

Pengolahan Sampah Plastik Polipropilena (PP) Menjadi Bahan Bakar Minyak dengan Metode Perengkahan Katalitik Menggunakan Katalis Sintetis

Processing of Polypropylene (PP) Plastic Waste Into Oil Fuel by Catalytic Cracking Method Using Synthetic Catalyst

Ekky Wahyudi*, Zultiniar, Edy Saputra

Jurusan Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Riau
Kampus Bina Widya Km. 12,5 Simpang Baru, Pekanbaru 28293
*E-mail: ekkywahyudi16@gmail.com

Abstrak

Sampah plastik memiliki dampak buruk bagi lingkungan apabila tidak diolah lebih lanjut. Penelitian ini dilakukan untuk mengkonversi sampah plastik menjadi bahan bakar minyak menggunakan katalis sintetis yang disintesis dari abu terbang batubara yang selanjutnya dikarakterisasi menggunakan XRD. Tujuan penelitian ini adalah untuk melihat pengaruh variasi suhu dan rasio katalis/plastik. Sebanyak 100 gram plastik jenis polipropilena direngkah di dalam reaktor batch pada suhu 350°C, 400°C, dan 450°C selama 60 menit dengan variasi rasio katalis/plastik 0,5; 1; 1,5 (% berat). *Yield* (%) tertinggi adalah 76,09% yang diperoleh pada variasi suhu 450°C dan rasio katalis/plastik 1,5%. Nilai kalor produk adalah 45,56 MJ/kg. Hasil analisis GC-MS menunjukkan % area produk mengandung bahan bakar seperti bensin (60,46%), kerosin dan solar (7,48%).

Kata Kunci: abu terbang batubara, bahan bakar minyak, perengkahan, polipropilena, sampah plastik

Abstract

Plastic waste has a bad impact on the environment if it is not processed further. The objective of this research is to convert a waste plastic into liquid fuel using synthetic catalyst which it is synthesized from coal fly ash, further characterized by XRD. This research aims to see the effect of various temperature and catalyst/plastic ratio. 100 grams of polypropylene-type plastic are cracked in a batch reactor at 350°C, 400°C, and 450°C during 60 minutes with various catalyst/plastic ratios were 0.5; 1.0; 1.5 (% wt). The highest yield (%) was 76.09% that is obtained at 450°C and catalyst/plastic ratio is 1.5%. Heating value of product is 45.56 MJ/kg. GC-MS result shows % area of the product contains of fuel such as gasoline (60.46%), kerosene and diesel (7.48%).

Keywords: coal fly ash, cracking, liquid fuel, polypropylene, plastic waste

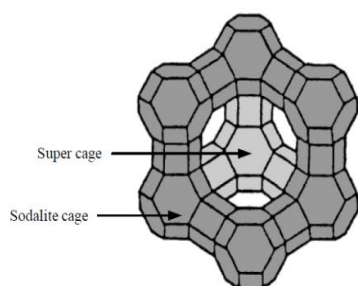
1. Pendahuluan

Kebutuhan masyarakat akan bahan bakar minyak (BBM) yang berasal dari fosil semakin hari semakin meningkat, menyebabkan semakin menipisnya cadangan minyak dan gas bumi. Menurut Dudley (2015), cadangan minyak bumi dunia pada akhir tahun 2014 adalah sebesar 1700,1 miliar barel, sedangkan Indonesia hanya memiliki cadangan minyak terbukti sebesar 3,7 miliar barel dan jumlah tersebut hanya 0,2% dari jumlah cadangan minyak di dunia. Jumlah produksi minyak sebesar 852 ribu barel/hari dengan konsumsi 1,641 juta barel/hari. Dari data di atas, dapat dilihat bahwa terdapat ketimpangan antara produksi dan konsumsi.

Sampah plastik merupakan salah satu permasalahan pokok yang dihadapi saat ini yang dapat berdampak buruk pada manusia maupun lingkungan karena sifatnya yang *non-biodegradable*. Salah satu metode pengolahan sampah plastik yang dilakukan saat ini adalah dengan mengkonversi sampah plastik menjadi bahan bakar hidrokarbon. Hal ini mengingat bahan baku plastik berasal dari turunan minyak bumi sehingga dapat dikembalikan menjadi hidrokarbon sebagai bahan dasar energi. Konversi sampah plastik dapat dilakukan dengan proses perengkahan (*cracking*), yaitu reaksi pemutusan ikatan C - C dari rantai karbon panjang dan berat molekul besar menjadi rantai karbon pendek dengan berat molekul

yang kecil (Sibarani, 2012). Perengkahan katalitik adalah metode perengkahan yang sering digunakan karena menggunakan katalis yang dapat mereduksi suhu tinggi yang digunakan pada proses perengkahan termal dan menghemat konsumsi energi. Dalam proses perengkahan katalitik, katalis yang digunakan adalah katalis padat (heterogen). Beberapa jenis katalis yang digunakan dalam proses perengkahan sampah plastik adalah zeolit beta (Wanchai dan Chaisuwan, 2013), H-zeolit (Melyna, 2013), zeolit HY, ZSM-5 (Anggoro, 2006) dan beberapa jenis katalis lainnya.

Zeolit X merupakan salah satu tipe zeolit sintetis dan termasuk ke dalam kelompok mineral Faujasit (FAU), yaitu zeolit yang memiliki diameter α -cage (*super cage*) 13 Å dan diameter β -cage (*sodalite cage*) 6,6 Å dengan diameter pori 7,4 Å membentuk struktur tiga dimensi dengan nisbah Si/Al 1,0 - 1,5 (Thammavong, 2003). Struktur dari zeolit X diperlihatkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Struktur Zeolit X (Thammavong, 2003)

Zeolit X biasanya digunakan dalam proses *catalytic cracking* (FCC), *hydrocracking* dan reduksi NO, NO₂, CO₂. Selain itu, zeolit X juga dapat digunakan sebagai adsorben, penukar ion (Querol dkk., 2007; Balkus dan Ly, 1991; Ulfah dkk., 2006). Zeolit X pernah digunakan sebagai katalis perengkah minyak bumi pada tahun 60-an sehingga diharapkan katalis ini mampu untuk mengkonversi sampah plastik yang berbahan baku turunan minyak bumi menjadi bahan bakar minyak.

Proses pembuatan zeolit X dalam penelitian ini yaitu peleburan dengan NaOH pada suhu 550°C dan dilanjutkan dengan proses hidrotermal pada suhu 100°C. Menurut Fiore dkk. (2009), proses hidrotermal dan peleburan dengan suhu tinggi akan memberikan konversi abu layang untuk menjadi zeolit lebih besar daripada hanya dilakukan proses peleburan saja. Bahan bakar minyak adalah bahan bakar cair yang biasanya merupakan produk pengolahan minyak bumi (*petroleum*). Contoh bahan bakar minyak yang dipasarkan adalah bensin

(*gasoline*), kerosin (minyak tanah), solar (*diesel*).

Pada penelitian ini dilakukan perengkahan katalitik sampah plastik polipropilena (PP) menggunakan katalis Zeolit X dengan variasi suhu reaksi 350°C, 400°C, dan 450°C, serta rasio katalis/plastik 0,5; 1; dan 1,5 (% berat) dengan waktu reaksi 60 menit. Penelitian ini bertujuan untuk mempelajari pengaruh variasi suhu dan rasio katalis/plastik pada proses perengkahan sampah plastik menjadi bahan bakar minyak, serta mengetahui komponen kimia produk.

2. Metodologi

2.1. Persiapan Bahan Baku

Pada tahap ini bahan baku plastik polipropilena (PP) didapat dari pengumpulan sampah plastik yang dibuang oleh masyarakat. Plastik tersebut dibersihkan terlebih dahulu, dicuci, dikeringkan kemudian dipotong kecil dengan ukuran $\pm 1 \times 1$ cm untuk memperbesar luas permukaan kontak antara plastik dengan katalis.

2.2. Pembuatan Sodium Aluminat (NaAlO₂)

Sodium aluminat digunakan untuk mengontrol rasio Si/Al pada pembuatan katalis. Sebanyak 109,5 gram NaOH dilarutkan ke dalam 1 liter akuades. Selanjutnya dimasukkan 76 gram Al(OH)₃ sambil diaduk sampai homogen. Setelah semua Al(OH)₃ larut kemudian didiamkan hingga terbentuk endapan. Campuran disaring dan endapan dikeringkan di dalam oven sampai berat konstan (Zahrina dkk., 2006).

2.3. Sintesis Katalis Zeolit X

Zeolit X disintesis dengan mencampurkan abu terbang batubara dan NaOH dengan perbandingan 1:1,2 dan digerus. Campuran dilebur pada suhu 550°C (823 K) selama 1 jam, kemudian didinginkan pada suhu ruang dan digerus lagi. Setelah dingin, sebanyak 0,65 gram sodium aluminat ditambahkan ke dalam campuran untuk mengontrol rasio molar SiO₂/Al₂O₃ dan dicampur dengan 200 mL akuades. Campuran kemudian diaduk pada suhu ruang selama 16 jam dan selanjutnya dipanaskan pada suhu 100°C (373 K) di dalam oven untuk proses sintesis hidrotermal selama 24 jam. Setelah didinginkan pada suhu ruang, suspensi disaring dan padatan dicuci berulang-ulang dengan 1 liter akuades dan dikeringkan pada

suhu 105°C (378 K) selama 16 jam (Izidoro dkk., 2013).

2.4. Proses Perengkahan Katalitik Sampah Plastik

Sebanyak 100 gram plastik polipropilena yang sudah bersih dimasukkan ke dalam reaktor *batch* pada suhu 350°C, 400°C, dan 450°C dengan variasi rasio katalis/plastik 0,5; 1 dan 1,5 (% berat) selama 60 menit. Gas N₂ dialirkan untuk mencegah terjadinya reaksi pembakaran akibat adanya O₂ yang terdapat di dalam reaktor. Selanjutnya produk cair ditampung sebagai bahan bakar minyak (cairan hidrokarbon).

2.5. Analisis Bahan dan Produk

Analisis abu terbang batubara menggunakan metode *Atomic Absorption Spectroscopy* (AAS), sedangkan katalis Zeolit X dikarakterisasi menggunakan *X-ray Diffraction* (XRD). Analisis meliputi fisika dan kimia. Analisis fisika terdiri dari uji densitas dan uji nilai kalor, sedangkan analisis kimia dilakukan menggunakan metode *Gas Chromatography-Mass Spectrometry* (GC-MS).

3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Hasil Karakterisasi Abu Terbang Batubara

Analisis komponen yang terkandung di dalam abu terbang batubara dilakukan dengan menggunakan metode AAS (*Atomic Absorption Spectroscopy*). Analisis dilakukan untuk mengetahui kadar SiO₂ dan Al₂O₃ di dalam abu terbang batubara untuk menghitung rasio Si/Al pada proses sintesis katalis. Hasil analisis AAS dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Hasil analisis AAS abu terbang batubara

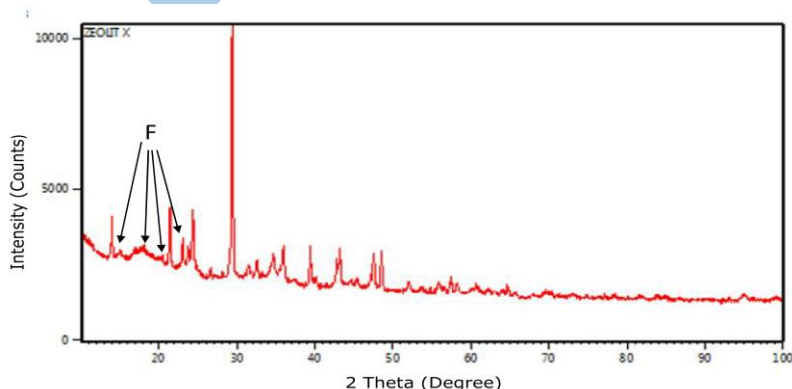
No.	Parameter	Kadar (% berat)
1	SiO ₂	46,49
2	Al ₂ O ₃	17,97

Dari Tabel 1, dapat dilihat bahwa abu terbang memiliki kadar SiO₂ yang cukup tinggi, yaitu 46,49% dan kadar Al₂O₃ 17,97%. SiO₂ dan Al₂O₃ merupakan komponen utama pembentuk zeolit sehingga dapat disimpulkan abu terbang tersebut dapat disintesis menjadi zeolit, salah satunya adalah zeolit X.

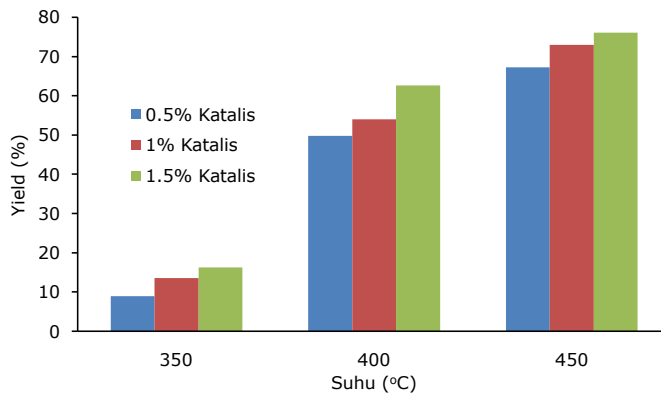
Zeolit X merupakan salah satu jenis zeolit sintesis yang termasuk kelompok mineral Faujasit (FAU) dan memiliki rasio Si/Al 1,0 - 1,5. Jadi, untuk membuat zeolit X, maka kadar aluminium (Al) harus ditambah agar mendapatkan rasio Si/Al yang diinginkan. Penambahan Al ini dilakukan dengan cara menambahkan sodium aluminat (NaAlO₂) ke dalam campuran abu layang batubara dan NaOH sebelum dilakukan pengadukan. Dalam penelitian ini, pembuatan Sodium aluminat (NaAlO₂) dilakukan dengan mencampurkan Sodium hidroksida (NaOH), Aluminium hidroksida (Al(OH)₃) dan akuades lalu diaduk hingga homogen, disaring dan filtratnya dikeringkan di dalam oven sampai berat konstan.

3.2. Karakterisasi Katalis dengan XRD

Katalis yang dihasilkan dikarakterisasi menggunakan XRD (*X-ray Diffraction*) untuk mengetahui jenis kristal zeolite. Proses XRD dijalankan dengan radiasi Cu-Kα yang dioperasikan pada 40 kV dan 100 mA dengan rentang 10-100 (°2θ). Hasil karakterisasi katalis menggunakan XRD dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Pola XRD zeolit X sintesis (F= Faujasit)



Gambar 3. Grafik perolehan *yield* (%)

Dari hasil analisis XRD diketahui puncak mineral (2θ) dan intensitas mineral yang menunjukkan tingkat kristalinitasnya (*crystallinity*). Dari Gambar 2 terlihat bahwa terdapat 4 puncak mineral Faujasit. Faujasit merupakan mineral utama penyusun zeolit X. Jadi dapat dikatakan bahwa proses pembentukan kristal tidak berjalan sempurna karena sedikitnya puncak Faujasit yang teridentifikasi dan rendahnya intensitas. Hal ini dapat terjadi karena distribusi suhu yang tidak merata pada saat proses hidrotermal yang merupakan proses pembentukan kristal zeolit. Jadi, dapat dikatakan bahwa zeolit X yang ingin disintesis pada penelitian ini belum terbentuk secara sempurna.

Tabel 2. Perbandingan puncak mineral zeolit X sintesis dengan zeolit X standar

Zeolit X Sintesis		Zeolit X Standar*	
2θ	Intensitas (%)	2θ	Intensitas (%)
13,961	39,65	14,143	0,04
17,631	4,14	17,547	0,13
19,755	8,50	19,995	2,45
22,149	0,58	22,384	0,18
22,324	0,57	22,384	0,18
22,567	4,37	22,448	1,13

*Treacy dan Higgins, (2001)

Hasil penelitian menunjukkan bahwa perbandingan antara zeolit sintesis dengan zeolit X standar sangat signifikan (Tabel 2). Dari Tabel 2 dapat diketahui bahwa intensitas zeolit X standar sangat kecil di-

bandingkan dengan zeolit sintesis sehingga dapat disimpulkan bahwa zeolit X sudah terbentuk namun belum sempurna. Hal ini diduga terjadi karena adanya beberapa faktor yang mempengaruhi, antara lain distribusi suhu yang tidak merata pada saat sintesis hidrotermal.

3.3. Pengaruh Suhu dan Rasio Katalis/Plastik terhadap Perolehan *Yield* (%) Bahan Bakar

Produk perengkahan berupa cairan hasil kondensasi uap hidrokarbon yang berasal dari plastik. Cairan inilah yang menjadi bahan bakar yang masih bercampur, seperti fraksi bensin, kerosin maupun solar. *Yield* dihitung menggunakan rumus:

$$Yield (\%) = \frac{m_p}{m_b} \times 100\% \quad (1)$$

Keterangan :

m_p : massa produk (gram)
 m_b : massa bahan baku (gram)

Hasil tersebut disajikan dalam bentuk grafik perolehan *yield* (%) seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.

Dari Gambar 3 dapat dilihat bahwa *yield* yang dihasilkan semakin meningkat seiring dengan meningkatnya suhu dan rasio katalis/plastik. Hal yang sama juga dikemukakan oleh Houshmand dkk., (2013) bahwa dengan meningkatnya suhu maka semakin banyak ikatan yang terputus sehingga produk semakin banyak, *yield* juga semakin meningkat. Pada suhu 350°C dengan variasi rasio katalis/plastik, *yield* yang diperoleh kecil dibandingkan pada suhu

400°C dan 450°C yang meningkat secara signifikan. Hal ini dikarenakan proses perengkahan pada suhu yang lebih rendah menghasilkan produk wax yang tertinggal di dalam reaktor yang terdiri dari parafin dan arang (*char*) yang terkarbonisasi (Achilias dkk., 2007).

Pada variasi rasio katalis/plastik, *yield* yang diperoleh semakin tinggi seiring dengan meningkatnya rasio katalis/plastik. Hal ini disebabkan karena semakin banyak jumlah katalis yang ditambahkan maka akan meningkatkan laju reaksi pembentukan produk dengan jalan menurunkan energi aktivasi sesuai dengan persamaan Arrhenius:

$$k = k_0 e^{-E_a/RT} \quad (2)$$

Dimana :

k : Konstanta laju reaksi
 k_0 : Faktor frekuensi
 E_a : Energi aktivasi
 R : Konstanta gas
 T : Suhu

3.4. Uji Densitas dan Nilai Kalor

3.4.1. Hasil Uji Densitas

Uji densitas dilakukan dengan cara memasukkan sampel bahan bakar ke dalam piknometer yang sudah dibersihkan. Sebelumnya piknometer kosong ditimbang sebagai berat awal, selanjutnya berat akhir ditimbang setelah sampel dimasukkan ke dalam piknometer hingga penuh. Perhitungan dilakukan menggunakan rumus:

$$\rho = \frac{m}{v} \quad (3)$$

Keterangan :

ρ : densitas (g/mL)
 m : berat produk (g)
 v : volume piknometer (mL)

Berikut ini adalah nilai densitas yang diperoleh pada tiap variasi penelitian.

Tabel 3. Hasil uji densitas

Rasio Katalis/Plastik (unit)	Suhu (°C)	Densitas (g/ml)
0,5%	350	0,892
	400	0,791
	450	0,781
1,0%	350	0,848
	400	0,771
	450	0,793
1,5%	350	0,813
	400	0,783
	450	0,792

Dari Tabel 4 dapat dilihat bahwa densitas produk berada pada rentang bahan bakar jenis bensin, kerosin dan solar. Rentang densitas untuk bahan bakar jenis Bensin 88 adalah 0,715 - 0,780 g/mL, Kerosin 0,790 - 0,835 g/mL, dan Minyak Solar (*Automotive Diesel Oil/ADO*) 0,815 - 0,870 g/mL (Melyna, 2013). Namun, pada variasi suhu 350°C dan rasio katalis/plastik 0,5%, densitas yang didapat adalah 0,892 g/mL yang termasuk pada rentang minyak diesel (*Industrial Diesel Oil/IDO/MDF*), yaitu 0,840 - 0,920 g/ml (Melyna, 2013).

3.4.2. Hasil Uji Nilai Kalor

Nilai kalor merupakan jumlah energi kalor yang dilepaskan bahan bakar pada waktu terjadinya oksidasi unsur-unsur kimia yang ada pada bahan bakar tersebut (Napitupulu, 2006). Uji nilai kalor (*heating value*) dilakukan menggunakan kalorimeter bom (bomb calorimeter) pada sampel dengan *yield* tertinggi. Nilai kalor yang diperoleh adalah sebesar 10.884 kal/g atau 45,56 MJ/kg. Nilai kalor tersebut sesuai dengan nilai kalor bahan bakar solar, yaitu 45,66 MJ/kg (International Energy Agency, 2010).

3.5. Hasil Analisis Gas Chromatography-Mass Spectrometry (GC-MS)

Analisis GC-MS dilakukan untuk mengetahui komponen kimia yang terkandung di dalam produk. Besarnya kandungan komponen kimia ditunjukkan pada % area. Tabel 4 menunjukkan besarnya fraksi bahan bakar yang terkandung di dalam produk perengkahan yang ditentukan dari % areanya. Penentuan % area tersebut didasarkan pada penentuan senyawa yang teridentifikasi dari hasil GC-MS dan jenis bahan bakar diketahui dari panjang rantai karbon senyawa hidrokarbon. Rantai karbon bahan bakar meliputi fraksi bensin ($C_5 - C_{12}$), kerosin dan solar ($C_{13} - C_{20}$), minyak berat ($> C_{20}$) (Syamsiro dkk., 2014; Sriningsih dkk., 2014).

Tabel 4. Kandungan bahan bakar dari hasil analisis GC-MS

Jenis Bahan Bakar	Variasi Suhu dan Rasio Katalis/Plastik		
	1,5%	1,5%	1,5%
	350°C	400°C	450°C
Bensin (% area)	46,34	75,41	60,46
Kerosin dan Solar (% area)	5,82	2,08	7,48
Total (% area)	52,16	77,49	67,94

4. Kesimpulan

Katalis yang dihasilkan dari penelitian ini belum membentuk karakteristik zeolit X standar secara sempurna karena masih memiliki intensitas yang kecil sehingga dinamakan dengan zeolit X sintesis. Akan tetapi, katalis ini dapat digunakan sebagai katalis perengkah sampah plastik karena mengandung kristal yang terdapat di dalam zeolit X standar yaitu Faujasit. *Yield* (%) tertinggi diperoleh pada variasi suhu 450°C dan rasio katalis/plastik 1,5%, yaitu sebesar 76,09%. Nilai kalor yang dihasilkan adalah 10.884 kal/g atau setara 45,56 MJ/kg dan densitas produk berada pada rentang bahan bakar jenis bensin, kerosin dan solar. Dari hasil analisis GC-MS, produk mengandung fraksi bahan bakar bensin, kerosin dan solar sebesar 60,46% dan 7,48%. Untuk penelitian selanjutnya agar dapat dilakukan pemisahan fraksi produk dan *upgrading* untuk mendapatkan jenis bahan bakar yang diinginkan.

Daftar Pustaka

- Achilias, D. S., Roupakias, C., Megalokonomos, P., Lappas, A. A., Antonakou, E. V. (2007) Chemical recycling of plastic wastes made from polyethylene (LDPE and HDPE) and polypropylene (PP), *Journal of Hazardous Materials*, 149, 536 – 542.
- Anggoro, D. D. (2006) Produksi hidrokarbon cair dari plastik menggunakan katalis zeolit HY dan ZSM-5. *Prosiding Seminar Nasional Teknik Kimia Indonesia*. Palembang,
- Balkus, K. J., Ly, K. T. (1991) The preparation and characterization of an X-type zeolite, *Journal of Chemical Education*, 68 (10), 875 – 877.
- Dudley, B. (2015) BP Statistical Review of World Energy June 2015 <http://www.bp.com/content/dam/bp/pdf/Energy-economics/statistical-review-2015/BP-statistical-review-of-world-energy-2015-full-report.pdf>, diakses pada 20 Maret 2016.
- Fiore, S., Cavalcante, F., Belviso, C. (2009) Synthesis of Zeolites from Fly Ash, *U.S Patent No. 20090257948A1*.
- Houshmand, D., Roozbehani, B., Badakhshan, A. (2013) Thermal and catalytic degradation of polystyrene with a novel catalyst, *International Journal of Science & Emerging Technologies*, 5(1), 234-238.
- International Energy Agency (2010) Oil Information: Documentation for Beyond 2020 Files.
- Izidoro, J. C., Fungaro, D. A., Abbott, J. E., Wang, S. (2013) Synthesis of zeolites X and A from fly ash for cadmium and zinc removal from aqueous solutions in single and binary ion systems, *Fuel*, 103, 827 – 834.
- Melyna, E. (2013) Perengkahan sampah plastik (HDPE, PP, PS) menjadi *precursor* bahan bakar dengan variasi perbandingan bahan baku/katalis H-zeolit, *Skripsi*, Universitas Riau, Pekanbaru.
- Napitupulu, F. H. (2006) pengaruh nilai kalor (heating value) suatu bahan bakar terhadap perencanaan volume ruang bakar ketel uap berdasarkan metode penentuan nilai kalor bahan bakar yang dipergunakan. *Jurnal Sistem Teknik Industri*, 7(1), 60 – 65.
- Querol, X., Moreno, N., Alastuey, A., Juan, R., Andres, J. M., Lopez-Soler, A., Ayora, C., Medinaceli, A., Valero, A. (2007) Synthesis of high ion exchange zeolites from coal fly ash, *Geologica Acta*, 5(1), 49 – 57.
- Sibarani, K. L. (2012) Preparasi, karakterisasi, dan uji aktifitas katalis Ni-Cr/zeolit alam pada proses perengkahan limbah plastik menjadi fraksi bensin, *Skripsi*, Universitas Indonesia, Depok.
- Sriningsih, W., Saerodji, M. G., Trisunaryanti, W., Triyono, Armunanto, R., Falah, I. I. (2014) Fuel production from LDPE plastic waste over natural zeolite supported Ni, Ni-Mo, Co and Co-Mo metals, *Procedia Environmental Sciences*, 20, 215 – 224.
- Syamsiro, M., Saptoadi, H., Norsujianto, T., Noviasri, P., Cheng, S., Alimuddin, Z., Yoshikawa, K. (2014) Fuel oil production from municipal plastic wastes in sequential pyrolysis and catalytic reforming reactors, *Energy Procedia*, 47, 180 – 188.
- Thammavong, S. (2003) Studies of synthesis, kinetics and particle size of zeolite X from narathiwat kaolin, *M.S*

Thesis, Suranaree University of Technology, Thailand.

Treacy, M. M. J., Higgins, J. B. (2001) *XRD powder patterns for zeolites*, Elsevier, Amsterdam.

Ulfah, E. M., Yasnur, F. A., Istadi (2006) Optimasi pembuatan katalis zeolit X dari tawas, NaOH dan water glass dengan response surface methodology, *Bulletin of Chemical Reaction Engineering & Catalysis*, 1(3), 26 – 32.

Wanchai, K., Chaisuwan, A. (2013) Catalytic cracking of polypropylene waste over zeolite beta, *Chemistry and Materials Research*, 3(4), 31 – 41.

Zahrina, I., Saputra, E., Evelyn, Santoso, I. A., Ramelo, R. (2006) Sintesis ZSM-5 tanpa templat menggunakan silika terpresipitasi asal abu sawit sebagai sumber silika, *Jurnal Natur Indonesia*, 9(2), 99 – 103.

RK