

Sifat dan Aplikasi Nanomaterial Magnetik sebagai Katalis Heterogen

Bayu Ardiansah¹, Ridla Bakri^{1,*}, Mirzanur Hidayat²

¹Departemen Kimia, FMIPA, Universitas Indonesia
Kampus UI Depok, Depok 16424

²Program Studi Pendidikan Fisika, Universitas Muhammadiyah Prof. DR. HAMKA
Jl. Tanah Merdeka, Jakarta 13830

Abstrak

Nanomaterial magnetik merupakan tren baru dalam ilmu material yang menunjukkan sifat fisikokimia yang khas dan memiliki manfaat yang luas pada berbagai disiplin ilmu. Di dalam paper ini akan dibahas mengenai sifat dan kegunaan nanomaterial magnetik khususnya di bidang katalis heterogen sintesis senyawa organik yang aktif dan dapat digunakan kembali (*reusable*).

© 2016 Penulis. Diterbitkan oleh Pendidikan Fisika UHAMKA

Kata kunci: nanomaterial, magnetik, sintesis organik, katalis heterogen

*Penulis koresponden. Alamat email: bakri@ui.ac.id

Pendahuluan

Beberapa tahun belakangan ini, nanosains dan nanoteknologi telah menjadi bidang kajian yang berkembang dengan cepat dan menarik perhatian para ilmuwan, baik yang berkiprah di dunia akademik maupun sektor industri praktis [1-3]. Keluaran dari nanosains dan nanoteknologi adalah berupa material yang berdimensi nanometer (disebut dengan nanomaterial), yaitu semua material yang memiliki ukuran partikel antara 1-100 nm [4]. Struktur, sifat dan fungsi dari nanomaterial secara bertahap mulai dimengerti dengan ditemukannya beragam manfaat dari nanomaterial serta perkembangan instrumen karakterisasi modern. Hingga saat ini, nanomaterial banyak disintesis oleh para peneliti karena material tersebut memiliki sifat-sifat yang sangat berbeda dengan material sejenis yang berada dalam ukuran yang lebih besar [5].

Pada perkembangan selanjutnya, untuk meningkatkan efisiensi/aktivitas kerja, fungsi dan kebutuhan industri yang spesifik, khususnya di bidang fisika material, biosensor, elektronik dan kimia katalis, dilakukan modifikasi sifat dari nanomaterial menjadi sensitif dalam memberikan respon terhadap medan magnet, yang disebut dengan

nanomaterial magnetik [6]. Material jenis ini, selain memiliki luas permukaan yang besar dan sifat fisikokimia yang beragam [7], juga telah dimanfaatkan secara nyata dalam pengobatan kanker, agen kontras dalam Magnetic Resonance Imaging (MRI) dan pelepasan obat terkontrol (*controlled drug delivery*) [8]. Dengan banyaknya aplikasi dari nanomaterial magnetik yang ditemui, maka paper ini bertujuan untuk mengulas mengenai perkembangan jenis-jenis nanomaterial magnet, sifat serta kegunaannya dalam bidang katalisis untuk menghasilkan produk-produk fungsional.

Pembahasan

Tipe Pembuatan dan Sifat-Sifat Nanomaterial Magnetik

Selama dekade terakhir, banyak nanomaterial magnetik yang telah dibuat, sebagai contoh misalnya MnFe_2O_4 , CoFe_2O_4 [2], Fe_3O_4 -sitrak [8], $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2$ [9], $\text{Co}@\text{SiO}_2$ [10] dan strontium heksoferrit tersubstitusi oleh Bi-Cr [11]. Nanomaterial magnetik dapat dibuat menggunakan tiga macam metode, yaitu secara fisika, kimia dan memanfaatkan mikroba.

Salah satu pembuatan nanomaterial magnetik secara fisika adalah dengan teknik *electron-beam lithography*. Cara ini dapat menghasilkan nanomaterial dengan ukuran partikel yang relatif sangat kecil, yaitu 5-10 nm. *Electron-beam lithography* dibagi lagi menjadi 3 tipe, yaitu sistem *scanning (single atau multiple Gaussian beam)* yang mempunyai 2 keunggulan, fleksibel dan murah; sistem paparan paralel, dengan keunggulan berupa kecepatan produksi yang tinggi dan biayanya murah; serta sistem hibrid, yang lebih kompleks dibandingkan dengan cara Gaussian [12]. Cara kedua pembuatan nanomaterial magnetik adalah dengan metode kimia, yang meliputi beberapa teknik, yaitu sol-gel, kopresipitasi, dekomposisi termal suhu tinggi, dan metode elektrokimia, yang dapat ditemukan pada beberapa referensi [2,8,13,14]. Untuk metode pembuatan nanomaterial magnetik menggunakan mikroba masih jarang, walaupun ada peneliti yang mulai mengeksplorasi cara ini [15,16].

Penggabungan partikel-partikel (aglomerasi) dari nanomaterial magnetik merupakan kendala yang sering ditemui. Untuk mengontrol ukuran partikel tersebut, digunakan agen penstabil. Beberapa contoh agen penstabil dapat berupa surfaktan, polimer, maupun senyawa kompleks koordinasi, seperti 3-aminopropil trimetoksisilana [9], kompleks Co(II) dengan basa Schiff [10], glisin, 3-glisidoksisilana, poli-lisin [14], serta perpaduan antara grapheme oxide dan karboksimetilselulosa [17]. Setelah proses pembuatan nanomaterial magnetik, analisis keberhasilannya dapat dilakukan dengan berbagai macam teknik instrumentasi, seperti Scanning Electron Microscopy (SEM), Transmission Electron Microscopy (TEM), Energy Dispersive X-ray tandem Transmission Electron Microscopy (EDX-TEM), difraksi sinar-X (XRD), Atomic Force Microscopy (AFM) dan Electron-Energy-Loss Spectrometry (EELS) [3].

Sifat khas dari nanomaterial magnetik adalah memberikan respon terhadap medan magnet eksternal. Berdasarkan kuat/lemahnya respon, nanomaterial ini diklasifikasikan menjadi 5 tipe, yaitu diamagnetik, paramagnetik, ferromagnetik, anti-ferromagnetik dan ferrimagnetik [3]. Material dengan momen magnetik atom tidak berpasangan digolongkan sebagai paramagnetik. Apabila material ini memiliki ukuran nano, sifat magnetnya akan lebih kuat daripada material sejenis dengan ukuran yang lebih besar [15]. Dua faktor utama yang mempengaruhi sifat magnet dari suatu material adalah pH medium ketika dilakukan pembuatan material serta kenaikan temperatur [18-20]. A. Abendini *et al.* mensintesis nanomaterial Fe_2O_3 menggunakan teknik radiasi sinar gamma dimana pada prosesnya dilakukan variasi pH larutan [18]. Pada pH rendah, kecepatan reduksi ion Fe^{3+} menu-

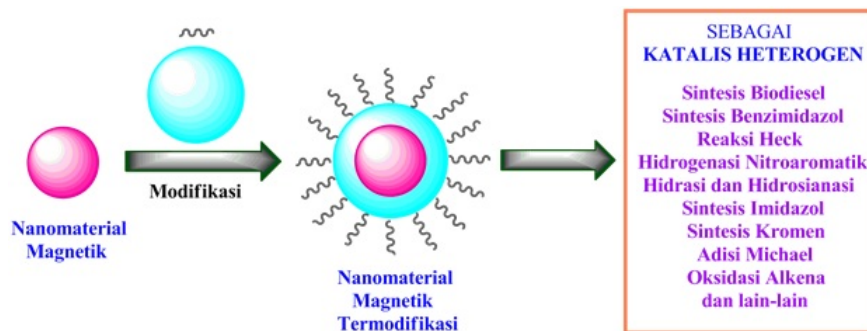
run sehingga produknya didapatkan campuran material yang memiliki sifat dia dan paramagnetik. Kenaikan pH medium sampai dengan 12 menyebabkan electron yang terdapat dalam keadaan terhidrasi semakin banyak dan meningkatkan kecepatan reduksi ion Fe^{3+} , konsekuensinya adalah pembentukan nanomaterial Fe_3O_4 yang bersifat superparamagnetik. Apabila pH dinaikkan menjadi diantara 12-14, terjadi pembentukan padatan coklat sebagai FeOOH sebelum radiasi sinar gamma dilakukan. Analisis menggunakan Vibrating Sample Magnetometer (VSM), suatu alat pengukur sifat magnet, menunjukkan bahwa FeOOH bersifat paramagnetik [18]. Faktor kedua yang mempengaruhi besarnya sifat magnet adalah temperatur. I. Sadiq *et al.* telah membuktikan bahwa dengan adanya kenaikan temperatur dari 100 menjadi 200-500°C terjadi pola penurunan kemagnetan dari material $\text{Sr}_{2-x}\text{Gd}_x\text{Ni}_2\text{Fe}_{28-y}\text{Cd}_y\text{O}_{46}$ ($x = 0,00; 0,02; 0,04; 0,06; 0,08; 0,10$ dan $y = 0,0; 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5$) [20].

Nanomaterial Magnetik sebagai Katalis

Nanomaterial magnetik dapat diaplikasikan sebagai katalis heterogen pada berbagai macam reaksi kimia [21-23]. Penggunaan material ini mendapat perhatian dari peneliti-peneliti di berbagai belahan dunia disebabkan karena tidak korosif, mudah dipisahkan dari campuran reaksi, dapat digunakan dan diperoleh kembali (*reusable and recoverable*) [21,23]. Hal ini sangat mendukung proses reaksi dalam menghasilkan produk yang lebih berguna dengan tetap mengedepankan prinsip-prinsip yang ramah lingkungan [23]. Berikut ini merupakan beberapa jenis reaksi kimia yang menggunakan nanomaterial magnetik sebagai katalis untuk mengakselerasi proses sintesisnya.

Sintesis Biodiesel

Reaksi sintesis biodiesel dapat dilakukan dengan menggunakan paduan (*alloy*) nanomaterial magnetik, seperti $\text{Ca}/\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2$ [24], $\text{MgO}/\text{MgAl}_2\text{O}_4$ [25] dan $\text{CsH}_2\text{PW}_{12}\text{O}_{40}/\text{FeSiO}_2$ [26]. M. Feyzi and L. Norouzi membuat nanomaterial $\text{Ca}/\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2$ dalam tiga tahap [24]. Pertama, Fe_3O_4 yang berukuran nano dibentuk dengan metode kopresipitasi. Setelah itu, ke dalam nanomaterial Fe_3O_4 ditambahkan larutan tetraetoksisilana dalam suasana basa (NH_3) sehingga terbentuk $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2$. Terakhir, nano $\text{Ca}/\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2$ disiapkan dengan menambahkan larutan kalsium nitrat tetrahidrat sebagai prekursor melalui teknik impregnasi basah. Reaksi sintesis biodiesel menggunakan nanomaterial $\text{Ca}/\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2$ mencapai keadaan optimum pada kondisi operasi dimana rasio metanol/minyak nabati 15:1 pada 65°C selama 5 jam dan biodiesel yang terbentuk mencapai 97% yield [24].



Gambar 1 Alur pemanfaatan nanomaterial magnetik sebagai katalis heterogen.

Sintesis Benzimidazol dan Benzotiazol

Magnetite yang dimodifikasi silika dan kolagen ($\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2/\text{kolagen}$) dapat digunakan sebagai katalis pada sintesis senyawa benzimidazol dan benzotiazol, dimana senyawa ini merupakan senyawa heterosiklis yang memiliki berbagai aktivitas biologi [27]. Hibrid organik anorganik pada nanomaterial ini dikarakterisasi dengan $^1\text{H-NMR}$ dimana menunjukkan puncak-puncak proton pada senyawa kolagen [27]. Nanomaterial termodifikasi tersebut dapat digunakan secara berulang sampai dengan 4 kali reaksi dengan tetap menghasilkan rendemen produk yang tinggi (73-97%).

Reaksi Heck dan tandem Mizoroki-Heck

Core@shell $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2$ yang dimodifikasi dengan menggunakan logam palladium akan menghasilkan nanomaterial $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2$ -palladium yang dapat digunakan sebagai katalis ramah lingkungan untuk reaksi Heck silang [28]. $\text{Pd}(0)$ dapat terikat ke dalam sistem nanomaterial dengan memanfaatkan dua agen pengikat, yaitu trietoksivinilsilana (VTEOS) dan N-(2-aminoetil)-3-aminopropiltrimetoksilana (AEAPS) melalui ikatan koordinasi. Kekuatan magnet dari material ini mencapai 80 emu/g. Aplikasi pada reaksi Heck menunjukkan bahwa nanokatalis ini sangat aktif, dengan 0,1% mol $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2$ -palladium selama 6 jam dan suasana basa (K_2CO_3) akan menghasilkan produk reaksi dengan 100% konversi [28]. Reaksi tandem Mizoroki-Heck juga dapat dilangsungkan menggunakan nanomaterial magnetik yaitu poly(N-vinilpirolidon yang ter-loading palladium dan besi [29]. Nanomaterial ini sangat aktif dan menghasilkan produk dengan rendemen tertinggi sebesar 96% hanya dalam waktu 30 menit.

Hidrogenasi Nitroaromatik

U. Kurtan dan *co-authors* melakukan pembuatan nanokatalis magnetik paduan Fe_3O_4 dan perak dengan dimodifikasi oleh asam nikotinat, $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{Nico}@\text{Ag}$, yang digunakan pada reaksi hidrogenasi senyawa nitroaromatik menjadi turunan anilin [30]. Kekuatan magnet dari material ini mencapai 50 emu/g pada pemberian medan magnet 15000 Oe. Konversi nitroaromatik men-

jadi nitroanilin dapat diakomodir dalam waktu kurang dari 5 menit. Pada pemakaian pertama, $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{Nico}@\text{Ag}$ mampu mengkonversi 100% nitroaromatik, sedangkan pada pemakaian berulang yang keempat mampu mengkonversi sebesar 93% [30]. Dengan demikian, dapat dikatakan bahwa nanomaterial magnetik ini sangat aktif dan stabil. Pada penelitian yang lain, senyawa kloronitroaromatik juga merupakan substrat target untuk dikonversi menjadi anilin tersubstitusi. Hal ini karena anilin merupakan produk intermediet pada pembuatan poliuretan, ban mobil, zat warna dan herbisida [31]. Y. Kie *et al.* melakukan reaksi hidrogenasi senyawa kloronitroaromatik menggunakan nanokatalis alloy Pt/C(Ni). Reaksi organik dapat dilangsungkan pada temperatur 30°C dan tekanan atmosfer [31].

Reaksi Hidrasi dan Hidrosianasi

S. Rostamizadeh *et al.* membuat nanomaterial ($\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$)-MCM-41-HS-Au dari kombinasi reaktan ($\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$)-MCM-41, (3-merkaptopropil) trimetoksisilana (MPTMS) dan HAuCl_4 [32]. Katalis ($\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$)-MCM-41-HS-Au mampu mempercepat laju reaksi hidrasi alkuna menjadi suatu vinil alkohol yang terhubung dengan cincin aromatik. Reaksi ini dapat dijalankan pada temperatur kamar dan pada berbagai macam variasi pelarut seperti dioksan, methanol dan air. Akan tetapi, rendemen tertinggi (100%) berhasil dicapai ketika reaksi dilangsungkan tanpa menggunakan pelarut (*solvent-free*) [32]. Tidak hanya reaksi hidrasi, reaksi adisi HCN (hidrosianasi) terhadap ikatan rangkap pada senyawa chalcone juga dapat dilakukan menggunakan katalis magnetik hidroksiapatit yang difungsionalisasi oleh tiourea (tiourea-mHAp) [33]. Nanomaterial tiourea-mHAp mengkatalisis reaksi dengan menghasilkan rendemen sebesar 85-92%. Pada penggunaan berulang, material ini dapat digunakan sebanyak 10 kali *run* tanpa kehilangan aktivitas katalitik yang berarti (yield 90-78%).

Sintesis Senyawa Imidazol

A. Maleki *et al.* membuat nanomaterial magnetik $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2$ -urea yang digunakan pada reaksi sintesis imidazol [34]. Sifat magnet dari

$\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2\text{-urea}$ lebih rendah apabila dibandingkan dengan $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2$ dan Fe_3O_4 . Magnetite Fe_3O_4 mempunyai kemagnetan 50,5 emu/g (8000 Oe) dan $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2$ sebesar 38,2 emu/g (8000 Oe), sementara itu $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2\text{-urea}$ hanya 24,7 emu/g (8000 Oe). Walaupun sifat kemagnetannya tergolong rendah, $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2\text{-urea}$ mampu mengkatalisis reaksi *one-pot multicomponent* yang terdiri dari benzyil/benzoin, aldehida aromatik dan ammonium asetat untuk menghasilkan imidazol dengan rendemen tertinggi sebesar 95% dengan kondisi berat katalis 0,0088 g, pelarut etanol dalam sistem refluks pada 50°C [34]. Nanomaterial $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2\text{-urea}$ mampu digunakan hingga 6 kali pengulangan reaksi dengan prosedur yang sama dengan nilai rendemen 95, 92, 92, 90, 86 dan 80%.

Sintesis Senyawa Kromen

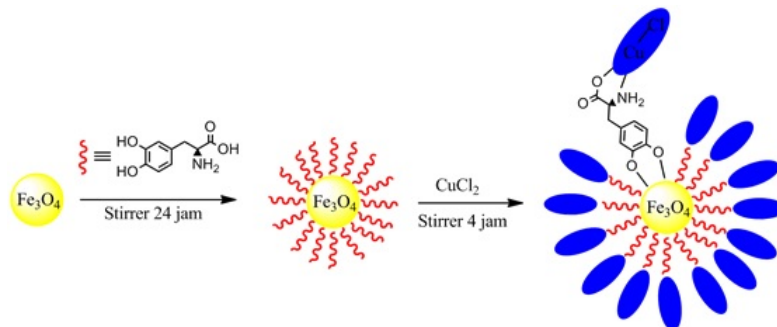
Senyawa kromen dapat disintesis menggunakan nanomaterial magnetic CuFe_2O_4 sebagai katalis [35]. Sebelum diaplikasikan pada sintesis, CuFe_2O_4 dibuat terlebih dahulu melalui teknik kopresipitasi dengan bantuan gelombang ultrasonik dalam medium pH basa. Prekursor berupa CuSO_4 dan FeCl_3 dilarutkan dalam air bebas ion milipore dan disonikasi selama 15 menit. Kedua larutan tersebut kemudian dicampurkan dan disonikasi kembali. Nanomaterial didapatkan setelah pada campuran ditambah KOH 3M, dan endapan coklat yang terbentuk dikeringkan pada temperatur 60°C. Sifat magnet yang didapatkan sangat rendah, yaitu sebesar 0,08 emu/g pada pemberian medan 8000 Oe [35].

Katalis CuFe_2O_4 potensial untuk digunakan pada sintesis senyawa turunan kromen. Hal ini ditunjukkan dengan keaktifan yang dimiliki pada penelitian Rajput *et al.* yang dapat menghasilkan rendemen kromen tertinggi sebesar 92% pada penggunaan 0,07 mmol nanomaterial dan reaksi dilakukan pada pelarut etanol, 60°C dan waktu reaksi 4 menit [35]. Senyawa kromen yang mengandung rangka nikotinonitril dapat disintesis menggunakan katalis nanobiokomposit $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3/\text{selulosa}/\text{Ag}$ [36]. Nanomaterial ini disiapkan dengan menggunakan

metode kopresipitasi antara Fe^{2+} dan Fe^{3+} , dimana kedua larutan ini ditambahkan bersama-sama tetes demi tetes ke dalam larutan selulosa yang telah disiapkan sebelumnya menggunakan PEG-2000/NaOH sebagai penstabil. Di dalam wadah yang lain, disiapkan larutan AgNO_3 yang distabilkan oleh poli(N-vinilpirolidon). Larutan dalam kedua wadah dicampur dan ditambahkan agen pereduksi NaBH_4 sehingga terbentuk nanobiokomposit $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3/\text{selulosa}/\text{Ag}$. Kejenuhan magnetik dari komposit ini adalah 6,2 emu/g. Pada pengaplikasiannya sebagai nanokatalis, material ini mampu menghasilkan produk dengan rendemen tertinggi senilai 89% dengan waktu reaksi selama 1,5 jam pada penggunaan 0,15 g katalis [36].

Reaksi Adisi Michael

Nanomaterial Fe_3O_4 terfungsionalisasi L-DOPA (L-3,4-dihidroksifenilalanin) yang terkoordinasi dengan Cu(II) berhasil dibuat oleh A. Datta *et al.* dan digunakan pada reaksi adisi Michael [37]. Fe_3O_4 disiapkan dengan metode kopresipitasi menggunakan FeCl_2 dan FeCl_3 . Setelah Fe_3O_4 terbentuk, ditambahkan ke dalam larutan panas L-DOPA dan distirrer selama 24 jam. Pada tahap terakhir, CuCl_2 didispersikan ke dalam $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{L-DOPA}$ dan distirrer selama 4 jam. Padatan yang terbentuk kemudian dioven pada temperatur 60°C selama 2 jam, dan ditandai sebagai nanomaterial $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{L-DOPA}@\text{Cu(II)}$. Sifat magnet dari $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{L-DOPA}$ (18,9 emu/g) lebih rendah daripada nanomaterial Fe_3O_4 (58,2 emu/g). Penurunan ini disebabkan oleh *coating* struktur organik yang bersifat diamagnetik. Akan tetapi setelah penempelan Cu(II), sifat magnetnya sedikit bertambah (26,7 emu/g) [37]. Reaksi adisi Michael adalah reaksi pemasukan nukleofil disertai penjenjuran rantai C-C dimana ikatan rangkap bertetangga dengan gugus karbonil atau gugus penarik elektron yang lain. Pada penelitian A. Datta *et al.* didapatkan produk dengan rendemen yang baik, antara 58-68% dan *enantiomeric excess* sebesar 55-75%. Nilai ini menandakan bahwa reaksi dapat berlangsung secara selektif [37].



Gambar 2 Ilustrasi pembuatan nanomaterial magnetik $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{L-DOPA}@\text{Cu(II)}$. Gambar dibuat dan didesain ulang oleh penulis sesuai dengan keterangan pada referensi [37].

Reaksi Oksidasi Alkena

S. Rayati dan P. Abdolalian mempublikasikan hasil penelitian mereka mengenai pembuatan nanokatalis magnetik (α -Fe₂O₃)-MCM-41-Mo(O₂)L, dimana L adalah suatu struktur *bulky* dari senyawa basa Schiff [38]. Nanomaterial ini mampu mengoksidasi alkena menjadi epoksida dengan agen oksidasi berupa hidrogen peroksida dengan nilai konversi alkena sebesar 100% setelah reaksi berjalan selama 8 jam. Selain itu, nanomaterial (α -Fe₂O₃)-MCM-41-Mo(O₂)L dapat mengkatalisis transformasi α -metil stirena menjadi asetofenon dengan selektivitas 90% dan konversi 100% [38].

Kesimpulan dan Prospek

Dalam dekade terakhir, nanomaterial magnetik mendapatkan perhatian serius karena aplikasinya yang begitu luas. Di bidang katalisis, nanomaterial magnetik merupakan terobosan baru yang ditemukan untuk diproyeksikan sebagai katalis heterogen. Penggunaan katalis heterogen dalam reaksi kimia merupakan konsekuensi dari pengejawantahan prinsip-prinsip *Green Chemistry*. Nanomaterial magnetik sebagai katalis heterogen mampu menyuguhkan keunikan dan keunggulan yang tidak dimiliki oleh katalis homogen, maupun katalis heterogen tanpa sifat magnet. Diantaranya dapat dilihat dari kemudahan pemisahan nanomaterial dari campuran setelah reaksi selesai. Nanomaterial dipisahkan dengan pemberian medan magnet luar. Kekuatan sifat magnet sangat berpengaruh terhadap cepat atau lambatnya pemisahan dari produk reaksi dan hal inilah yang menjadi salah satu patokan suatu reaksi dapat disebut efisien atau kurang efisien.

Nanomaterial magnetik sebagai katalis heterogen sangat beragam variasinya serta mampu mengkatalisis berbagai macam reaksi pula. Banyak diantara nanomaterial magnetik yang telah disintesis kemudian distabilkan menggunakan teknik *coating*. Senyawa-senyawa untuk proses *coating* biasanya yang memiliki pasangan elektron bebas sehingga dapat berinteraksi dengan permukaan nanomaterial, seperti L-DOPA, asam nikotinat, basa Schiff dan senyawa yang mengandung atom N maupun O lainnya. Sintesis nanomaterial potensial untuk dilakukan di Indonesia dengan berbagai macam variasi agen *coating*. Kita tahu bahwa Indonesia merupakan negara biodiversitas yang memiliki banyak kekayaan alam hayati berupa senyawa bahan alam, contohnya golongan alkaloid dan flavonoid yang memiliki atom N dan O dalam molekulnya. Hal ini memungkinkan senyawa-senyawa tersebut untuk digunakan sebagai penstabil sekaligus berpotensi meningkatkan aktivitas katalitik dari nanomaterial itu sendiri.

Ucapan Terima Kasih

Ucapan terima kasih disampaikan kepada Muhammad Faruq Nuruddinsyah (Mahasiswa Magister Ilmu Komputer, Fasilkom Universitas Indonesia) yang mengkonversi draf artikel ke format L^AT_EX. Bayu Ardiansah merangkum berbagai penelitian mengenai penggunaan nanomaterial magnetik khususnya dalam bidang sintesis senyawa organik. Bayu Ardiansah dan Mirzanur Hidayat bertugas menulis artikel ini dengan disupervisi dan dikoreksi oleh Prof. Dr. Ridla Bakri.

Referensi

- [1] K. Thorkelsson, P. Bai dan T. Xu, *Nano Today* **10**, 48 (2015).
- [2] S. Zhang *et al.*, *Chem. Eng. J.* **158**, 599 (2010).
- [3] T.A.P. Rocha-Santos, *Trend. Anal. Chem.* **62**, 28 (2014).
- [4] M. Farré, J. Sanchís dan D. Barceló, *Trend. Anal. Chem.* **30**, 515 (2011).
- [5] B. Khodashenas, R. Zadghaffari dan S.D. Jafari, *Orient. J. Chem.* **31**, 249 (2015).
- [6] A. Sobczak-Kupiec *et al.*, *Nanomedicine: Nanotech. Biol. Medicine* **12** (8), 2459 (2016).
- [7] C.G.C.M. Netto, H. E. Toma dan L. H. Andrade, *J. Mol. Catal. B: Enzym.* **85**, 71 (2013).
- [8] S. Nigam, K.C. Barick dan D. Bahadur, *J. Magnetism Magnetic Mater.* **323**, 237 (2011).
- [9] J. Wang *et al.*, *J. Colloid Interface Sci.* **349**, 293 (2010).
- [10] A.R.J. Azar dan S. Mohebbi, *Mater. Chem. Phys.* **168**, 85 (2015).
- [11] S. Shakoor *et al.*, *J. Magnetism Magnetic Mater.* **362**, 110 (2014).
- [12] J. Deng *et al.*, *Microelectron Eng.* **166**, 31 (2016).
- [13] C-W. Lin *et al.*, *Biosensors and Bioelectronics* **67**, 431 (2015).
- [14] Y-R. Zhang *et al.*, *Chem. Eng. J.* **262**, 313 (2015).
- [15] A. Akbarzadeh, M. Samiei dan S. Daravan, *Nanoscale Res. Lett.* **7**, 1 (2012).
- [16] L.H. Reddy *et al.*, *Chem. Rev.* **112**, 5818 (2012).
- [17] B. Borisova *et al.*, *Sensors and Actuators B: Chem.* **232**, 84 (2016).
- [18] A. Abedini dan A.R. Daud, *J. Radioanal. Nucl. Chem.* DOI 10.1007/s10967-014-3148-4.
- [19] Y-F. Liu *et al.*, *Cryst. Growth Des.* DOI 10.1021/cg400877g.
- [20] I. Sadiq *et al.*, *J. Magnetism Magnetic Mater.* **385**, 236 (2015).

- [21] L. Mardiana *et al.*, AIP Conf. Proc. 1729, ID 020051 (2016).
- [22] N.G. Shabalala, R. Pagadala dan B. Jonnalagadda, Ultrasonics Sonochem. **27**, 423 (2015).
- [23] S. Patil, S.D. Jadhav dan S.K. Shinde, Org. Chem. Int. ID 153159 (2012).
- [24] M. Feyzi dan L. Norouzi, Renewable Energy **94**, 579 (2016).
- [25] B.R. Vahid dan M. Haghghi, Energy Conversion and Management **126**, 362 (2016).
- [26] M. Feyzi, L. Norouzi dan M. Zakarianezhad, Mat. Res. Bull. **60**, 412 (2014).
- [27] H. Ghafuri, E. Esmaili dan M. Talebi, C. R. Chimie. DOI 10.1016/j.crci.2016.05.003.
- [28] A. Banazadeh *et al.*, Inorg. Chim. Acta **429**, 132 (2015).
- [29] E. Rafiee *et al.*, J. Magnetism Magnetic Mater. **408**, 107 (2016).
- [30] U. Kurtan, Md. Amir dan A. Baykal, Chinese J. Catal. **36**, 705 (2015).
- [31] Y. Kie *et al.*, Catal. Commun. **28**, 69 (2012).
- [32] S. Rostamizadeh, H. Estiri dan M. Azad, Catal. Commun. **57**, 29 (2014).
- [33] A.A. Oskouie *et al.*, Catal. Commun. **72**, 6 (2015).
- [34] A. Maleki, Z. Alirezvani dan S. Maleki, Catal. Commun. **69**, 29 (2015).
- [35] J.K. Rajput *et al.*, Ultrasonics Sonochem. DOI 10.1016/j.ultrasonch.2015.01.008.
- [36] A. Maleki, H. Movahed dan P. Ravaghi, Carbo. Polym. **156**, 259 (2016).
- [37] A. Datta *et al.*, Inorg. Chim. Acta **444**, 209 (2016).
- [38] S. Rayati dan P. Abdolalian, C. R. Chimie **16**, 814 (2013).