



Pengaruh Jumlah Katalis Zeolit Alam Pada Produk Proses Pirolisis Limbah Plastik Polipropilen (Pp)

Khalimatus Sa'diyah^{1✉}, Sri Rachmania Juliastuti²

DOI 10.15294/jbat.v4i2.4171

¹Jurusan Teknik Kimia Politeknik Negeri Malang, Indonesia

²Jurusan Teknik Kimia, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh November, Sukolilo, Indonesia

Article Info

Sejarah Artikel:

Diterima Oktober 2015

Disetujui Desember 2015

Dipublikasikan Desember 2015

Keywords:

catalytic pyrolysis; natural zeolite; plastic waste.

Abstrak

Untuk mengatasi masalah sampah, khususnya limbah plastik, para pakar lingkungan dan ilmuwan dari berbagai disiplin ilmu telah melakukan berbagai penelitian dan tindakan. Salah satu caranya dengan mendaur ulang limbah plastik dengan proses pirolisis katalitik. Tujuan dari percobaan ini adalah untuk mengetahui pengaruh jumlah katalis zeolit alam pada proses pirolisis limbah plastik dengan kondisi bebas oksigen untuk memperoleh senyawa hidrokarbon fraksi bensin (C5-C9) yang maksimal. Proses pirolisis dilakukan menggunakan reaktor semi batch stainless steel unstirred berkapasitas 3,5 dm³; beroperasi pada tekanan 1 atm dan dialiri nitrogen. Sampel limbah plastik yang digunakan adalah plastik jenis polipropilen (PP) sebanyak 50 gram. Pada proses pirolisis ditambahkan katalis zeolit alam sesuai variable yaitu 2,5 gram (5%), 5 gram (10% berat) atau 10 gram (20% berat). Suhu yang digunakan untuk pirolisis adalah 450 °C dengan waktu 30 menit. Uap hasil pirolisis dikondensasi, kemudian produk liquidnya dianalisa dengan gas chromatography–mass spectrometry (GC-MS). Dari analisa GC-MS, produk liquid pirolisis banyak mengandung senyawa hidrokarbon aromatis. Penggunaan jumlah katalis yang menghasilkan senyawa hidrokarbon mendekati mutu bensin paling optimum adalah 10gram (20%) dengan komposisi \leq C9 adalah 29,16% n-paraffin;, 9,22% cycloparaffin dan 61,64% aromatis.

Abstract

To overcome the waste problem, especially plastic waste, environmental concerned scientists from various disciplines have conducted various research and actions. Catalytic pyrolysis processes was chosen as an alternative method to recycle plastic waste. The purpose of this experiment was to determine the effect of natural zeolite catalyst on the pyrolysis process with oxygen-free conditions to obtain maximum hydrocarbon compounds (gasoline fraction in C5-C9). The process of pyrolysis was conducted in 3.5 dm³ unstirred stainless steel semi-batch reactor. This process operated at atmospheric pressure with nitrogen injection. Plastic waste that used in this particular paper was 50 grams of polypropylene (PP). In pyrolysis process, natural zeolite catalysts was added 2.5 gram (5% weight of natural zeolite per weight of plastic waste samples), 5 gram (10%), and 10 gram (20%). Temperature of pyrolysis was 450°C and were maintained until 30 minutes. Steam that produced from pyrolysis was condensed and analysed by gas chromatography–mass spectrometry (GC-MS) to determine yield of hydrocarbons produced. From the analysis of GC-MS, liquid products of pyrolysis contained lots of aromatic hydrocarbons. The optimal amount of catalyst that produce liquid with hydrocarbon compound that has the quality of gasoline was 10 gram (20%) with \leq C9 composition as 29,16% n-paraffin, 9,22% cycloparaffin, and 61,64% aromatics.

© 2015 Semarang State University

✉Corresponding author:

Gedung AO It. 2 Kampus Politeknik Negeri Malang

Jln Soekarno Hatta No 9 Malang

E-mail: khalimatus22@gmail.com

ISSN 2303-0623

PENDAHULUAN

Peningkatan konsumsi energi dan peningkatan timbunan sampah merupakan dua permasalahan yang muncul seiring dengan pertumbuhan ekonomi dan penambahan penduduk. Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan, Dr. Ir. Siti Nurbaya, MSc, Jakarta 10 Juni 2015 saat berdialog pada Peringatan Hari Lingkungan Hidup (HLH) Sedunia tahun 2015 mengatakan bahwa jumlah peningkatan sampah di Indonesia telah mencapai 175.000 ton/hari atau setara 64 juta ton/tahun. Kondisi ini akan terus bertambah sesuai dengan kondisi lingkungannya. Tantangan terbesar pengelolaan sampah adalah penanganan sampah plastik yang tidak ramah lingkungan. Berdasarkan hasil studi yang dilakukan di beberapa kota tahun 2012, pola pengelolaan sampah di Indonesia sebagai berikut: diangkut dan ditimbun di TPA (69%), dikubur (10%), dikompos dan didaur ulang (7%), dibakar (5%), dan sisanya tidak terkelola (7%) (Hendrawati, 2015).

Salah satu permasalahan penting tentang lingkungan, di dunia ataupun di Indonesia khususnya, adalah mengenai sampah plastik. Peningkatan jumlah sampah plastik ini mengancam kestabilan ekosistem lingkungan, mengingat plastik yang digunakan saat ini adalah *nonbiodegradable* (plastik yang tidak dapat terurai secara biologis).

Sektor industri bahan baku plastik dan produk plastik sangat dipengaruhi oleh sektor petrokimia sekunder, khususnya produsen *polyethylene* (PE) dan *polypropylene* (PP), yang merupakan pemasok utama bahan baku industri ini. Menurut data Kementerian Perindustrian RI, dalam lima tahun terakhir periode 2005-2009 tingkat produksi industri PP mengalami pertumbuhan rata-rata sekitar 3,2% per tahun yaitu dari 525.915 ton pada 2005 meningkat menjadi 593.000 ton pada 2009. Kapasitas produksi PP di Indonesia mencapai 670.000 untuk memasok industri karung plastik, karpet, dan barang-barang rumah tangga.

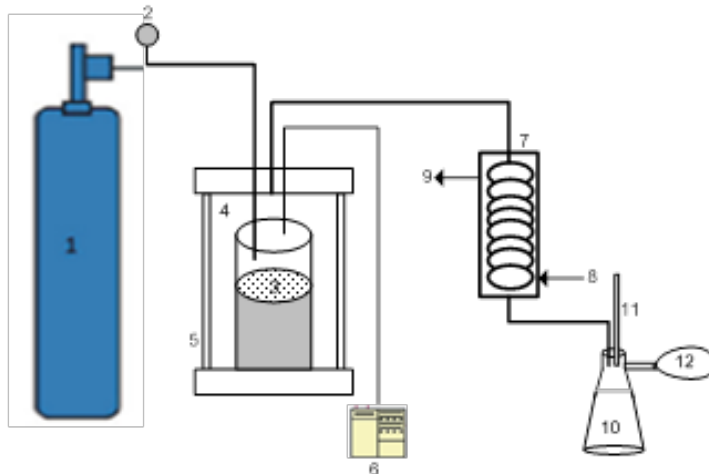
Peningkatan penggunaan plastik untuk keperluan rumah tangga berdampak pada peningkatan timbunan sampah plastik. Untuk mengatasi hal tersebut, para pakar lingkungan dan ilmuwan dari berbagai disiplin ilmu telah melakukan berbagai penelitian dan tindakan. Salah satu caranya dengan mendaur ulang limbah plastik. Alternatif yang digunakan untuk mengurangi jumlah volume sampah plastik dibagi dalam tiga macam proses, yaitu daur ulang, transformasi termal dan transformasi biologis. Proses transformasi termal terbagi tiga macam pengolahan, yaitu pembakaran (*combustion*), *gasification* dan *pyrolysis* (Rodiansono dkk., 2007). Pengelolaan

dan penanganan sampah dengan metode *landfill*, *open dump*, dan pembakaran tidak ramah lingkungan karena menimbulkan berbagai dampak buruk bagi lingkungan. Pirolisis merupakan alternatif untuk pengolahan limbah plastik, karena dari proses ini didapatkan liquid dan bahan bakar gas dari limbah plastik (Budi, 2013).

Pirolisis yaitu pemanasan pada kondisi bebas oksigen. Dalam proses pirolisis komponen organik dalam bahan dapat menghasilkan produk cair dan gas, yang dapat berguna sebagai sumber bahan mentah senyawa hidrokarbon termasuk didalamnya adalah bahan bakar minyak. Senyawa turunan hidrokarbon mempunyai kegunaan yang sangat banyak dan mencakup semua bidang kehidupan. Hidrokarbon (minyak dan gas) mayoritas digunakan sebagai bahan bakar untuk menghasilkan energi dan untuk memanaskan ruangan. Penyulingan minyak bumi menghasilkan bensin, bahan bakar diesel, minyak pemanasan, minyak pelumas, lilin, dan aspal. Sebagian kecil (4%) minyak bumi dimanfaatkan untuk menghasilkan plastik, tekstil, dan farmasi.

Hal utama yang harus mendapat perhatian khusus adalah mengendalikan pirolisis agar produknya lebih seragam. Pada pirolisis, reaksi pemotongan rantai molekul terjadi secara acak sehingga menghasilkan fraksi-fraksi molekul dengan aneka berat molekul (distribusi variasi molekul yang lebar). Hal ini memberi konsekuensi rendahnya yield molekul target sehingga disarankan untuk melibatkan katalis dalam proses pirolisis. Pirolisis menggunakan katalis juga diharapkan dapat dilakukan pada suhu yang relatif lebih rendah. Katalis berupa padatan yang telah diujicobakan pada pirolisis poliolefin adalah zeolit (HZSM-5, HMOR, and zeolit Y), $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$, BaO, and *sulfur-promoted zirconia catalysts* (Keane, 2009).

Aquado bersama tim penelitiannya (2000) mampu mencatat selektifitas terhadap hidrokarbon dengan rantai karbon $\text{C}_5\text{-C}_{12}$ sebesar 40-60% dengan konversi 40-60% dari proses depolimerisasi pirolisis menggunakan katalis zeolit beta. Dari uji pendahuluan terhadap zeolit alam Wonosari dengan menggunakan difraksi sinar x diketahui bahwa sebagian besar penyusunnya adalah mordenit. (Windarti, 2001). Menurut Haag and Chen (Hegedus, 1987) mordenit termasuk zeolit berpori besar yang tersusun dari cincin 12 anggota sehingga dapat mengadsorpsi molekul berantai lurus, cabang maupun siklik. Diharapkan dengan memanfaatkan katalis zeolit alam Wonosari menghasilkan hidrokarbon hasil pirolisis poloprophylene dengan rantai C pendek yang meningkat.



- Keterangan gambar :
1. Tabung nitrogen
 2. Rotameter
 3. Tempat katalis
 4. Reaktor pirolisis
 5. Elektrik furnace
 6. Alat pembaca suhu thermocouple
 7. Kondensor reflux
 8. Inlet air pendingin
 9. Outlet air pendingin
 10. Separator liquid-gas
 11. Termometer
 12. Penampung gas

Gambar 1. Skema rangkaian alat pirolisis

Dalam penelitian ini akan dipelajari tentang pengaruh jumlah katalis pada proses pirolisis dengan kondisi bebas oksigen untuk memperoleh senyawa hidrokarbon fraksi bensin (C5-C8) yang maksimal. Penelitian ini diharapkan dapat memberikan alternatif dalam mengolah limbah plastik untuk dijadikan bahan bakar (*fuel*).

METODE

Persiapan Bahan Limbah Plastik

Limbah plastik PP yang digunakan adalah kemasan gelas dari produk sebuah minuman, diperoleh dari pemulung - pemulung di daerah Keputih Tegal, Sukolilo, Surabaya. Limbah plastik PP dicuci dengan air bersih, untuk menghilangkan kotoran yang masih menempel. Kemudian dipotong dengan ukuran 3-5 mm.

Katalis

Pada pembuatan katalis, sampel zeolit alam Wonosari dicuci dengan akuades untuk menghilangkan pengotor dan dilanjutkan dengan pengeringan. Zeolit kering ditumbuk kemudian diayak dengan ayakan 100 mesh, selanjutnya dilakukan perendaman dalam larutan HF 1% dengan rasio 1:2 (v/v) selama 10 menit kemudian disaring menggunakan kertas saring dan dicuci dengan akuades.

Selanjutnya dilakukan perendaman dalam larutan asam klorida 6 N dengan rasio 1:2 (v/v) selama 12 jam dan direfluks selama 30 menit pada suhu 90 °C, kemudian disaring dan dicuci dengan akuades sampai pHnya sama dengan 6. Setelah itu, zeolit dikeringkan dalam oven pada suhu 110 °C selama 1 jam untuk menghilangkan air dan dilanjutkan dengan perendaman dalam

larutan NH_4Cl 0,1 M dengan rasio 1: 2 (v/v) pada suhu 90 °C selama 3 jam per hari sampai satu minggu. Zeolit kembali dikeringkan dalam oven pada suhu 110 °C dan dilanjutkan dengan kalsinasi dengan gas N_2 selama 4 jam pada suhu 500 °C. Zeolit siap untuk dikarakterisasi dan digunakan sebagai katalis. Karakterisasi katalis meliputi luas permukaan

Proses Pirolisis Limbah Plastik PP Pirolisis

Proses pirolisis dilakukan menggunakan reaktor semi *batch stainless steel unstirred* berkapasitas 3,5 dm³ operasi pada tekanan 1 atmosfer. Sampel limbah plastik PP yang digunakan sebanyak 50 gram. Kemudian ditambahkan katalis sesuai variabel yaitu 2,5 gram (5%), 5 gram (10% berat) atau 10 gram (20% berat), berat zeolit alam per berat sampel limbah plastik.

Sampel ditempatkan ke dalam reaktor yang dialiri nitrogen. Skema sederhana dari rangkaian alat pirolisis ditunjukkan dalam Gambar 1.

Pada saat proses pirolisis sampel dipanaskan sampai suhu 450 °C dengan waktu tinggal di dalam reaktor selama 30 menit. Pengambilan sampel dilakukan setelah proses kondensasi, kemudian dianalisis pengaruh jumlah katalis terhadap *yield* senyawa hidrokarbon yang dihasilkan.

Kondensasi

Uap hasil pirolisis dialirkan ke rangkaian kondensor yang dialiri air pendingin, kemudian liquid hasil kondensasi dikumpulkan dalam erlenmeyer dan uap yang tidak terkondensasi dikumpulkan di dalam penampung gas.

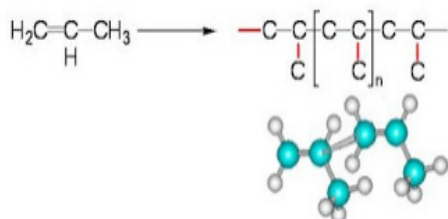
Metode Analisis

Liquid hasil kondensasi dianalisis dengan

Gas chromatography–mass spectrometry (GC-MS). Katalis yang digunakan dianalisa menggunakan metode Brunauer, Emmett, and Teller (BET) dan X-Ray Fluorescence (XRF).

PEMBAHASAN

Pada penelitian ini bahan baku yang digunakan adalah plastik jenis polipropilen (PP). PP merupakan plastik yang dihasilkan dari polimerisasi adisi dari senyawa propilen menjadi polipropilen, dengan reaksi seperti gambar 2. Gugus polipropilen tersusun dari senyawa alkana yang memiliki cabang metil.



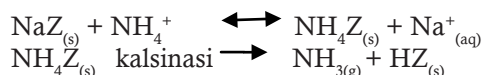
Gambar 2. Polimerisasi adisi dari senyawa propilen

Pembuatan Katalis

Katalis zeolit alam Wonosari yang sudah dipreparasi, dianalisa menggunakan metode (BET). Dari hasil analisa tersebut didapatkan hasil sebagai berikut:

Luas permukaan: 55,049 m²/g
 Volume pori : 0,091 cc/g
 Jejari pori : 38,35 Å

Rumus molekul zeolit adalah M_{x/n} [(AlO₂)_x(SiO₂)_y].wH₂O. Pada saat preparasi zeolit alam terjadi proses dealuminasi dan dekationisasi. Proses tersebut terjadi karena HCl bereaksi dengan alumina (AlO₂) membentuk AlCl₃. Perendaman zeolit hasil perlakuan asam kedalam larutan NH₄Cl 0,1 N pada temperatur 90°C selama 1 minggu, menyebabkan terjadinya penggantian kation-kation yang ada dalam zeolit dengan NH₄⁺, dan dengan kalsinasi pada temperatur 500°C selama 4 jam dapat mengubah ion tersebut menjadi ion H⁺. Contoh reaksi dapat digambarkan sebagai berikut:



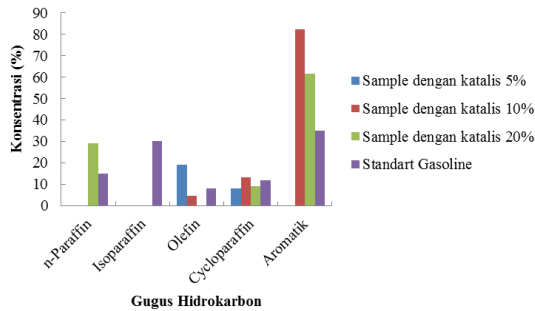
Dari hasil analisa XRF zeolit alam pada Tabel I diketahui komposisi kimiawi kandungan unsur dalam bentuk oksidanya yaitu Alumina (Al₂O₃) dan Silika (SiO₂) yang merupakan komponen utama pembentuk rangka dari zeolit alam yaitu sebesar 9% (wt) untuk alumina dan 76,6% (wt) untuk silika. Sehingga perbandingan rasio Si/Al yang dimiliki oleh zeolit alam ini adalah sebesar 8,51, yang menunjukkan kerapatan atom Al pada struktur kerangka kristal zeolit cukup tinggi. Rasio Si/Al 8,51 merupakan zeolit dengan kadar Si tinggi yang mempunyai sifat higroskopis dan menyerap molekul non polar sehingga baik digunakan sebagai katalisator asam untuk hidrokarbon. Diketahui bahwa zeolit mordenit mempunyai perbandingan Si/Al = 5 dan zeolit Y dengan perbandingan kadar Si/Al antara 1-3 (Yuanita, 2010).

Tabel 1. Hasil analisa zeolit alam menggunakan XRF.

Chemical Formula	Wt (%)	Chemical Formula	Wt (%)
Al	7,4	Al ₂ O ₃	9
Si	64,1	SiO ₂	76,6
K	12,8	K ₂ O	6,38
Ca	7,06	CaO	3,76
Ti	0,51	TiO ₂	0,32
V	0,018	V ₂ O ₅	0,008
Mn	0,093	MnO	0,038
Fe	6,74	Fe ₂ O ₃	3,38
Ni	0,042	NiO	0,017
Cu	0,09	CuO	0,038
Sr	0,85	SrO	0,33
Ba	0,2	BaO	0,07
Eu	0,1	Eu ₂ O ₃	0,08

Senyawa Hidrokarbon Fraksi $\leq C_9$ di dalam Produk Liquid Hasil Pirolisis

Pada percobaan ini produk utamanya adalah produk liquid karena molekul hidrokarbonnya sama dengan fraksi minyak bumi sehingga diharapkan bisa digunakan sebagai bahan bakar cair terutama fraksi $\leq C_9$, yang bisa digunakan sebagai bahan baku gasoline. Produk liquid hasil proses pirolisis dianalisa menggunakan *Gas Chromatography – Mass Spectrometry* (GC-MS).



Gambar 3. Konsentrasi gugus hidro-karbon fraksi $\leq C_9$ untuk berbagai variabel jumlah katalis.

Dari Gambar 3 diketahui bahwa kandungan hidrokarbon $\leq C_9$, yang paling banyak adalah gugus aromatik. Persentase aromatik yang paling optimum (mendekati persentase aromatik pada standart gasoline) adalah pada jumlah katalis

20% w/w yaitu sebesar 61,64%. Hal ini disebabkan karena adanya katalis pada proses pemanasan dapat menyebabkan terjadinya proses isomerisasi, dimana alkena (*olefin*) dengan rantai lurus dan alkana bercabang (*isoparaffin*) dari polipropilen diubah menjadi gugus aromatik.

Gugus aromatik mempengaruhi pembakaran pada bahan bakar (*fuel*) karena tidak mudah terbakar. Pembakaran *fuel* yang diinginkan adalah yang menghasilkan tekanan maksimum terhadap penurunan piston. Hal ini bergantung tergantung dari ketepatan waktu pembakaran agar jumlah energi yang ditransfer ke piston maksimum. Ketepatan waktu pembakaran tergantung dari jenis rantai hidrokarbon yang selanjutnya menentukan kualitas *fuel*. Karena gugus aromatis sulit terbakar maka energi yang ditransfer ke piston lebih besar sehingga meningkatkan performa mesin.

Persentase aromatis yang terlalu tinggi dalam *fuel* juga tidak diperbolehkan karena mencemari lingkungan dan berbahaya bagi kesehatan. Hasil pembakaran gugus aromatis pada *fuel* menghasilkan asap buangan yang apabila terhirup oleh manusia bisa menyebabkan iritasi ringan pada kulit, mata, dan saluran pernafasan. Untuk menghindari dampak buruk penggunaan *fuel* maka ditetapkan kandungan hidrokarbon pada. Pada penelitian ini kandungan hidrokarbonnya didekati dengan kandungan hidrokarbon

Tabel 2. Komposisi gugus hidrokarbon fraksi $\leq C_9$ pada *sample*.

Gugus Hidrokarbon	Kadar (%) berdasarkan Jumlah Katalis			*) Standart Gasoline (%)
	5%	10%	20%	
n-Paraffin	-	-	29,16	15
Isoparaffin	-	-	-	30
Olefin	19,03	4,42	-	8
Cycloparaffin	8,16	13,32	9,22	12
Aromatik	72,81	82,26	61,64	35
Total	100	100	100	100

Tabel 3. Kandungan senyawa hidrokarbon fraksi bensin berdasarkan Don McBride Site dan keputusan Dirjen Migas tahun 2006.

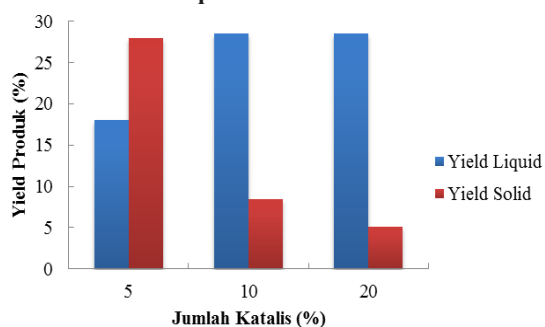
Gugus Hidrokarbon	Kadar (%) Hidrokarbon Berdasarkan		
	Don McBride Site	Dirjen Migas 2006	Hasil Penelitian
<i>n-Paraffin</i>	15	-	29,16
<i>Isoparaffin</i>	30	-	-
<i>Olefin</i>	8	20	-
<i>Cycloparaffin</i>	12	-	9,22
Aromatik	35	50	61,64

pada bensin. Berdasarkan *Don McBride Site* dan Dirjen Migas tahun 2006, kandungan hidrokarbon bensin seperti pada Tabel 3.

Dari hasil percobaan maka produk yang kandungannya mendekati dengan mutu bensin adalah pada penggunaan jumlah katalis 20% dengan komposisi hidrokarbon fraksi $\leq C_9$, yang dihasilkan adalah 29,16% *n-paraffin*, 9,22% *cycloparaffin*, dan 61,64% aromatis, tanpa *olefin* dan *isoparaffin*.

Dari hasil analisa produk untuk variabel jumlah katalis 20% didapatkan kandungan sedimen sebesar 1,56 %. Kandungan sedimen dalam bahan bakar tidak boleh terlalu tinggi karena dikhawatirkan akan menyumbat saringan bahan bakar. Disamping itu sedimen dapat membentuk endapan pada sistem injeksi atau ruang pembakaran. Saat bahan bakar minyak terbakar, endapan ini akan membara, menghasilkan endapan (deposit) dalam keadaan dingin. Menurut Pramono (2011), jika sedimen atau air untuk distilate fuels (bahan bakar distilat) lebih dari 0,05%, sebaiknya di gunakan prosedur penyaringan *centrifuging* atau pengendapan khusus untuk mendapatkan bahan bakar yang lebih murni.

Yield Produk Liquid dan Solid Hasil Pirolisis



Gambar 4. % Yield produk liquid dan solid untuk berbagai variabel jumlah katalis

Dari Gambar 4 diketahui bahwa semakin banyak jumlah katalis yang digunakan maka *yield liquid* cenderung meningkat berkebalikan dengan *yield solid*. Fungsi utama katalis pada proses ini adalah memecah hidrokarbon rantai panjang. Jumlah katalis yang banyak akan mendegradasi hidrokarbon rantai panjang menjadi senyawa yang lebih sederhana melalui pembentukan radikal bebas. Tiap radikal bebas yang dihasilkan

akan menginduksi senyawa lain hingga terbentuk radikal baru dengan jumlah atom yang lebih kecil.

KESIMPULAN

1. Jumlah katalis pada proses pirolisis yang optimum adalah 20% berat katalis/berat *sample*.
2. Komposisi hidrokarbon fraksi bensin $\leq C_9$, yang optimum adalah 29,16% *n-paraffin*; 9,22% *cycloparaffin*, dan 61,64% aromatis.

DAFTAR PUSTAKA

- Budi, Untoro. 2013. Berbagai Metode Konversi Sampah Plastik Menjadi Bahan Bakar Minyak. *Jurnal Teknik* Vol.3 No.1/April 2013. ISSN 2088-3676
- Haag, W. O. dan Chen, N. Y, dalam Hegedus, L. L., 1987. *Catalyst Design, Progress and Perspectives*. New York : John Wiley and Sons
- Hendrawati, Tuti. 2015. Timbunan Sampah di Indonesia Capai 750.000 Ton Perhari. <http://www.beritalingku-angan.com/2015/06/timbunan-sampah-di-indonesia-capai.html>. Akses 03 Desember : 5.58 PM
- J. Aguado, D. P. Serrano, J. M. Escola, E. Garagorri, J. A. Fernandez. 2000. Catalytic Conversion of Polyolefins into Fuels Over Zeolite Beta. *Polymer Degradation and Stability*: 69 (2000) 11-16
- Keane, M.A.. 2009. Catalytic Transformation of Waste Polymers to Fuel Oil. *ChemSusChem* 2 (2009) : 207-214
- Pramono, Agus. 2011. Menentukan Pemakaian Bahan Bakar dan Bahan Pelumas Mesin Diesel. *Teknis* Vol. 6 No.pril 2011 : 11-17
- Rodiansono, Wega Trisunaryanti dan Triyono. 2003. Preparation, Characterization and Activity Test of NiMo/Z and NiMo/Z-Nb₂O₅ Catalysts for Hydrocracking of Waste Plastic Fraction to Gasoline Fraction. *Berkala MIPA* : 17 (2)
- Windarti, T. 2001. Pengaruh Kandungan Logam Kromium dan Temperatur terhadap Keefektivan Katalis Kromium-Zeolit Alam dalam Proses Perengkahan Biofuel. Yogyakarta : Tesis, Program Pascasarjana UGM
- Windarti Tri dan Suseno Ahmad. 2004. Preparasi Katalis Zeolit Alam Asam sebagai Katalis dalam Proses Pirolisis Katalitik Polietilena. *JKSA*. Vol:VII
- Yuanita, Dewi. 2010. Kajian Modifikasi dan Karakteristik Zeolit Alam dari Berbagai Negara. Yogyakarta.