggunakan fasilitas pendingin maupun tanpa fasilitas pendingin. Variasi kondisi ultrasonikasi yang dilakukan ditampilkan pada Tabel 1. Waktu efektif dalam hal ini didefinisikan sebagai jumlah waktu saat ultrasonik dalam keadaan “on”. Waktu efektif divariasikan pada studi ini untuk mempelajari pengaruh penambahan fasilitas pendingin dalam mempersingkat waktu total pelapisan yang didefinisikan sebagai total waktu “on” dan “off” dari ultrasonikasi. Nilai waktu 30 menit merupakan waktu efektif yang banyak digunakan dalam proses pelapisan kitosan, dan waktu efektif 10 menit diambil sebagai pembandingan.

Koloid hasil proses selanjutnya disentrifugasi dengan kecepatan 3000 rpm selama 15 menit untuk memisahkan nanopartikel magnetik yang masih teraglomerasi dan diambil bagian supernatannya sebagai koloid stabil untuk dikarakterisasi lebih lanjut.

Karakterisasi Nanopartikel Magnetik Terlapis Kitosan

Untuk karakterisasi sifat magnetik, supernatan dikeringkan sehingga diperoleh sampel kering yang selanjutnya ditempatkan dalam tabung gelas dan siap diukur dengan fasilitas VSM (*Vibrating Sampel Magnetometer*) OXFORD 1.2H.

Pengukuran sifat magnet dilakukan pada suhu ruang untuk *range* medan magnet luar hingga 1 Tesla. Distribusi ukuran partikel diukur dengan menggunakan fasilitas *Malvern Zetasizer Nano ZS*. Sejumlah 1 mL supernatan ditempatkan dalam kuvet polistiren dan parameter sudut detektor 173°. Pengukuran dilakukan berulang 3 kali untuk melihat stabilitas koloid.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Penurunan suhu pada wadah akibat penambahan fasilitas pendingin akan mempengaruhi reaksi ultrasonikasi dengan dua cara. Pertama, sesuai persamaan (1) di atas akan menurunkan nilai T_o dan T_{max} . Penurunan

T_{max} ini terbaca dari makin lamanya waktu *on* dan makin singkatnya waktu *off* dan memberikan waktu total proses yang lebih singkat seperti yang ditampilkan pada Tabel 2.

Dari Tabel 2 terlihat bahwa fasilitas pendingin memberikan pengaruh yang cukup signifikan pada penurunan waktu total proses. Makin dingin suhu fasilitas, makin pendek waktu total proses. Selain itu, penambahan fasilitas pendingin mempengaruhi ukuran dan sifat magnetik nanopartikel terlapis kitosan. Kondisi ini terbaca pada hasil pengukuran PSA untuk sampel dengan pendingin es yang diultrasonikasi dengan waktu efektif proses 30 menit (SE30) dibandingkan dengan sampel tanpa pendingin (ST30) yang ditampilkan pada Gambar 1. Terlihat bahwa setelah proses ultrasonikasi dengan pendingin es, diperoleh partikel dengan ukuran kecil dan distribusi ukuran yang cukup sempit yang menunjukkan terjadinya proses homogenisasi dibanding tanpa pendingin. Namun nilai magnetik turun secara signifikan dibanding nilai magnetisasi sampel tanpa pendinginan seperti yang ditampilkan pada Gambar 2.

Dalam proses pelapisan kitosan pada permukaan nanopartikel magnetik dengan teknik ultrasonikasi, energi dari pecahnya gelembung awalnya akan digunakan untuk memecah gumpalan/aglomerat nanopartikel magnetik dan rantai molekul kitosan.

Tabel 1. Variasi parameter proses ultrasonikasi pada pelapisan nanopartikel magnetik Fe₃O₄ dengan kitosan

Kode Sampel	Kondisi ultrasonikasi
ST30	Tanpa fasilitas pendingin, waktu sonikasi 30 menit, sonikasi bertahap dengan pembatasan suhu
SE30	Dengan fasilitas pendingin es, waktu sonikasi 30 menit
SE10	Dengan fasilitas pendingin es, waktu sonikasi 10 menit
SA10	Dengan fasilitas pendingin air, waktu sonikasi 10 menit
ST10	Tanpa fasilitas pendingin, waktu sonikasi 10 menit, sonikasi 1 tahap tanpa pembatasan suhu

Tabel 2. Waktu total pelapisan pada berbagai parameter proses ultrasonikasi

No.	Kode Sampel	Waktu total
1.	ST30	~ 3 jam
2.	SE30	1 jam 43 menit
3.	SE10	14 menit
4.	SA10	1 jam
5.	ST10	10 menit

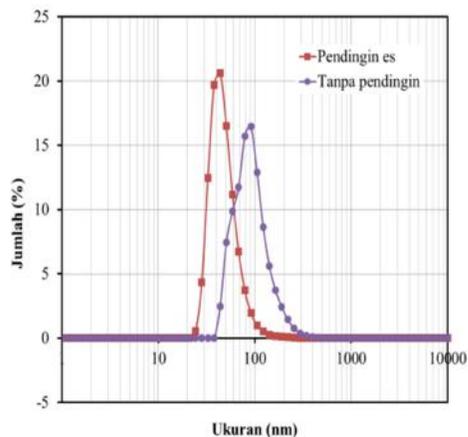
Pada proses penumbuhan-pemecahan gelembung tahap berikutnya, energi tinggi yang dihasilkan dapat digunakan untuk pembentukan radikal aktif baik pada kitosan maupun nanopartikel magnetik yang telah terlepas dari ikatan hidrogen dengan molekul air, dan memungkinkan terjadinya ikatan antara kedua bahan (Merouani *et al.* 2014). Gambaran secara skematik dari proses reaksi yang terjadi ditampilkan pada Gambar 3.

Pada sistem kitosan, El-Hefian *et al.* (2010) mendapatkan bahwa pada rentang 20 °C hingga 50°C, viskositas akan naik dengan turunnya suhu dan makin tajam pada suhu < 20 °C (El-Hefian *et al.* 2010). Kenaikan viskositas pada larutan kitosan akan menyulitkan terbentuknya gelembung awal dan juga pertumbuhan gelembung (Jenkins dan Kiely 2012). Ukuran gelembung menjadi lebih kecil sehingga energi yang terlepas pada proses pemecahan juga rendah (Merouani *et al.* 2014). Penjalaran gelembung juga akan lebih sulit pada medium dengan viskositas tinggi sehingga homogenisasi reaksi lebih lama tercapai.

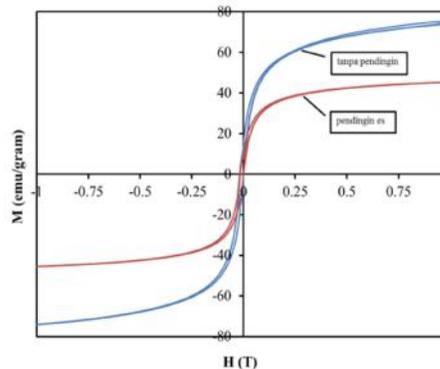
Pada awal proses ultrasonikasi, pemutusan rantai kitosan belum terjadi dengan sempurna dan agregat nanopartikel magnetik belum terpisah dengan baik sehingga viskositas juga cenderung akan semakin naik, karena medium hanya akan mengalami perenggangan ikatan sebelum terjadinya pemutusan sempurna ikatan (Ruan dan Jacobi 2012). Makin lama waktu proses, pemutusan ikatan dan dispersi agregat menjadi makin sempurna namun tetap dengan ukuran partikel yang cenderung kecil dan homogen.

Nilai magnetik yang lebih tinggi pada nanopartikel tanpa pendingin menunjukkan fraksi/lapisan kitosan yang lebih tipis karena proses ultrasonikasi berlangsung pada medium dengan viskositas yang lebih rendah. Namun tipisnya lapisan kitosan menjadikan interaksi magnetik antar partikel terlapis menjadi lebih kuat yang mengakibatkan terjadinya proses re-aglomerasi nanopartikel tunggal yang telah terlapis dan menghasilkan aglomerat nanopartikel terlapis berukuran besar pada sampel tanpa pendingin. Adanya proses re-aglomerasi pada sistem nanopartikel magnetik

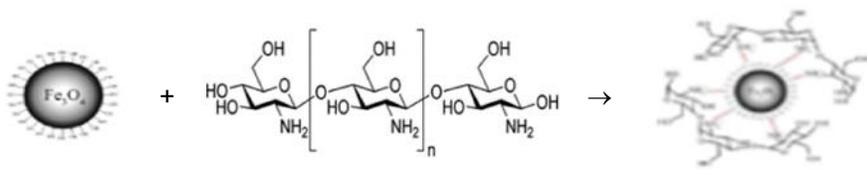
ini, memberikan pola perilaku yang berbeda dengan kaidah bahwa makin lama waktu proses ultrasonikasi dan makin rendah viskositas medium larutan, akan makin kecil ukuran partikel yang diperoleh. Kaidah ini lebih dipatuhi pada proses pelapisan pada sampel non magnetik, misalkan pelapisan kitosan pada nanopartikel obat (Sugita, Ambarsari, dan Farichah 2013)



Gambar 1. Distribusi ukuran nanopartikel terlapis hasil pengukuran PSA untuk sampel ST30 dan SE30

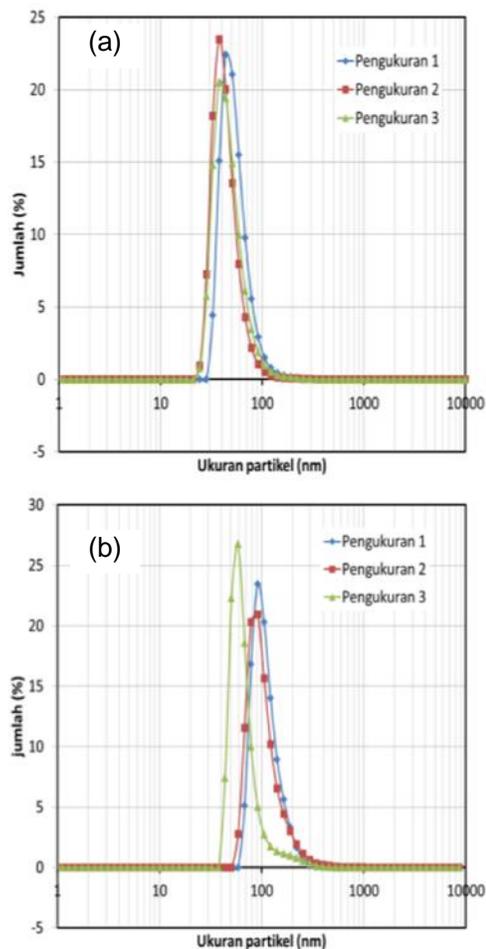


Gambar 2. Kurva histeresis magnetik nanopartikel terlapis hasil pengukuran VSM untuk sampel ST30 dan SE30



Gambar 3. Skema proses reaksi pelapisan kitosan pada permukaan nanopartikel magnetik Fe₃O₄

Proses re-aglomerasi ini juga tidak terjadi pada nanopartikel hasil proses dengan fasilitas pendingin yang terlapis chitosan cukup tebal. Dengan nilai ukuran partikel maksimal $\sim 35 \pm 12,83$ nm, dan data ukuran nanopartikel magnetik tunggal adalah ~ 10 nm (Mujamilah dan Sulungbudi 2013), setelah 30 menit waktu efektif proses maka dapat diprediksikan terbentuknya nanopartikel terlapis yang berisi 2 hingga maksimal 4 deretan nanopartikel magnetik dan ketebalan lapisan kitosan kurang dari 5 nm. Kondisi ini memberikan hasil stabilitas koloid yang lebih baik pada sampel SE30 dibanding sampel ST30 seperti yang ditampilkan pada hasil pengukuran PSA berulang untuk kedua sampel pada Gambar 4.



Gambar 4a. Distribusi ukuran nanopartikel terlapis hasil pengukuran PSA dengan 3 kali pengulangan pengukuran: (a) Sampel SE30, (b) Sampel ST30

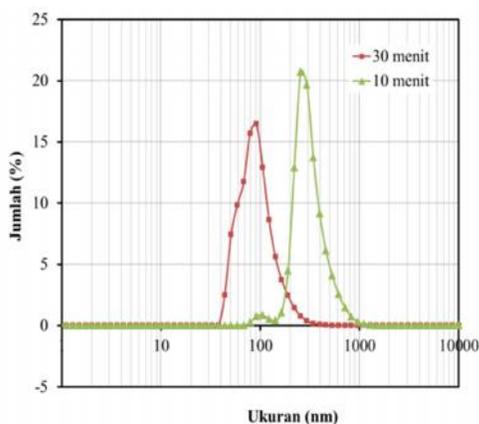
Efek waktu terhadap dua karakteristik nanopartikel terlapis ini kembali terbaca pada sistem tanpa pendingin yang diproses dengan waktu yang berbeda. Gambar 5 menampilkan pola distribusi ukuran nanopartikel terlapis yang diproses tanpa pendingin selama 10 menit (ST10) dan 30 menit (ST30).

Seperti telah disampaikan di atas, pada sistem tanpa pendingin ini, dengan viskositas yang lebih rendah, gelembung yang terbentuk lebih besar, sehingga energi untuk memecah aglomerat dan pemutusan rantai ikatan menjadi lebih besar. Rantai-rantai pendek kitosan hanya akan memberi ikatan tipis pada nanopartikel magnetik, sehingga aglomerat terbentuk cukup besar karena interaksi magnetik antar partikel yang masih kuat. Sampel menjadi mudah mengendap dan pola pada Gambar 5 menampilkan distribusi ukuran partikel sampel ST10 bagian supernatan setelah pengendapan ~ 1 tahun.

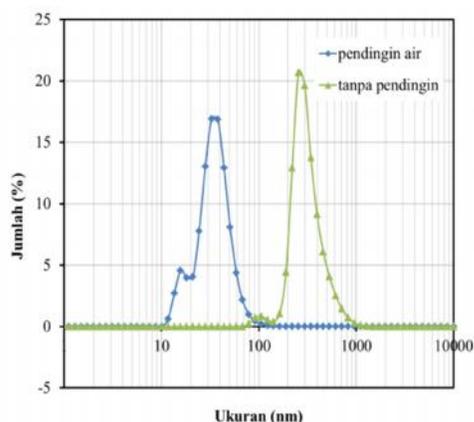
Dengan ukuran partikel sebesar itu namun tidak mengendap menunjukkan bahwa partikel yang tertinggal di supernatan ini merupakan fraksi partikel yang mengandung fraksi kitosan yang cukup tinggi. Adanya fraksi kitosan ini memberi efek *steric hindrance* pada nanopartikel magnetik, sehingga aglomerasi karena interaksi magnetik tidak terbentuk.

Beberapa data terkait sifat magnetik nanopartikel hasil pelapisan di atas menunjukkan bahwa panas tinggi yang timbul selama proses ultrasonikasi, tidak merubah sifat intrinsik nanopartikel Fe_3O_4 yang terpantau dari pola difraksi sinar-X sampel setelah proses pelapisan (Sulungbudi *et al.* 2013). Singkatnya efek panas tinggi yang terjadi dan kehadiran kitosan di permukaan nanopartikel dianalisis menjadi penyebab tetap stabilnya sifat magnetik nanopartikel Fe_3O_4 .

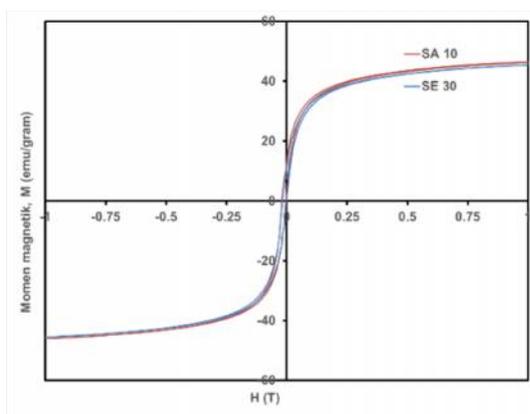
Proses ultrasonikasi dengan pendingin air kembali membuktikan terbentuknya nanopartikel terlapis berukuran lebih kecil dibanding tanpa pendingin, juga terjadinya nanopartikel yang belum homogen dalam proses ultrasonikasi pendek seperti yang ditampilkan pada data PSA untuk sampel ST10 dibandingkan sampel SA10 pada Gambar 6. Kurva histeresis sampel SA10 dibandingkan kurva untuk sampel SE30 pada Gambar 7 menunjukkan nilai magnetisasi yang hampir sama, kembali membuktikan bahwa perubahan karakteristik magnetik terlapis lebih disebabkan oleh efek pelemahan oleh hadirnya fraksi non-magnetik kitosan pada sampel uji pada pengukuran VSM.



Gambar 5. Distribusi ukuran partikel hasil pengukuran PSA pada sampel ST10 dan ST30



Gambar 6. Distribusi ukuran partikel hasil pengukuran PSA sampel ST10 dan SA10



Gambar 7. Kurva histeresis magnetik nanopartikel terlapis hasil pengukuran VSM untuk sampel SA10 dan SE30

KESIMPULAN

Secara umum, dari berbagai pembahasan di atas dapat disimpulkan bahwa penambahan fasilitas pendingin memberikan efek penurunan waktu total proses ultrasonikasi yang cukup signifikan. Penambahan fasilitas pendingin ini juga berpengaruh pada ukuran dan homogenitas partikel yang terbentuk. Ukuran partikel cenderung mengecil dengan adanya penambahan fasilitas pendingin meski viskositas medium cenderung naik. Waktu proses yang lebih panjang cenderung lebih meningkatkan homogenitas ukuran partikel dan tidak selalu menurunkan ukuran partikel.

Adanya proses re-aglomerasi pada sistem nanopartikel magnetik memberikan pola perilaku yang berbeda dengan kaidah bahwa makin lama waktu proses ultrasonikasi dan makin rendah viskositas medium larutan, akan makin kecil ukuran partikel yang diperoleh. Perubahan karakteristik magnetik terlapis lebih disebabkan oleh efek pelemahan oleh hadirnya fraksi non-magnetik kitosan pada sampel uji pada pengukuran VSM. Diperoleh hasil pelapisan optimum dengan ukuran nanopartikel magnetik terlapis kitosan sebesar ~ 36,5 nm dan nilai magnetisasi 45 emu/gram pada proses dengan sistem pendingin air. Kondisi ini dicapai dengan waktu total proses pelapisan 60 menit untuk waktu efektif proses ultrasonikasi 10 menit.

UCAPAN TERIMA KASIH

Kegiatan ini merupakan bagian dari program kegiatan PSTBM-BATAN 2011-2014 dengan judul Litbang Bahan Unggul Magnetik untuk Aplikasi Diagnostik yang didanai dari anggaran DIPA TA 2011-2014.

DAFTAR PUSTAKA

- El-Hefian, E.A., E. Elgannoudi, A. Mainal, dan A.H. Yahaya. 2010. "Characterization of chitosan in acetic acid: Rheological and thermal studies." *Turkish Journal of Chemistry* 34 (1): 47–56. doi:10.3906/kim-0901-38.
- Estelrich, J., M.J. Sanchez-Martin, dan M.A. Busquets. 2015. "Nanoparticles in magnetic resonance imaging: from simple to dual contrast agents." *International Journal of Nanomedicine* 10: 1727–41.
- Gedanken, A. 2003. "Sonochemistry and its application to nanochemistry." *Current Science* 85 (12): 1720–22.
- Hapsari, B. W., Mujamilah, M. Kurniati, dan Grace Tj. Sulungbudi. 2010. "Sintesis Nanosfer Berbasis Ferofluid dan Poly Lactic Acid dengan Metode Sonikasi."

- Jurnal Sains Materi Indonesia* 11 (2): 139–44.
- Hoque, S.M., Y. Huang, E. Cocco, S. Maritim, A.D. Santin, E.M. Shapiro, D. Coman, dan F. Hyder. 2016. "Improved specific loss power on cancer cells by hyperthermia and MRI contrast of hydrophilic Fe₃O₄ nanoensembles." *Contrast media & molecular imaging*, September. doi:10.1002/cmml.1713.
- Hossain, K., M. Zakir, U. Patel, dan I. Ahmed. 2014. "Development of microspheres for biomedical applications: a review." *Progress in Biomaterials* 4 (1): 1–19. doi:10.1007/s40204-014-0033-8.
- Jenkins, D.R., dan J. Kiely. 2012. "Equilibrium, stability and evolution of bubbles in a finite melt volume" *D*: 1–16. doi:10.21914/anziamj.v53i0.5102.
- Khalkhali, M., S. Sadighian, K. Rostamizadeh, F. Khoeini, M. Naghibi, N. Bayat, M. Habibzadeh, dan M. Hamidi. 2015. "Synthesis and characterization of dextran coated magnetite nanoparticles for diagnostics and therapy." *BioImpacts* 5 (3): 141–50. doi:10.15171/bi.2015.19.
- Merouani, S., O. Hamdaoui, Y. Rezgui, dan M. Guemini. 2014. "Theoretical estimation of the temperature and pressure within collapsing acoustical bubbles." *Ultrasonics Sonochemistry* 21 (1): 53–59. doi:10.1016/j.ultsonch.2013.05.008.
- Mujamilah, dan G.T. Sulungbudi. 2013. "Karakteristik Dinamik Sistem Koloid Magnetik Berbasis Nanpartikel Oksida Fe-Chitosan." *Kimia dan Kemasan* 35 (1): 65–70.
- Podreps, G.H., dan M. Leitgeb. 2013. "Different preparation methods and characterization of magnetic maghemite coated with chitosan." *J Nanopart Res* 15:1751: 1–12. doi:10.1007/s11051-013-1751-x.
- Ruan, Binglu, dan Anthony M Jacobi. 2012. "Ultrasonication effects on thermal and rheological properties of carbon nanotube suspensions." *Nanoscale research letters* 7 (1): 127. doi:10.1186/1556-276X-7-127.
- Strbak, O, D Gogola, L Baciak, A Krafcik, M Masarova, I Antal, M Kubovcikova, et al. 2015. "Measurement of the Magnetite Nanoparticles Relaxivity During Encapsulation into PLA Carriers Institute of Measurement Science , Slovak Academy of Sciences , Bratislava , Slovakia Faculty of Chemical and Food Technology , Slovak Technical University , Brat." *MEASUREMENT 2015, Proceedings of the 10th International Conference, Smolenice, Slovakia Measurement*, no. i: 117–20.
- Sugita, P., L. Ambarsari, dan F. Farichah. 2013. "Chitosan-Ketoprofen Nanoparticle Using Ultrasonication Method With Varied Time and Amplitude" 14 (March): 612–18.
- Sulungbudi, G.T., A. Karo Karo, W.Z. Lubis, Mujamilah, dan Sudirman. 2013. "Preparation of Chitosan Coated Magnetic Nanoparticles for Biomedical Application." In *The International Seminar on Magnetic Materials*. Batam.
- Yamaguchi, A., Y. Mashima, dan T. Iyoda. 2015. "Reversible Size Control of Liquid-Metal Nanoparticles under Ultrasonication." *Angew. Chem. int. Ed* 54: 12809–13. doi:10.1002/anie.201506469.
- Yulianti, E., G.T. Sulungbudi, dan Mujamilah. 2009. "Sintesis dan Proses Enkapsulasi Sistem Ferrofluid Fe₃O₄/ -Fe₂O₃ dengan Polimer Poly (Lactic Acid)." *Jurnal Sains Materi Indonesia* 10 (3): 207–12.