
KARAKTERISTIK FISIK NANOKOMPOSIT ZnO/Fe₂O₃ YANG DIBUAT MENGGUNAKAN FLAME SPRAY PYROLYSIS DENGAN VARIASI LAJU ALIR GAS PEMBAWA

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

*Email: arifjumari@yahoo.com

Abstract: Biodiesel is a very potential alternative energy resources. Producing of Biodiesel was much carried out using homogeneous catalytic esterification of vegetable oil and alcohol. These proces had many disadvantages. ZnO as a transesterification catalyst has given high yield. To improve the catalytic performance, the surface area per mas of catalyst must be increased by decreasing the size of particle. To ease the separation between product and catalyst, the magnetic behaviour should be added to the catalyst. The aim of the research were to obtain nanocomposite ZnO/Fe₂O₃ and determine physical characteristic as well as catalytic and separation performance. Nanocomposite ZnO/Fe₂O₃ was synthesized by flame spray pyrolysis method. Assisted by carrier air precursor solution of Zn(NO₃)₂ and Fe(NO₃)₃ was nebulized and flowed to the inner tube of the 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. The solid particle was then examined by XRD, FE-SEM and BET as well as catalytic performance. The result showed that the crystallinity of samples decreased by increasing the carrier gas flow rate. The particle size was not influenced by carrier gas flow rate and the size were dominantly between 50-100 nm. A part of particle was flowerlike particle. The specific surface area of particle was not influenced by carrier gas flow rate and its value was 50.5 m²/gram.

Keywords : Tran-esterification, nanocomposite ZnO/Fe₂O₃, flame spray pyrolysis, carrier gas, particle size, particle morphology, 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. 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 sulit dipisahkan.

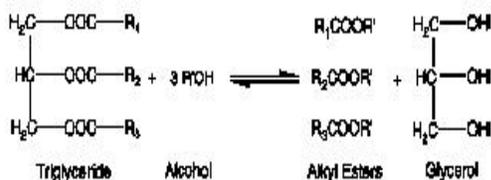
Untuk mengatasi masalah diatas, akhir-akhir ini telah dikembangkan banyak katalis yang bisa digunakan untuk menggantikan katalis basa tersebut. Penelitian untuk memperoleh katalis yang lebih baik (katalis heterogen atau katalis padat) untuk reaksi trans-esterifikasi telah banyak dilakukan diantaranya 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, senyawa yang bersifat magnet perlu ditambahkan pada katalis

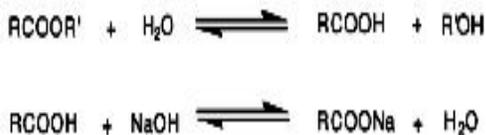
Tujuan penelitian ini adalah untuk memperoleh katalis heterogen nanokomposit ZnO/Fe₂O₃ untuk reaksi trans-esterifikasi untuk menghasilkan biodiesel yang berkualitas tinggi. Selain itu penelitian ini juga untuk mengetahui pengaruh variabel proses pembuatan katalis terhadap sifat fisik dan sifat katalitik 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 (Jitputti et. al., 2006):



Gambar 1. Reaksi transesterifikasi triglycerida dengan alkohol

Penggunaan katalis basa menyebabkan terbentuknya air yang menyebabkan reaksi hidrolisis ester menjadi sabun seperti berikut (Jitputti et. al., 2006).



Gambar 2. Reaksi penyabunan antara asam lemak alkil ester dengan air dan NaOH

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/padat yang telah diteliti dan dilaporkan digunakan dalam reaksi transesterifikasi 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 tidak menurun untuk pemakaian selama seminggu. (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

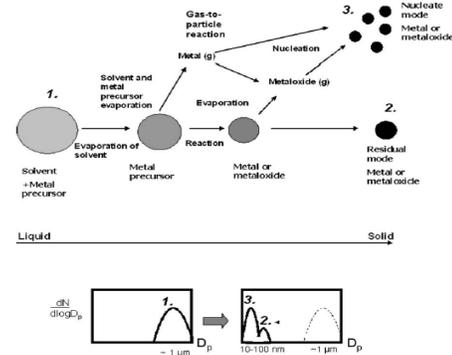
Untuk meningkatkan aktivitas katalitik material ZnO yang dilaporkan sebesar 86,1% pada temperatur reaksi 200°C selama 4 jam, maka ZnO perlu di optimasi untuk meningkatkan yield-nya. Secara teoritis, kemampuan katalitik suatu katalis akan bertambah seiring dengan bertambahnya luas permukaan material katalitik

tersebut. Salah satu cara rekayasa untuk meningkatkan luas permukaan partikel adalah dengan memperkecil ukurannya hingga dengan 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-oksida 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 fospor 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 3. 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.

Berikut dalam Tabel 1 adalah tinjauan paten yang berkaitan dengan pembuatan biodiesel dengan menggunakan katalis padat serta jenis katalisnya



Gambar 3. Bagan pembentukan partikel dari *liquid droplet* pada metode *flame spray pyrolysis* (J.M. Makela et. al., 2004)

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

Patent	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 $\text{ZnO/Fe}_2\text{O}_3$ dilakukan dengan metode *flame spray pyrolysis*. Bagan peralatan ditunjukkan seperti Gambar 4. 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* fan ($7,7 \text{ m}^3/\text{min}$, pressure 33 mmHg). Partikel yang diperoleh diambil dan

dikarakterisasi. Karakterisasi partikel meliputi uji sifat magnet, XRD, FE-SEM, BET dan uji katalitik.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pembuatan *nanokomposit* ZnO/Fe₂O₃ dilakukan dengan metode *flame spray pyrolysis*. Peralatan utamanya adalah *nebulizer* dan *flame burner*. Karakteristik nanokomposit ZnO/Fe₂O₃ yang dibuat dengan *flame spray pyrolysis* dipengaruhi oleh beberapa faktor antara lain komposisi precursor Zn(NO₃)₂-Fe₂(NO₃)₃, laju alir gas pembawa dan laju alir LPG.

Pada penelitian ini variabel yang ditinjau adalah laju alir gas pembawa. 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 kemerah-merahan. Warna tersebut merupakan warna gabungan dari warna ZnO dan warna Fe₂O₃.

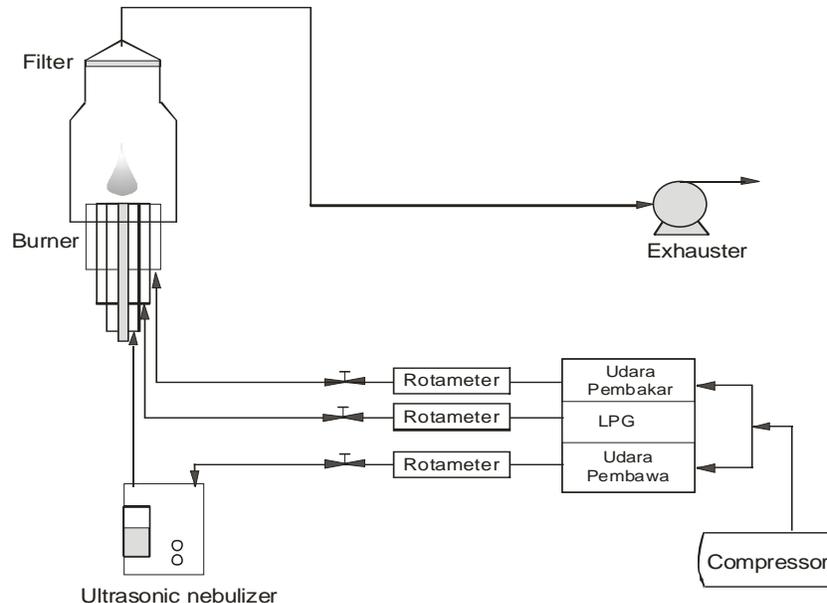
Dari pengujian sifat magnet diperoleh bahwa semua partikel padat yang diperoleh terikat oleh magnet. Sifat magnet inilah yang

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.

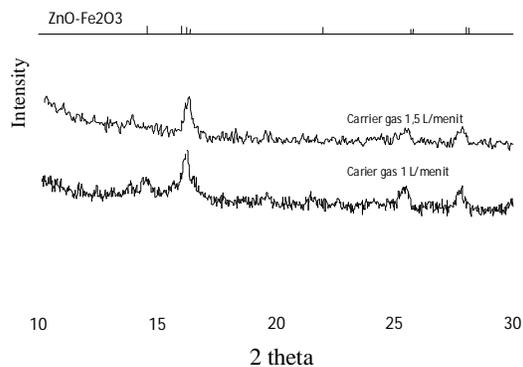
Pada pengujian kristalinitas partikel yang dilakukan menggunakan X-Ray Diffraction (XRD) diperoleh hasil yang disajikan pada Gambar 5. Pengujian XRD menunjukkan kristalinitas nano komposit ZnO/Fe₂O₃ turun dengan kenaikan laju alir gas pembawa. Semakin besar laju alir gas pembawa semakin rendah puncak-puncak kurva XRD.

Penurunan kristalinitas dengan meningkatnya laju alir gas pembawa ini disebabkan oleh penurunan temperatur nyala pada burner. Semakin besar laju alir gas pembawa semakin besar kapasitas panas gas hasil pembakaran.

Hasil pengujian FE-SEM ditampilkan pada Gambar 6. Dari pengujian SEM diketahui ukuran partikel nanokomposit ZnO/Fe₂O₃ memiliki ukuran partikel yang tidak seragam, namun sebagian besar berukuran antara 50- 100 nm, dan hanya sebagian kecil yang berukuran di atas 100 nm



Gambar 4. Diagram skematik peralatan *flame spray pyrolysis*



Gambar 5. Kristalinitas partikel sebagai fungsi laju alir gas pembawa

Dari pengujian SEM juga diketahui bahwa ukuran partikel nanokomposit ZnO/ Fe₂O₃ tidak dipengaruhi oleh laju alir gas pembawa. Dari aspek ukuran droplet, semakin besar laju alir gas pembawa semakin kecil ukuran droplet yang memperkecil ukuran partikel. Sebaliknya, semakin besar laju alir gas Dengan kedua faktor tersebut menyebabkan pengaruh terhadap partikel menjadi tidak ada. Secara dominan ukuran partikel berkisar antara 50-100 nm, namun ada sebagian kecil berukuran lebih dari 100 nm. Hal ini dapat disebabkan oleh terjadinya aglomerasi pada partikel dan dapat pula disebabkan oleh preparasi pengujian FE-SEM kurang baik/ terlalu tebal, sehingga partikel tampak lebih besar.

Dari pengujian SEM juga dapat diketahui sebagian besar partikel memiliki morfologi menyerupai bunga (*flowerlike particle*). 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 yang berpengaruh terhadap pembentukan (*flowerlike particle*).

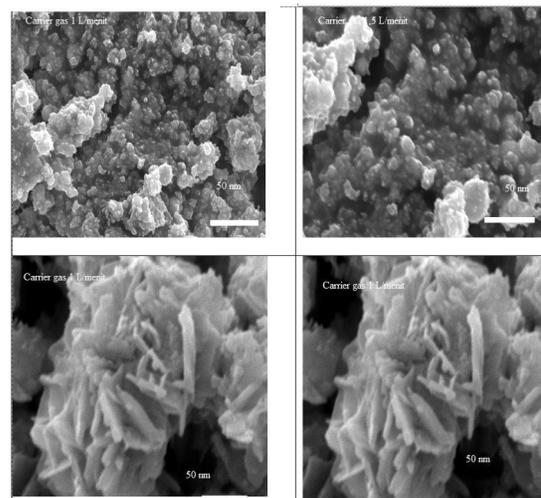
Pengujian luas permukaan spesifik partikel dilakukan menggunakan BET dan hasilnya disajikan pada Tabel 2. Dari Tabel 2, laju alir gas pembawa tidak berpengaruh terhadap luas permukaan persatuan spesifik nano komposit ZnO/Fe₂O₃. Hal ini karena ukuran partikel tidak dipengaruhi oleh laju alir gas pembawa. Namun demikian dari hasil pengujian ukuran partikel menggunakan SEM dan hasil konversi dari pengujian BET menunjukkan hasil yang berbeda. Hasil konversi dari pengujian BET lebih kecil dari hasil pengujian SEM. Hal ini menunjukkan adanya aglomerasi pada partikel

sehingga partikel tampak lebih besar saat diuji menggunakan SEM.

Tabel 2. Luas permukaan spesifik sebagai fungsi laju alir gas pembawa

No. Sampel	Laju alir gas pembawa (L/menit)	Luas permukaan spesifik (m ² /gram)	Konversi ke ukuran partikel (nm)
0,5	50,5	21,33	0,5
1,0	50,4	21,32	1,0
1,5	50,5	21,33	1,5

Ket.: Dengan asumsi partikel adalah pejal tidak berpori dan tidak teraglomerasi



Gambar 6. Ukuran dan morfologi nanokomposit ZnO/Fe₂O₃ sebagai fungsi laju alir gas pembawa

KESIMPULAN

Dari hasil penelitian diperoleh kesimpulan bahwa partikel yang diperoleh adalah nanokomposit ZnO/Fe₂O₃ 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 gas pembawa semakin menurun kristalinitas nanokomposit ZnO/Fe₂O₃. Laju alir gas pembawa tidak berpengaruh terhadap ukuran partikel ZnO/Fe₂O₃ dimana ukuran partikel berkisar antara 50-100 nm dan sebagian memiliki morfologi *flowerlike particle*. Laju alir gas pembawa juga tidak berpengaruh terhadap luas permukaan spesifik partikel ZnO/Fe₂O₃, yaitu sebesar 50,5 m²/gram. Kondisi terbaik adalah laju alir gas pembawa 1 L/menit. Selain itu juga diperoleh partikel nanokomposit ZnO/Fe₂O₃ dengan morfologi yang istimewa, yaitu *flowerlike partikel*, yang memiliki beberapa

keistimewaan dibanding partikel dengan morfologi yang sederhana.

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.

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
- 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
- Reto Strobel, Frank Krumeich, Wendelin J. Stark, Sotiris E. Pratsinis and Alfons Baiker, 2004, "Flame spray synthesis of 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. Sahm, L. Madler, A. Gurlo, N. Barsan, S. E. Pratsinis, U. Weimar, 2004, "Flame Spray Synthesis of Tin Dioxide Nanoparticles for Gas Sensing", *Sensors 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 α -Willemite Nanoparticles by Post-calcination of Flame-made Zinc Oxide/Silica Composites", *Part. Part. Syst. Charact.* 19, pp. 354-358
- 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.