
**PENGARUH LAJU ALIR LPG (SEBAGAI BAHAN BAKAR BURNER)
TERHADAP KARAKTERISTIK NANOKOMPOSIT $\text{ZnO/Fe}_2\text{O}_3$
YANG DIBUAT MENGGUNAKAN FLAME SPRAY PYROLISIS**

Agus Purwanto*, Arif Jumari, Sperisa Distantina Jurusan
Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Sebelas Maret Jl. Ir.
Sutami no. 36 A, Surakarta 57126 Telp/fax: 0271-632112

*Email: aguspur@yahoo.com

Abstract: Biodiesel is produced through catalytic esterification process of vegetable oil and alcohol. Producing of biodiesel was much carried out using homogeneous catalyst (acid/base). These process had many disadvantages: high energy consumption, side product formed and complicated separation among side product and catalyst. ZnO as transesterification catalyst has given high yield. To improve the catalytic performance, surface area per mas of catalyst must be increased by decreasing size of particle. To ease separation between product and catalyst, magnetic behaviour should be added to the catalyst. Aims of research were to obtain nanocomposite $\text{ZnO/Fe}_2\text{O}_3$ and determine physical characteristic as well as catalytic and separation performance of nanocomposite $\text{ZnO/Fe}_2\text{O}_3$. Nanocomposite $\text{ZnO/Fe}_2\text{O}_3$ was synthesized by flame spray pyrolysis method. Assisted by carrier air precursor solution of $\text{Zn(NO}_3)_2$ and $\text{Fe(NO}_3)_3$ was nebulized and flowed to inner tube of burner. Nebulisation was carried out by varying carrier gas flow rate but at constant rate of nebulization. LPG gas dan oxidant air were flowed to the inner annulus and outer annulus, respectively. The solid produced was separated from gas by particle filter. Solid particle obtained was then examined by X Ray Defraction (XRD), FE-SEM and BET as wel as catalytic performance. The result of the research showed that crystallinity of particles increased by increasing LPG flow rate. Particle size of $\text{ZnO/Fe}_2\text{O}_3$ nanocomposite decreased by increasing LPG flow rate and size were dominantly between 50-100 nm. A part of particle was flowerlike particle. Specific surface area of $\text{ZnO/Fe}_2\text{O}_3$ nanocomposite increased by increasing LPG flow rate and its value were between 45-55 m^2/gram .

Keywords: Tran-esterification, nanocomposite $\text{ZnO/Fe}_2\text{O}_3$, flame spray pyrolysis, carrier gas, particle size, morphology of particle, specific surface area

PENDAHULUAN

Biodiesel sangat potensial dikembangkan dalam rangka pengembangan bahan bakar alternatif. Biodiesel sebagai salah satu energi alternatif memiliki tingkat urgensi kemanfaatan yang tinggi karena bisa digunakan secara langsung untuk mengganti minyak petrosolar pada mesin diesel. Saat ini pembuatan biodiesel dilakukan menggunakan katalis homogen (asam/basa). Proses ini mempunyai banyak kekurangan diantaranya penggunaan energi yang cukup tinggi, terbentuknya produk samping berupa sabun, rumitnya pemisahan produk samping dan katalis dengan biodiesel yang dihasilkan serta adanya limbah alkalin yang memerlukan pemrosesan lanjutan.

Untuk mengatasi masalah diatas, akhir-akhir ini telah dikembangkan banyak katalis yang bisa digunakan untuk menggantikan katalis basa tersebut. Penelitian untuk memperoleh katalis yang lebih baik (katalis

hetrogen atau katalis padat) untuk reaksi transesterifikasi telah banyak dilakukan diantaranya menggunakan katalis ZnO yang memberikan produk biodiesel dengan *yield* dan kemurnian yang tinggi.

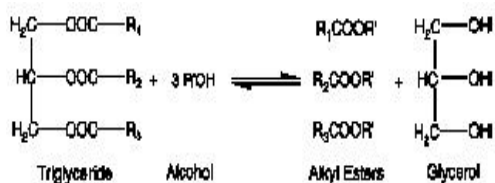
Efektifitas katalis semakin baik bila luas permukaan per satuan masa katalis besar. Memperbesar luas permukaan persatuan masa katalis dapat dilakukan dengan memperkecil ukuran padatan katalis misalnya dengan membuat padatan katalis berukuran nano partikel. Untuk mempermudah pemisahan katalis dengan produk biodiesel pada katalis perlu ditambahkan senyawa yang bersifat magnet sehingga dapat dipisahkan dengan magnet.

Pada penelitian sebelumnya telah berhasil membuat perak nano partikel dari limbah fotografi. Dengan pengalaman tersebut, pada penelitian ini dibuat katalis nanokomposit dengan teknik yang sama dengan penelitian

sebelumnya. Katalis nanokomposit tersebut diharapkan dapat menggantikan peran katalis homogen dan dapat menghasilkan biodiesel dengan kualitas yang lebih baik. Katalis heterogen nano komposit tersebut adalah ZnO/Fe₂O₃ nano komposit.

Tujuan penelitian ini adalah untuk memperoleh katalis heterogen nanokomposit ZnO/Fe₂O₃ untuk reaksi trans-esterifikasi untuk menghasilkan biodiesel yang berkualitas tinggi. Selain itu penelitian ini juga untuk mengetahui pengaruh variabel proses pembuatan katalis terhadap sifat fisik dan sifat katalitik nanokomposit ZnO/Fe₂O₃ yang diperoleh.

Biodiesel sebagai salah satu energi alternatif memiliki tingkat urgensi kemanfaatan yang tinggi karena bisa digunakan secara langsung untuk mengganti minyak petrosolar pada mesin diesel. Biodiesel diproduksi dengan reaksi trans-esterifikasi antara minyak tumbuhan atau lemak binatang dan alkohol dengan bantuan katalis. Katalis yang sering digunakan adalah katalis asam atau basa. Untuk katalis homogen basa yang umum digunakan adalah NaOH atau KOH karena relatif murah dan juga sangat aktif. Adapun reaksi pembuatannya adalah sebagai berikut (J. Jitputti et. al., 2006):



Penggunaan katalis basa dapat menyebabkan terbentuknya air yang menyebabkan terjadinya reaksi hidrolisis ester menjadi sabun. Reaksi penyabunan tersebut adalah sebagai berikut (J. Jitputti et. al., 2006):



Selain itu, penggunaan katalis basa/asam membutuhkan energi yang tinggi, pemisahan glycerin yang sulit, pemisahan katalis dari produk yang rumit serta adanya limbah cair alkalin (Pinto et. al., 2005).

Untuk mengatasi masalah diatas, akhir-akhir ini telah dikembangkan banyak katalis heterogen yang bisa menggantikan katalis basa tersebut. Pada pada penelitian ini dibuat salah satu katalis heterogen (padat) berbasis ZnO/Fe₂O₃ nanokomposit sebagai pengganti

katalis basa. Katalis heterogen, adalah katalis yang mempunyai fase yang berbeda dengan fase reaktannya. Katalis padat yang telah diteliti dan dilaporkan digunakan dalam reaksi transesterifikasi adalah antara lain polimer yang mengandung guanidine, enzim, oxide, alumina, garam asam amino, CaCO₃, clays (lempung) dan Zeolite (Pinto et. al., 2005). Aktivitas polimer yang mengandung guanidine digunakan untuk mereaksikan methanol dengan minyak pada perbandingan 3:1. Hasil yang dilaporkan adalah bahwa penggunaan 5 mol % katalis heterogen hampir seaktif 3 mol% dari katalis homogenya. Selain itu penggunaan guanidine yang terikat pada polystyrene memberikan yield diatas 90 % kurang dari 15 menit. Garam tak larut asam amino juga bisa dipakai sebagai katalis heterogen. misalnya asam amino yang mengandung tembaga, seng, cadmium, nikel, lanthanum, cobalt, calcium, magnesium dan besi. Kalsium karbonat juga bisa digunakan sebagai katalis. Konversi diatas 95% tercapai pada temperatur 260°C dengan reaktor alir dengan waktu tinggal 18 menit. Aktivitas katalis ini tidak menurun untuk pemakaian selama satuminggu. (Pinto et. al., 2005)

Katalis padat berbasis material oksida untuk reaksi transesterifikasi juga sudah banyak diteliti dan dipublikasikan. Material oksida antara lain ZrO₂-SiO₂, KOH/ZrO₂-SiO₂, Co₂O₃-SiO₂, MoO₅-SiO₂, Na₂O-SiO₂, La₂O₃ (10%)-MCM-41, MgO(10%)-MCM-41, BaO (10%)-MCM-41, CaO dan MgO. Dari katalis tersebut, yang mempunyai aktivitas baik adalah La₂O₃(10%)-MCM-41, Na₂O-SiO₂ dan CaO dengan koversi berturut-turut sebesar 81%, 76% dan 67%. (Pinto et.al, 2005)

Material katalis padat yang lain adalah tungstated zirconia-alumina (WZA) dan sulphated zirconia-alumina (SZA) sebagai katalis asam. Setelah 20 jam reaksi, tingkat konversi dengan menggunakan WZA mencapai 90% untuk temperatur reaksi diatas 250°C (Pinto et. al., 2005, D.E. Lopez et. al., 2007). Sedangkan ZnO sebagai material oksida tunggal, menunjukkan potensi yang besar untuk digunakan sebagai katalis padat seperti dilaporkan J. Jitputti et.al. (2006),. Walaupun mempunyai yield yang lebih rendah bila dibandingkan dengan SO₄²⁻/ZrO₂ dan SO₄²⁻/SnO₂ dengan yield sebesar 86.1%, tetapi biodiesel yang diproduksi dengan katalis ZnO mempunyai kandungan methyl ester yang tinggi sebesar 98.9%. Ini menunjukkan bahwa katalis ZnO menghasilkan produk biodiesel dengan tingkat kemurnian yang sangat tinggi. Hal inilah

yang mendasari dipilihnya katalis berbasis ZnO dalam penelitian ini.

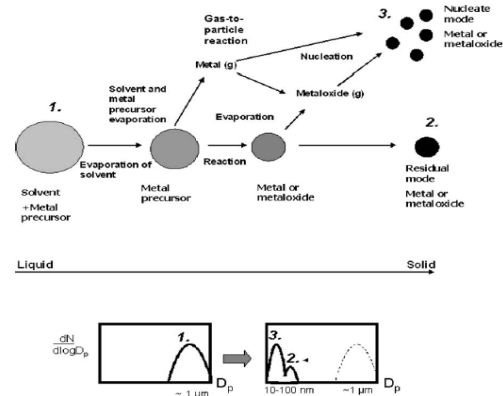
Sintesa ZnO nanopartikel

Untuk meningkatkan aktivitas katalitik material ZnO yang dilaporkan sebesar 86.1% pada temperatur reaksi 200°C selama 4 jam, maka ZnO perlu di optimasi untuk meningkatkan yield-nya. Secara teoritis, kemampuan katalitik suatu katalis akan bertambah seiring dengan bertambahnya luas permukaan material katalitik tersebut. Salah satu cara rekayasa untuk meningkatkan luas permukaan partikel adalah dengan memperkecil ukurannya hingga ke ukuran nano (10^{-9} m). Sebagai gambaran bila ZnO partikel berukuran 1 mikron (10^{-6} m), maka partikel ini akan mempunyai luas permukaan sebesar $1.0695 \text{ m}^2/\text{g}$. Tetapi bila ukurannya diperkecil sampai 10 nm (10^{-8} m), maka luas permukaannya akan menjadi 100 kalinya yaitu sebesar $106.95 \text{ m}^2/\text{g}$. Dengan penambahan luas permukaan secara teoritis akan meningkatkan yield reaksi transesterifikasi biodiesel.

Pembuatan nano partikel dapat dilakukan dengan metode flame spray pyrolysis dengan reaktor flame. Pembuatan nanopartikel dengan reaktor flame telah diteliti untuk memproduksi berbagai jenis nanopartikel baik material tunggal maupun komposit. Material tunggal yang telah diproduksi dengan reaktor ini adalah SiO_2 (Jang et. al, 2001), TiO_2 (Bickmore et. al, 1998), SnO_2 , Al_2O_3 (Kammler et. al., 2001), $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ (Varatharajan et. al, 2003), $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ (Grimm et. al., 1997), Tin Dioxide (Sahm et. al, 2004), ZnO (Tani et. al, 2002), ZrO_2 , Bi_2O_3 (Madler et. al, 2002) and $\alpha\text{-Willemite}$ (Tani et. al., 2002). Sedang material komposit yang telah diteliti dan diproduksi dengan reaktor flame adalah *Silica-embedded iron oxide* (Janzen et. al., 2003), *Fe-catalyzed single walls carbon nanotube* (Vander Wal, 2002), *Ni-Catalyzed nanofibers* (Vander Wal, 2002), $\text{Pd/Al}_2\text{O}_3$ (Strobel et. al., 2004), dll. Material non-oksidasi dapat pula di sintesis dengan reaktor flame antara lain aluminium nitride (Takao et. al, 2001), elemental titanium dan titanium diboride (Dufaux et. al., 1995). Material fosfor juga telah dirintis di produksi dengan menggunakan reaktor ini. Kang et.al. (2002) memproduksi partikel strontium titanate dan $\text{Y}_2\text{O}_3\text{:Eu}$.

Mekanisme pembuatan nanopartikel dari *liquid droplet* menjadi partikel padat dapat dijelaskan seperti pada Gambar 1 dibawah ini. Mula-mula *solvent* dalam *droplet* akan terevaporasi total atau sebagian dalam *flame*. Reaksi *precursor* dalam *droplet* akan

menghasilkan metal atau metal oksida. Reaksi dan nukleasi lanjutan pada komponen terevaporasi menghasilkan produk partikel dengan skala nano (10^{-9} m). Dari skema tersebut, *flame spray pyrolysis* dapat digunakan untuk menghasilkan nanopartikel, atau partikel berukuran submicron.



Gambar 1. Bagan pembentukan partikel dari *liquid droplet* pada metode *flame spray pyrolysis* (J.M. Makela et. al., 2004)

Berikut dalam Tabel 1 adalah tinjauan paten yang berkaitan dengan pembuatan biodiesel dengan menggunakan katalis padat serta jenis katalisnya. Dari penelusuran literatur dan paten di atas dapat di ketahui bahwa pembuatan nanokomposit $\text{ZnO/Fe}_2\text{O}_3$ sebagai katalis pembuatan biodiesel adalah ide baru yang mempunyai potensi paten yang tinggi.

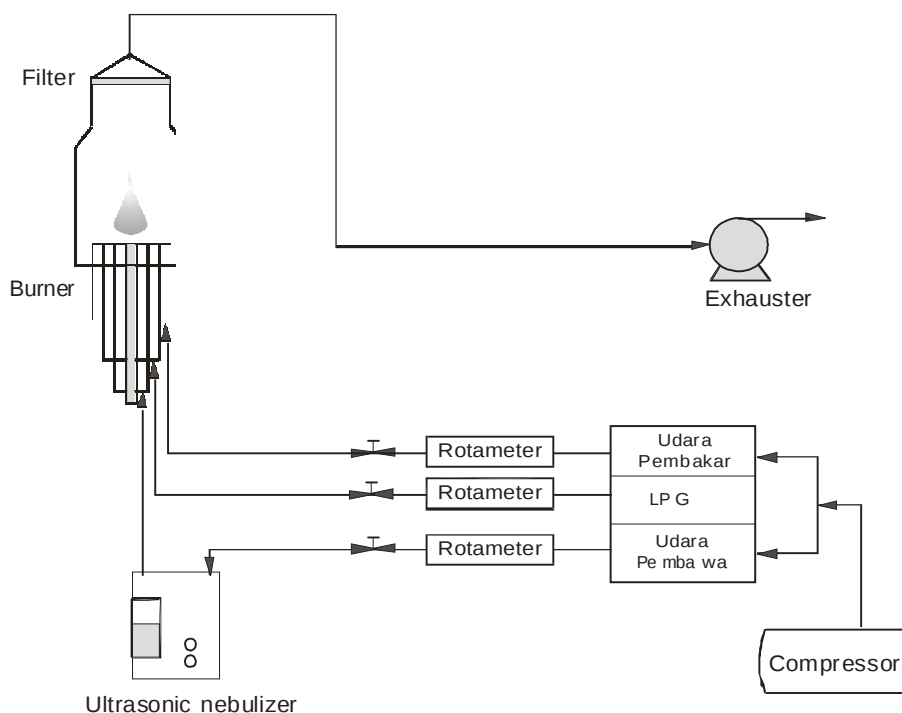
Tabel 1. Daftar katalis padat yang telah dipatenkan pada pemrosesan biodiesel

Paten	Tahun	Penemu	Katalis padat
US Patent No. 5908946	1999	Stern et. al.	ZnAl_2O_4 $x \text{ ZnO } y \text{ Al}_2\text{O}_3$ ($x+y=0-2$)
US Patent No. 6818026	2004	Tateno et. al.	Ni-Metal Oksida Pada kondisi superkritis
WO 2005/0639 54 A1	2005	Gupta et. al.	Tin Oxide
US Patent No. 6878837	2005	Bournay et. al.	Zinc Aluminate
WO 2006/0509 251 A1	2006	Siano et. al.	MgO Komposit MgO/Al

METODE PENELITIAN

Pembuatan nanokomposit $\text{ZnO}/\text{Fe}_2\text{O}_3$ dilakukan dengan metode *flame spray pyrolysis*. Bagan peralatan ditunjukkan seperti Gambar 2. Larutan $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2$ dan $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3$ sebagai *precursor* dimasukkan dalam wadah pada *ultrasonic* (Omron NE-U17). LPG dan udara pembakar dialirkan kedalam anulus dalam dan anulus luar dari *burner* dan kemudian *flame* reaktor dihidupkan. Setelah api stabil pada kondisi operasi yang diinginkan, *carrier gas* dialirkan ke *nebulizer* yang sudah dihidupkan terlebih dahulu.

Larutan *precursor* yang ternebulasi menjadi *droplet* dialirkan ke *flame* melalui *tube* pada *burner*. Kecepatan nebulasi konstan 3 l/menit. Gas hasil pembakaran dan partikel yang terbentuk pada *flame* dialirkan melalui penyaring partikel (Glass filter Whatmann G/F) dengan cara menghisapnya menggunakan *exhaust fan* (7.7 m³/min, pressure 33 mmHg). Partikel yang tersaring oleh filter untuk kemudian di ambil dan di karakterisasi. Karakterisasi partikel meliputi uji sifat maget, XRD, FE-SEM, BET dan uji katalitik.



Gambar 2. Diagram skematik peralatan flame spray pyrolysis

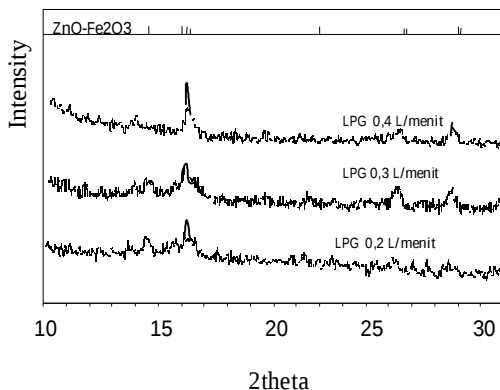
HASIL DAN PEMBAHASAN

Pembuatan *nanokomposite* $\text{ZnO}/\text{Fe}_2\text{O}_3$ dengan metode *flame spray pyrolysis*. Peralatan utamanya adalah *nebulizer* dan *flame burner*. Karakteristik nanokomposit $\text{ZnO}/\text{Fe}_2\text{O}_3$ yang dibuat dengan *flame spray pyrolysis* dipengaruhi oleh beberapa faktor antara lain komposisi *precursor* $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2\text{-Fe}_2(\text{NO}_3)_3$, laju alir gas pembawa, laju alir LPG. Pada penelitian ini variabel yang ditinjau adalah laju alir LPG. Karakterisasi yang sudah dilakukan adalah sifat magnet partikel, XRD untuk uji kristalinitas, FE-SEM untuk uji ukuran dan morfologi partikel dan BET untuk uji luas

permukaan spesifik partikel. Uji katalitik akan dilakukan pada penelitian berikutnya.

Pada penelitian ini diperoleh partikel padatan berwarna perak agak kemerahmerahan. Warna tersebut merupakan warna gabungan dari warna ZnO dan warna Fe_2O_3 . Dari pengujian sifat magnet diperoleh bahwa semua partikel padat yang diperoleh terikat oleh magnet. Sifat magnet inilah yang memang ingin ditambahkan ke dalam katalis padat tersebut. Sifat magnet ini dimaksudkan untuk mempermudah pemisahan antara katalis dengan produk biodiesel yang akan dibuat dengan katalis nanokomposit tersebut.

Pada pengujian kristalinitas partikel yang dilakukan menggunakan X-Ray Diffraction (XRD) diperoleh hasil yang disajikan pada Gambar 3. Pengujian XRD menunjukkan kristalinitas nano komposit $\text{ZnO}/\text{Fe}_2\text{O}_3$ meningkat dengan meningkatnya laju alir LPG. Semakin besar laju alir LPG semakin tinggi puncak-puncak kurva XRD. Peningkatan kristalinitas partikel dengan meningkatnya laju alir LPG disebabkan oleh peningkatan temperatur nyala pada burner. Semakin besar laju alir LPG semakin besar energi pembakaran sehingga menaikkan temperatur nyala.



Gambar 3. Kristalinitas partikel sebagai fungsi laju alir LPG

Hasil pengujian FE-SEM ditampilkan pada Gambar 4. Dari pengujian SEM diketahui ukuran partikel nanokomposit $\text{ZnO}/\text{Fe}_2\text{O}_3$ memiliki ukuran partikel yang tidak seragam, namun sebagian besar berukuran antara 50-100 nm, dan hanya sebagian kecil yang berukuran di atas 100 nm. Hal ini karena semakin besar laju alir LPG energi yang dihasilkan oleh pembakaran semakin besar sehingga temperatur nyala yang semakin besar. Temperatur yang semakin besar menyebabkan proses evaporasi droplet dan reaksi kimia berlangsung secara lebih baik. Dengan demikian partikel padatan yang dihasilkan melalui proses evaporasi dan reaksi kimia lebih kecil. Namun demikian variasi laju alir LPG yang bisa dilakukan terbatas sehingga penurunan ukuran partikel yang terjadi juga terbatas.

Dari pengujian SEM juga dapat diketahui sebagian besar partikel morfologi partikel menyerupai bunga (*flowerlike particle*) pada hampir semua sampel pengujian. Hal ini menarik bahwa pada laju alir LPG 0,2 dan 0,3 L/menit dihasilkan *flowerlike particle* untuk berbagai laju alir gas pembawa. Diperolehnya

flowerlike particle menjadikan penelitian ini dapat dikembangkan lagi di masa yang akan datang, khususnya penelitian untuk menentukan faktor-faktor apa saja yang berpengaruh terhadap pembentukan (*flowerlike particle*). Pengujian luas permukaan spesifik partikel dilakukan menggunakan BET dan hasilnya disajikan pada Tabel 2.

Tabel 3. Luas permukaan spesifik sebagai fungsi laju alir LPG

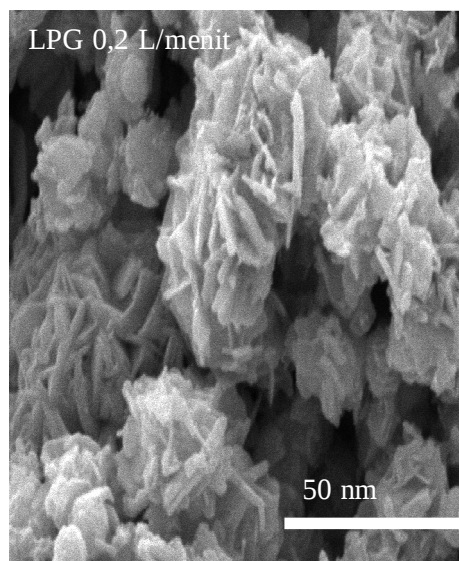
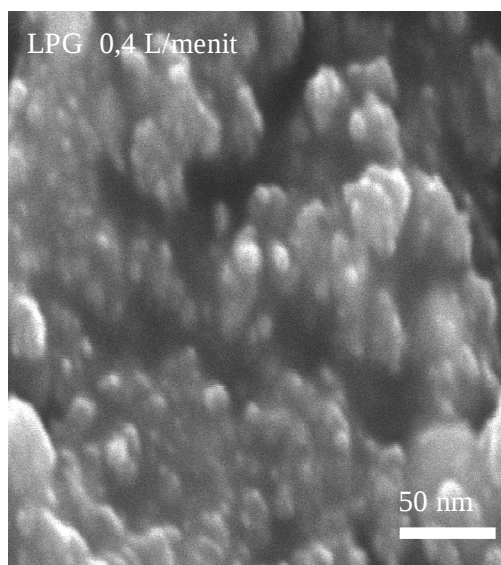
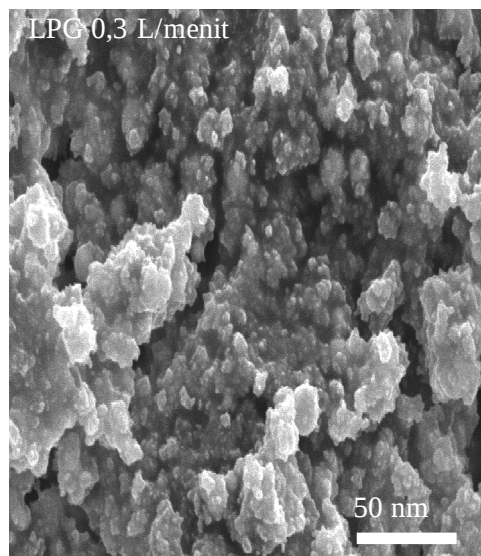
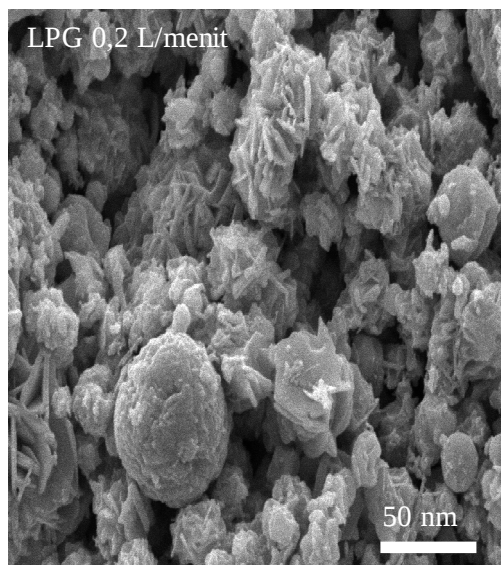
No.	Laju alir gas pembawa (L/menit)	Luas permukaan spesifik (m^2/gram)	Konversi ke ukuran partikel* (nm)
1	0.2	45.7	23.38
2	0.3	50.4	21.32
3	0.4	53.6	19.95
4	0.5	54.1	19.78

* Dengan asumsi partikel adalah pejal tidak berpori dan tidak teraglomerasi

Dari Tabel 2 tampak bahwa semakin besar laju alir gas LPG, semakin besar luas permukaan spesifik nano komposit $\text{ZnO}/\text{Fe}_2\text{O}_3$. Hal ini karena temperatur nyala semakin tinggi, ukuran partikel semakin kecil sehingga semakin besar luas permukaan spesifik partikel. Apabila luas permukaan spesifik dikonversi menjadi ukuran partikel diperoleh ukuran partikel antara 20-25 nm, yang berarti lebih kecil dari hasil pengujian SEM. Hal ini menunjukkan bahwa partikel teraglomerasi menjadi partikel yang lebih besar.

KESIMPULAN

Dari hasil penelitian diperoleh kesimpulan bahwa partikel yang diperoleh adalah nanokomposit $\text{ZnO}/\text{Fe}_2\text{O}_3$ dengan karakteristik sesuai yang diinginkan, yaitu bersifat tertarik oleh magnet, berukuran nano dan memiliki luas permukaan spesifik yang besar. Pengaruh laju alir pembawa adalah semakin besar laju alir LPG: kristalinitas nanokomposit $\text{ZnO}/\text{Fe}_2\text{O}_3$ meningkat, ukuran partikel nano komposit $\text{ZnO}/\text{Fe}_2\text{O}_3$ semakin kecil dengan ukuran partikel berkisar antara 50-100 nm, luas permukaan spesifik partikel nano komposit $\text{ZnO}/\text{Fe}_2\text{O}_3$ meningkat dan nilainya berkisar antara 45-55 m^2/gram . Kondisi terbaik adalah laju alir gas pembawa 1 L/menit. Selain itu juga diperoleh partikel nanokomposit $\text{ZnO}/\text{Fe}_2\text{O}_3$ dengan morfologi yang istimewa, yaitu *flowerlike partikel*, yang memiliki beberapa keistimewaan dibanding partikel dengan morfologi yang sederhana.



Gambar 4. Ukuran dan Morfologi nanokomposit $\text{ZnO/Fe}_2\text{O}_3$ sebagai fungsi laju alir LPG

UCAPAN TERIMA KASIH

Penelitian ini dibiayai oleh Direktorat Jenderal Pendidikan Tinggi Departemen Pendidikan Nasional melalui dana Penelitian Hibah Bersaing tahun 2010, untuk itu pada kesempatan ini penulis ingin mengucapkan banyak terima kasih. Terima kasih juga disampaikan kepada asisten dan mahasiswa serta laboran yang membantu pelaksanaan penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

Angelo C. Pinto, Lilian L.N. Guarieiro, Michele J.C. Rezende, Nubia M. Ribeiro, Ednildo A. Torres, Wilson A. Lopes, Pedro A. de

P. Pereira and Jailson B. de Andrade, 2005, "Biodiesel: An Overview", Journal of Brazilian Chemical Society 16, 6B, pp. 1313-1330

Christian Janzen, Jorg Knipping, Bernd Rellinghaus and Paul Roth, 2003, "Formation of silica-embedded iron-oxide nanoparticles in low-pressure flames", Journal of Nanoparticle Research 5, pp. 589-596

Clint R. Bickmore, Kurt F. Waldner, Rita Baranwal, Tom Hinklin, David R. Treadwell, Richard M. Laine, 1998, "Ultrafine Titania by Flame Spray Pyrolysis of a Titanatane Complex",

- Journal of European Ceramic Society 18, pp 287-297
- D. P. Dufaux and R. L. Axelbaum, 1995, "Nanoscale Unagglomerated Nonoxide Particles from a Sodium Coflow Flame", *Combustion and Flame* 100, pp. 350-358
- Dora E. Lopez, Kaewta Suwannakarn, David A. Bruce, James G. Goodwin Jr.m 2007, "Esterification and transesterification on tungstated zirconia: Effect of calcination temperature", *Journal of Catalysis* 247, pp. 43-50
- Hee Dong Jang, 2001, "Experimental study of synthesis of silica nanoparticles by a bench-scale diffusion flame reactor", *Powder Technology* 119, pp. 102-108
- Hendrik K Kammler, Lutz Madler and Sotiris E. Pratsinis, 2001, "Flame Synthesis of Nanoparticles", *Chemical Engineering Technology* vol. 24 no 6, pp 583-596
- J.M. Makela, H. Keskinen, T. Forsblom, J. Keskinen, 2004, "Generation of metal and metal oxide nanoparticles by liquid flame spray pyrolysis", *Journal of Material Science* 29, pp 2783-2788
- Jaturong Jitputti, Boonyarach Kitiyanan, Pramoch Rangsunvigit, Kunchana Bunyakiat, Lalita Attanatho, Peesamai Jenvanitpanjakul, 2006, "Transesterification of crude palm kernel oil and crude coconut oil by different solid catalysts", *Chemical Engineering Journal* 116, pp. 61-66
- Jon Van Gerpen, 2005, "Biodiesel processing and production", *Fuel Processing Technology* 86, pp. 1097-1107
- L. Madler, K.H. Kamler, R Mueller and S.E Pratsinis, 2002, "Controlled synthesis of nanostructured particles by flame spray pyrolysis", *Aerosol Science* 33, pp 369-389
- Pd/Al₂O₃ catalysts and their behavior in enantioselective hydrogenation", *Journal of Catalysis* 222, pp. 307-314
- S. Grimm, M. Schultz, S. Barth, 1997, "Flame pyrolysis-a preparation route for Ultrafine pure γ -Fe₂O₃ powders and the Control of Their Particle Size and Properties", *Journal of Material Science* 32, pp 1083-1092
- T. Sahn, L. Madler, A. Gurlo, N. Barsan, S. E. Pratsinis, U. Weimar, 2004, "Flame Spray Synthesis of Tin Dioxide Nanoparticles for Gas Sensing", *Sensor and Actuators B* 98, pp 148-153
- Takao Tani, Lutz Madler and Sotiris E. Pratsinis, 2002, "Homogeneous ZnO nanoparticles by flame spray pyrolysis", *Journal of Nanoparticle Research* 4, pp. 337-343
- Takao Tani, Lutz Madler, Sotiris E. Pratsinis, 2002, Synthesis of -Willemite Nanoparticles by Post-calcination of Flame-made Zinc Oxide/Silica Composites", *Part. Part. Syst. Charact.* 19, pp. 354-358
- Wenlei Xei, Hong Peng, Ligong Chen," Transesterification of soybean oil catalyzed by potassium loaded on alumina as a solid-base catalyst", *Applied Catalysis A: General* 300, pp. 67-74
- Y.C. Kang, D.J. Seo, S.B. Park and H.B. Park, 2002, "Direct synthesis of Strontium Titanate Phosphor particles with high luminescence by flame spray pyrolysis", *Material Research Bulletin* 37, pp 263-269
- Yasumasa Takao and Mitsuo Sando, 2001, "Flame synthesis of Aluminum Nitride Filler-Powder", *Journal of Chemical Engineering of Japan* 34, 6, pp 828-833.
- Reto Strobel, Frank Krumeich, Wendelin J. Stark, Sotiris E. Pratsinis and Alfons Baiker, 2004, "Flame spray synthesis of