

KARAKTERISTIK GAS HASIL PROSES PIROLISIS LIMBAH PLASTIK POLIETILENA (PE) DENGAN MENGGUNAKAN KATALIS RESIDUE CATALYTIC CRACKING (RCC)

Siti Naimah dan Novi Nur Aidha

Balai Besar Kimia dan Kemasan, Kementerian Perindustrian
Jl. Balai Kimia I Pekayon, Pasar Rebo, Jakarta Timur

E-mail : st.naimah@gmail.com

Received : 27 Maret 2017; revised : 29 Maret 2017; accepted : 9 Mei 2017

ABSTRAK

KARAKTERISTIK GAS HASIL PROSES PIROLISIS LIMBAH PLASTIK POLIETILENA (PE) DENGAN MENGGUNAKAN KATALIS RESIDUE CATALYTIC CRACKING (RCC). Penelitian ini bertujuan untuk membandingkan karakteristik gas yang dihasilkan pada proses pirolisis limbah plastik polietilena (PE) dengan variabel konsentrasi penggunaan katalis *Residue Catalytic Cracking (RCC)*. Pada proses ini digunakan reaktor pirolisis kapasitas 5 kg dan ditambahkan katalis *RCC* sebagai variabel penelitian. Gas yang terbentuk ditampung dalam gas *sampler* dan diukur *flowrate*. Karakteristik gas yang dihasilkan dikarakterisasi dengan menggunakan *GC System*. Variabel konsentrasi katalis yang digunakan pada penelitian ini adalah 7,5%, 10%, 12,5%, 15%, dan 17,5% dari bahan baku. Penambahan konsentrasi katalis sebesar 10% dari bahan baku menghasilkan campuran propana dan butana sebesar 35,657%, etana 12,13%, dan pentana 5,221%. Disamping itu pada penggunaan konsentrasi katalis 10%, gas pengotor yang dihasilkan yaitu gas CO dan CO₂ rendah yaitu sebesar 0% dan 0,193%. Pengukuran *flowrate* gas yang dihasilkan menunjukkan bahwa semakin besar konsentrasi katalis, maka waktu proses yang dibutuhkan untuk mendapatkan gas semakin cepat.

Kata kunci : *RCC*, Katalis, Pirolisis, Gas

ABSTRACT

CHARACTERISTICS GAS FROM PYROLYSIS PLASTIC POLYETHYLENE (PE) WASTE PROCESS USING RESIDUE CATALYTIC CRACKING (RCC). *This study aims to compare the characteristics of gases produced in the pyrolysis process of polyethylene plastic waste (PE) under different concentration of residue catalytic cracking (RCC). In the process, the pyrolysis reactor was with a capacity of 5 kg added with RCC catalyst as a variable. The formed gases were collected in a sampler gas and flowrate was measured. The characteristics of the resulting gas were characterized using GC System. The catalyst concentration variables were 7.5%, 10%, 12.5%, 15% and 17.5% of the raw materials. The addition of catalyst concentration of 10% from the raw material resulted in a mixture of propane and butane 35.657%, ethane 12.13% and pentane 5.221%. In addition, the use of 10% catalyst concentration resulted in low impurity of gas CO of 0% and CO₂ of 0.193% respectively. The measurement of gas flowrate showed that the higher catalyst concentration the faster the process to produce the gas.*

Key words : *RCC*, Catalysts, Pyrolysis, Gas

PENDAHULUAN

Indonesia seperti negara berkembang lainnya, mengalami peningkatan konsumsi plastik karena perkembangan ekonomi dan pesatnya urbanisasi. Pada tahun 2010, Indonesia mengonsumsi 10 kg plastik per kapita per tahun (Syamsiro *et al.* 2014). Oleh karena itu, diperlukannya penanggulangan plastik bekas pakai. Plastik PE adalah hidrokarbon rantai lurus/tidak bercabang yang berasal dari olefin yaitu senyawa tak jenuh dengan rumus bangun

C_nH_{2n}. Perengkahan hidrokarbon tanpa katalis menggunakan suhu dan tekanan yang tinggi disebut dengan dekomposisi termal. Sedangkan yang menggunakan katalis disebut perengkahan katalitis (Syamsiro *et al.* 2014). Perengkahan olefin menjadi senyawa yang berakhiran-ene seperti ethene (*ethylene*) dan propene (*propylene*). Olefin tidak stabil dapat bereaksi dengan oksigen dan bromium (Sadeghbeigi 2012). Perengkahan sampah plastik dengan

proses pirolisis adalah mengkonversi sampah plastik menjadi bahan petrokimia dasar yang dapat digunakan menjadi bahan baku hidrokarbon atau bahan bakar. Proses pirolisis untuk mengkonversi limbah plastik menjadi suatu produk telah dilakukan penelitian pada suhu rendah sampai dengan suhu tinggi, 25 °C sampai dengan 140 °C, 50 °C sampai dengan 250 °C dan 300 °C sampai dengan 550 °C dilakukan oleh Ademiluyi and Adebayo (2007). Teknologi pirolisis dengan memanaskan plastik *High Density Polyethylene (HDPE)* pada suhu 420 °C sampai dengan 440 °C tanpa adanya oksigen telah dilakukan oleh Sharma *et al.* (2014). Sedangkan penelitian pengukuran pendistribusian panas pada suhu reaktor silinder 450 °C dalam pirolisis botol plastik telah dilakukan oleh Hartulistiyosoto *et al.* (2015).

Keuntungan dari proses pirolisis adalah mengurangi volume limbah plastik di lingkungan, menghasilkan fraksi cair, padat, dan gas yang dapat digunakan sebagai bahan bakar dan bahan kimia (*chemical feed stock*), sehingga mengurangi masalah lingkungan. Proses pirolisis dapat dilakukan dengan dan tanpa katalis. Keuntungan pada pirolisis dengan katalis yaitu katalis menurunkan fraksi cair dan meningkatkan fraksi gas. Katalis yang pada proses pirolisis berfungsi untuk menurunkan temperatur reaksi, mempercepat reaksi, serta menghasilkan produk dengan karbon atom yang lebih spesifik dan hidrokarbon yang ringan (Patni *et al.* 2013; wik 2014).

Beberapa macam katalis telah digunakan dalam proses pirolisis seperti katalis dari bahan alam (silika alumina, bentonit *clay*, alumina hidroksilat, zeolit) dan katalis sintetik (*metallic oxides*, silika alumina, silika magnesia, karbon aktif (Almeida dan Marque 2015; Kyaw dan Hmwe 2015). Industri petroleum banyak melakukan pengolahan minyak mentah dengan menggunakan *RCC*, sehingga pada proses tersebut akan menghasilkan *spent catalyst* berupa *Residual Catalytic Cracking (RCC)* hal ini karena katalis tidak ikut bereaksi. *RCC* ini dapat digunakan sebagai katalis dalam perengkahan limbah plastik menjadi bahan bakar cair (Maarif 2009; Istadi *et al.* 2011; Ermawati *et al.* 2016; Naimah *et al.* 2016). *Cracking* (perengkahan) merupakan suatu proses pemutusan senyawa kimia yang mempunyai rantai panjang ikatan C-C dengan suhu tinggi.

Gas hasil samping proses pirolisis dikarakterisasi menggunakan alat *GC* dengan detektor *TCD* dan *FID*. Komposisi gas hasil pirolisis terdiri dari hidrogen, karbon monoksida, karbon dioksida, metana, etana, propana,

butana, dan pentana (Kuncser *et al.* 2010). Pada penelitian ini digunakan limbah plastik PE karena tidak dapat didaur ulang dan didegradasi oleh lingkungan. Limbah plastik selain PE banyak didaur ulang untuk dijadikan produk baru. Penambahan katalis *RCC* dengan berbagai variabel diharapkan dapat diketahui karakteristik gas yang dihasilkan pada proses pirolisis limbah plastik PE.

Penelitian ini bertujuan untuk membandingkan karakteristik gas yang dihasilkan pada proses pirolisis limbah plastik PE dengan variabel konsentrasi menggunakan katalis *RCC*.

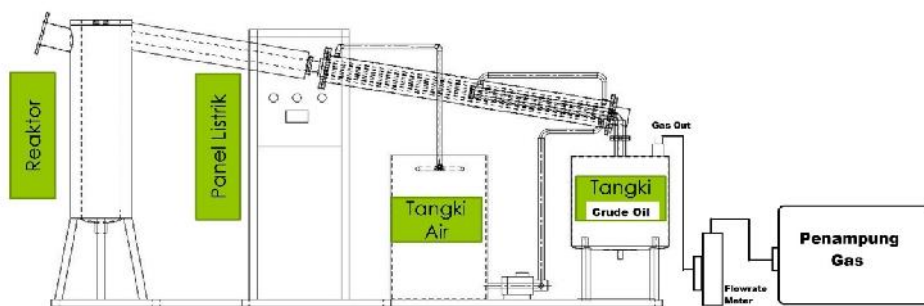
BAHAN DAN METODE

Bahan

Bahan yang dibutuhkan dalam penelitian ini adalah limbah plastik kresek (PE), katalis *RCC* yang berasal dari limbah Pertamina, dan CaCO_3 . Adapun alat yang digunakan adalah *crusher* untuk mencacah limbah plastik, reaktor pirolisis yang telah dimodifikasi (Gambar 1) kapasitas 5 kg yang terdiri dari reaktor, kondensor, tangki air, dan tangki penampung produk, penampung gas dari plastik 500 L, *flowmeter*, *gas sampler* plastik dari *polypropylene* dan *GC system* merk *Shimadzu* 2014 yang terdiri dari *TCD-FID*.

Metode

Proses pirolisis menggunakan katalis *RCC* seperti yang dilakukan oleh (Ermawati *et al.* 2016) dan (Naimah *et al.* 2016). Pada penelitian sebelumnya (Ermawati *et al.* 2016) telah membandingkan zeolit yang diaktivasi dan *RCC* sebagai katalis proses pirolisis limbah plastik PE, didapatkan bahwa produk fase cair lebih tinggi dengan menggunakan katalis *RCC*. Katalis *RCC* yang digunakan tidak divariasikan, sehingga pada penelitian ini dilakukan variabel *RCC*. Variabel konsentrasi katalis *RCC* yang dipakai adalah 7,5%; 10%; 12,5%; 15%; dan 17,5% terhadap bahan baku. Bahan baku limbah plastik PE sebesar 5 kg dan katalis dimasukkan ke *fluidized bed reactor* yang dilengkapi dengan pemanas (*furnace*) (Gambar 1). Suhu proses yang digunakan adalah 350 °C sampai dengan 450 °C. Selama proses konversi, plastik akan berubah dari fase padat menjadi fase cair dalam bentuk uap. Fase uap akan terbawa oleh gas untuk diproses lebih lanjut pada alat pendingin (*condenser*) dengan posisi miring untuk dipisahkan antara fraksi cair dan gas.



Gambar 1. Reaktor pirolisis (Ermawati *et al.* 2013)

Gas yang tidak terkondensasi akan tetap berwujud gas diukur *flowrate*-nya menggunakan *flowmeter*. Selanjutnya gas diambil menggunakan gas *sampler* untuk dikarakteristik menggunakan alat *GC system*.

HASIL DAN PEMBAHASAN

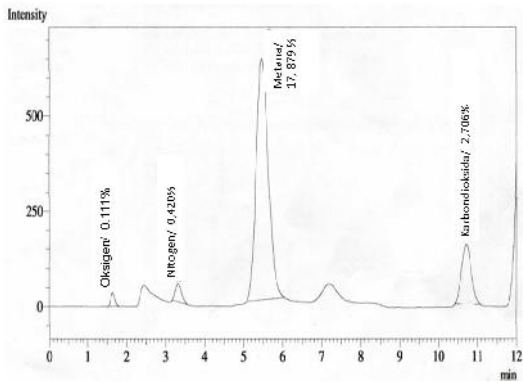
Proses *cracking* pirolisis ditandai dengan keluarnya cairan yang ditampung pada tangki penampung. Cairan yang dihasilkan merupakan hasil dari proses kondensasi dari pemutusan rantai panjang plastik kresek PE yang digunakan, sedangkan yang tidak terkondensasi akan tetap menjadi gas. Gas yang dihasilkan merupakan gas yang mengandung komponen hidrokarbon yang dapat digunakan sebagai sumber energi. Pada saat proses pirolisis berlangsung, dilakukan *sampling* gas untuk dianalisis komposisi dengan *GC system*.

Proses pirolisis menggunakan bahan baku plastik kresek PE menghasilkan komposisi gas oksigen, nitrogen, metana, karbon monoksida, karbon dioksida, etana, propana, butana, n-butana, pentana, n-pentana, dan n-heksana. Komposisi gas hasil pirolisis menggunakan katalis *RCC* 7,5% dapat dilihat pada Gambar 2, sedangkan penggunaan katalis 10% dapat dilihat pada Gambar 3.

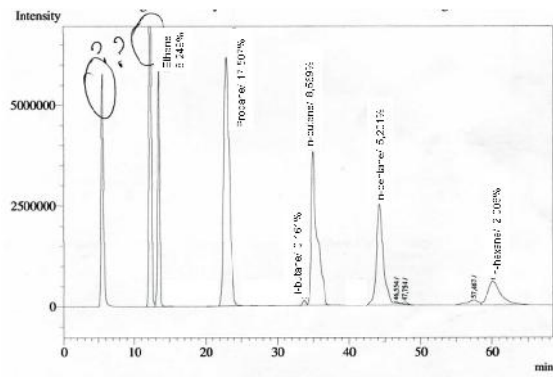
Data pada Gambar 2 menunjukkan bahwa proses pirolisis menggunakan katalis 7,5% menghasilkan metana dan propana paling dominan yaitu masing-masing sebesar 17,879% dan 17,507%. Gas metana dan propana dapat digunakan sebagai bahan bakar. Tetapi pada proses tersebut menghasilkan gas CO₂ sebesar 2,706%. Gas CO₂ yang terbentuk merupakan gas polutan dan diharapkan kadarnya kecil atau

bahkan tidak ada di dalam bahan bakar. Pada penggunaan katalis *RCC* 10% (Gambar 3) didapatkan konsentrasi propana yang tinggi yaitu masing-masing sebesar 24,096% dan kadar butana sebesar 11,661%. Kadar CO dan CO₂ pada penggunaan katalis 10% menurun menjadi 0% dan 0,193%. Hal ini terjadi karena penambahan katalis mampu menghilangkan karbon monodioksida dan karbon dioksida. Komposisi gas menggunakan katalis 12,5% dapat dilihat pada Gambar 4, sedangkan penggunaan katalis 15% dapat dilihat pada Gambar 5, dan penggunaan katalis 17,5% dapat dilihat pada Gambar 6.

Pada penggunaan katalis 12,5 komponen utama yang dihasilkan adalah propana. Kadar propana yang dihasilkan adalah sebesar 27,266% dan n-butana sebesar 5,359%, sedangkan pada penggunaan katalis 17,5% menghasilkan propana sebesar 10,709% dan kadar n-butana sebesar 4,812%. Kadar katalis propana pada penggunaan katalis 17,5% lebih rendah dibandingkan dengan penggunaan katalis 7,5%; 10%; dan 12,5%; hal ini disebabkan kadar nitrogen yang tinggi yaitu 34,245%. Adanya nitrogen pada gas hasil pirolisis salah satu pengotor dalam katalis *RCC* adalah nitrogen (Sadeghbeigi 2012). Selain itu tingginya kadar nitrogen dipengaruhi oleh suhu pada proses pirolisis, merupakan indikasi adanya pengotor nitrogen tersebut berasal dari katalis *RCC*. Semakin tinggi suhu nitrogen yang terbentuk, semakin kecil hal ini sesuai dengan penelitian yang telah dilakukan Istadi *et al.* (2011) yang menggunakan bahan baku limbah PE dan katalis *RCC*. Nitrogen yang dihasilkan pada suhu 370 °C adalah sebesar 25%, sedangkan pada suhu 455 °C adalah 5,85%.

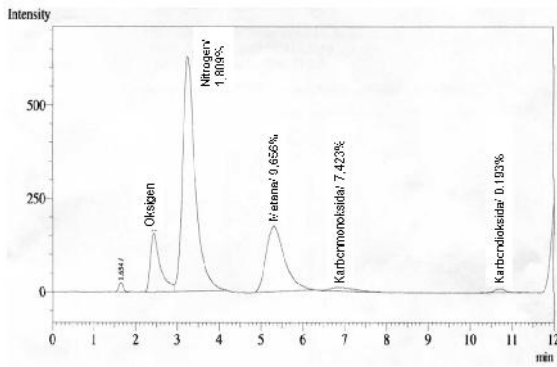


a

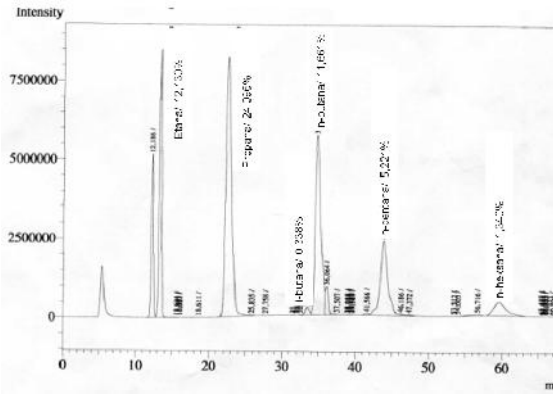


b

Gambar 2. Hasil analisis gas pirolisis limbah plastik dengan katalis 7,5% : a) karakteristik gas oksigen, nitrogen, metana, dan karbon dioksida, b) karakteristik gas etana, propana, i-butana, n-butana, n-pentana, dan n-eksana

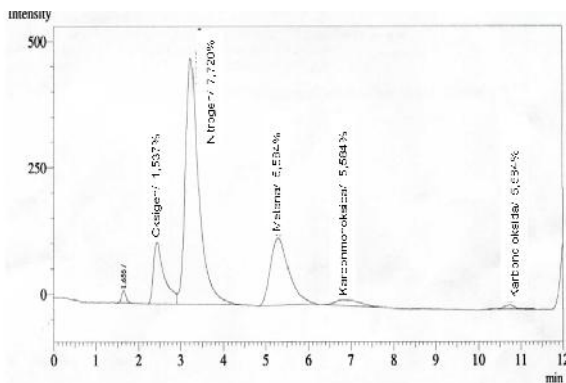


a

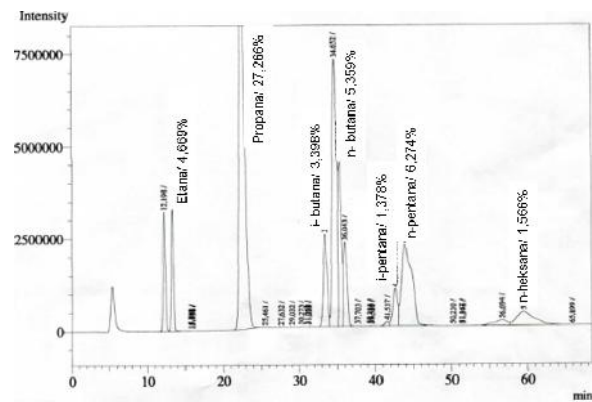


b

Gambar 3. Hasil analisis gas pirolisis limbah plastik dengan katalis 10% : a) karakteristik gas oksigen, nitrogen, metana, karbon monoksida, dan karbon dioksida, b) karakteristik gas etana, propana, i-butana, n-butana, n-pentana, dan n-eksana

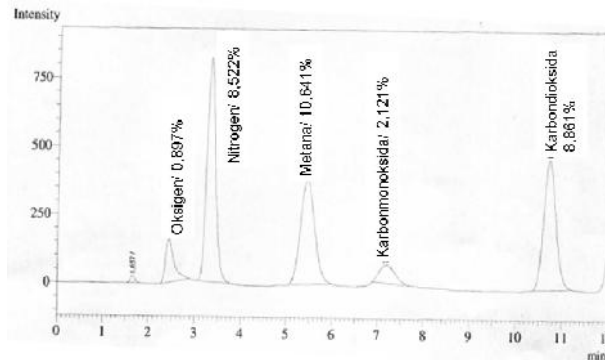


a

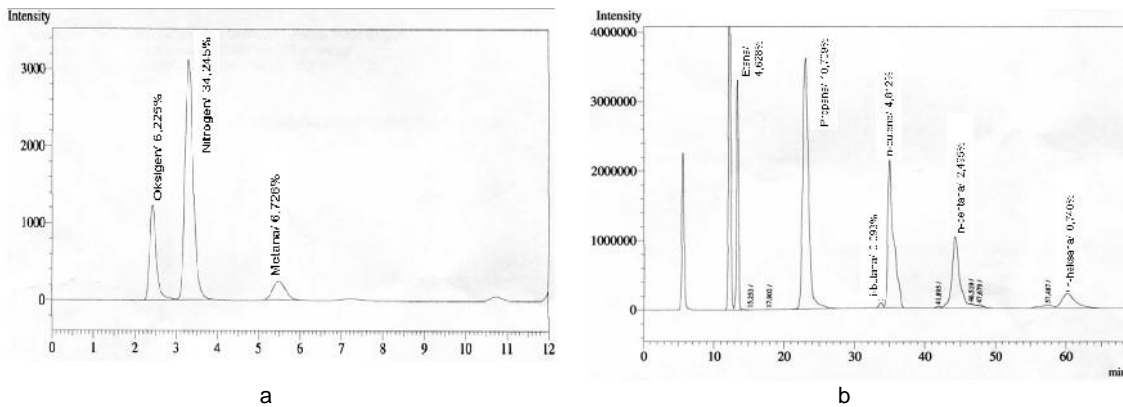


b

Gambar 4. Hasil analisis gas pirolisis limbah plastik dengan katalis 12,5% : a) karakteristik gas oksigen, nitrogen, metana, karbon monoksida, dan karbon dioksida, b) karakteristik gas etana, propana, i-butana, n-butana, n-pentana, dan n-eksana



Gambar 5. Hasil analisis gas pirolisis limbah plastik dengan katalis 15% (parameter gas oksigen, nitrogen, metana, karbon monoksida, dan karbondioksida)



Gambar 6. Hasil analisis gas pirolisis limbah plastik dengan katalis 17,5% : a) karakteristik gas oksigen, nitrogen, dan metana, b) karakteristik gas etana, propana, i-butana, n-butana, n-pentana, dan n-eksana

Kadar metana yang dihasilkan pada penggunaan RCC 15% tinggi yaitu sebesar 10,641%, sedangkan kadar gas CO dan CO₂ sebesar 2,121% dan 8,861% lebih tinggi jika dibandingkan dengan penggunaan katalis 7,5%; 10%; 12,5%; dan 17,5%. Hal ini disebabkan senyawa PE mudah teroksidasi dengan adanya oksigen sehingga membentuk CO dan CO₂, disamping itu juga penambahan katalis akan berpengaruh terhadap penambahan oksida (Sadeghbeigi 2012). Konsentrasi tertinggi campuran propana dan butana tertinggi didapatkan pada penggunaan katalis 10% yaitu sebesar 35,657%. Propana dan butana merupakan komposisi utama pada bahan bakar LPG yaitu campuran propana dan butana harus minimum 97% dan kadar C₂ maksimum adalah 0,8% serta C₅ maksimum diperbolehkan adalah 2,0% (Direktur Jenderal Minyak dan Gas Bumi 2009). Gas hasil pirolisis menggunakan variabel katalis 7,5%; 10%; 12,5%; 15%; dan 17,5% dengan kapasitas reaktor pirolisis sebesar 5 kg. Istadi *et al.* (2011) telah melakukan penelitian terhadap komposisi gas dari limbah plastik HDPE menggunakan reaktor berkapasitas 0,9 L dan 5 L dengan jumlah sampel 20 g sampai dengan 30 g dan 70 g sampai dengan 150 g.

Total propana dan butana pada gas hasil pirolisis menggunakan katalis 7,5%; 10%; 12,5%; 15%; dan 17,5% masih dibawah 97%, selain itu kadar C₂ (etana) masih diatas 0,8% dan C₅ (pentana) masih diatas 2,0%. Kadar etana diatas batas maksimum dapat menyebabkan nyala kompor agak kemerahan. Gas yang dihasilkan dapat dimanfaatkan sebagai bahan pembuat LPG (*Liquid Petroleum Gas*) yang terdiri unsur karbon dan hidrogen merupakan senyawa hidrokarbon dengan komponen utama C₃ dan H₄. Komposisi LPG tersebut terdiri dari senyawa propana C₃H₈, butana C₄H₁₀, butena C₄H₈, dan sejumlah kecil etana C₂H₄ dan pentana C₅H₁₂ (Shukur *et al.* 2013).

Berdasarkan jenis komposisi tersebut menerangkan bahwa gas metana, propana, n-butana, dan etana merupakan gas yang paling dominan terbentuk. Gas metana merupakan bahan bakar gas yang dibutuhkan yang memiliki sifat tidak berbau, mudah terbakar, tidak toksik, dan tidak korosi. Gas metana banyak digunakan sebagai bahan bakar gas LNG (*Liquid Natural Gas*) dan CNG (*Compress Natural Gas*).

Flowrate gas hasil pirolisis diukur untuk mengetahui kecepatan gas yang terbentuk dan waktu proses yang dibutuhkan untuk setiap

variasi jumlah katalis. Tabel 3 menerangkan perbandingan jumlah katalis terhadap waktu proses.

Setiap proses pirolisis dengan bahan baku plastik 4 kg mendapatkan gas hasil samping sebesar 500 L. *Flowrate* gas yang keluar dari proses tanpa menggunakan katalis sebesar 1,70 L/menit. Semakin banyak katalis yang digunakan, proses pirolisis akan semakin cepat. Namun pada pemakaian katalis sebanyak 17,5%, kecepatan proses tidak mengalami peningkatan. Hal ini terjadi karena jumlah katalis yang ditambahkan sudah sebanding dengan bahan baku yang direngkai dari rantai hidrokarbon yang panjang menjadi rantai pendek. Penelitian selanjutnya diperlukan untuk meningkatkan campuran propana dan butana karena untuk digunakan sebagai *LPG* kedua campuran tersebut minimal 97% sesuai baku mutu yang ditetapkan oleh Dirjen Migas (Direktur Jenderal Minyak dan Gas Bumi 2009).

Tabel 3. Perbandingan jumlah katalis terhadap waktu proses

Jumlah katalis (%)	<i>Flowrate</i> (L/menit)	Waktu proses (menit)
0	1,70	294
7,5	2,10	238
10	2,35	213
12,5	2,57	195
15	2,73	183
17,5	2,73	183

KESIMPULAN

Berdasarkan karakterisasi dan komposisi gas dari berbagai variabel katalis *RCC* yang digunakan didapatkan konsentrasi optimum adalah dengan penambahan katalis 10% yang menghasilkan campuran propana dan butana yang lebih tinggi yaitu 35,757%; ethana 12,13%; dan pentana 5,221% dibandingkan dengan konsentrasi katalis yang lainnya 7,5%; 12,5%; 15%; dan 17,5%. Gas CO dan CO₂ yang dihasilkan pada penggunaan katalis 7,5% sampai dengan 15% sangat rendah dibandingkan dengan penggunaan katalis 17,5% yaitu sebesar 2,121% dan 8,861%.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan terima kasih kepada Balai Besar Kimia dan Kemasan yang telah memberikan dana untuk penelitian ini dan rekan-rekan selaku tim yang turut serta dalam penelitian ini. Penulis juga mengucapkan terima kasih kepada Dr. Rahyani Ermawati, atas saran dan bimbingan dalam menyelesaikan penulisan ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Ademiluyi, T, and T. A Adebayo. 2007. "Fuel Gases from Pyrolysis of Waste Polyethylene Sachets" 11 (2): 21–26.
- Almeida, Débora, and Maria de Fátima Marque. 2015. "Thermal and Catalytic Pyrolysis of Polyethylene Plastic Waste in Semi." *Polimeros* 26 (1): 1–8. doi:http://dx.doi.org/10.1590/0104-1428.2100.
- wik, Agnieszka. 2014. "Fuel from Waste - Catalytic Degradation of Plastic Waste to Liquid Fuels."
- Direktur Jenderal Minyak dan Gas Bumi, Departemen Energi dan sumber Daya Mineral. 2009. "Keputusan Direktur Jenderal Minyak Dan Gas Bumi Tentang Standar Dan Mutu (Spesifikasi Bahan Bakar Gas Jenis Liquefied Petroleum Gas (LPG) Yang Dipasarkan Di Dalam Negeri." http://hubdat.dephub.go.id/keputusan-dirjen/384-tahun-1996.
- Ermawati, R, N Bumiarto, I Rumondang, E Oktarina, and S Naimah. 2016. "Pengaruh Residual Catalytic Cracking (RCC) Dan Zeolit Terhadap Kualitas Crude Oil Hasil Pirolisis Limbah." *Jurnal Kimia Kemasan* 38 (1): 47–54.
- Hartulistiyoso, E, F.A.P.A.G. Sigiyo, and M Yulianto. 2015. "Temperature Distribution of the Plastics Pyrolysis Process to Produce Fuel at 450oC." *Procedia Environmental Sciences* 28 (Sustain 2014): 234–41. doi:10.1016/j.proenv.2015.07.030.
- Istadi, L Buchori, and Suherman. 2011. "Platic Waste Conversion to Liquid Fuels Over Modified-Residual Catalytic Cracking Catalysts : Modeling and Optimization Using Hybrid Artificial Neural Network – Genetic." *Reaktor* 13 (3): 131–39.
- Kuncser, R, M Paraschiv, M Tazerout, and J Bellettre. 2010. "Liquid Fuel Recovery Through Pyrolysis of Polyethylene Waste." *Environmental Engineering and Management Journal* 9 (10): 1371–74.
- Kyaw, K.T, C Su, and S Hmwe. 2015. "Effect of Various Catalysts on Fuel Oil Pyrolysis Process of Mixed Plastic Wastes." *International Journal of Advances in Engineering & Technology* 8 (5): 794–802.
- Maarif, H. 2009. "Reaksi Kompetisi Antara Perengkahan Dan Polimerisasi Tir Karet Dari Ban Bekas Dengan Katalis Mo-Ni/Zeolit Y." Universitas Sebelas Maret Surakarta.
- Naimah, S, S. A Aviandharie, and N.N Aidha. 2016. "Karakteristik Pelarut Dan Solar

- Hasil Proses Pirolisis Limbah Plastik Polietilen." *Jurnal Kimia Dan Kemasan* 38 (2): 109–14. doi:http://dx.doi.org/10.24817/jkk.v38i2.2499.
- Patni, N, P Shah, S Agarwal, and P Singhal. 2013. "Alternate Strategies for Conversion of Waste Plastic to Fuels." *ISRN Renewable Energy* 2013: 1–7. doi:10.1155/2013/902053.
- Sadeghbeigi, R. 2012. *Fluid Catalytic Cracking Handbook*. Third edit. United States: Elsevier.
- Sharma, B. K., B. R. Moser, K.E. Vermillion, K. M. Doll, and N. Rajagopalan. 2014. "Production, Characterization and Fuel Properties of Alternative Diesel Fuel from Pyrolysis of Waste Plastic Grocery Bags." *Fuel Processing Technology* 122. Elsevier B.V.: 79–90. doi:10.1016/j.fuproc.2014.01.019.
- Shukur, M F, Y M Yusof, S M M Zawawi, H a Illias, and M F Z Kadir. 2013. "Conductivity and Transport Studies of Plasticized Chitosan-Based Proton Conducting Biopolymer Electrolytes." *Physica Scripta T157*: 14050. doi:10.1088/0031-8949/2013/T157/014050.
- Syamsiro, M, H Saptoadi, T Norsujianto, P Noviasri, S Cheng, Z Alimuddin, and K Yoshikawa. 2014. "Fuel Oil Production from Municipal Plastic Wastes in Sequential Pyrolysis and Catalytic Reforming Reactors." *Energy Procedia* 47. Elsevier B.V.: 180–88. doi:10.1016/j.egypro.2014.01.212.

