

KAJIAN PENGARUH PENGGUNAAN KATALIS TERHADAP KUALITAS PRODUK MINYAK HASIL PIROLISIS SAMPAH PLASTIK

^{1), 2)}Mochamad Syamsiro

¹⁾Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Janabadra

²⁾Center for Waste Management and Bioenergy, Universitas Janabadra

Jl. Tentara Rakyat Mataram 55-57 Yogyakarta 55231

E-mail : syamsiro@janabadra.ac.id

ABSTRACT

A significant growth of the plastic consumption and production has resulted in an increased generation of waste plastics. To minimize the environmental impact and to reduce damages caused by waste plastics, they must be recycled and recovered. Waste plastics possess a very high calorific value since they are derived from crude oil. Therefore, producing fuels such as diesel, kerosene and gasoline by using feedstock recycling is a very promising method to recycle waste plastics due to the vast amount of plastics that cannot be economically recovered by conventional mechanical recycling processes. This paper reviews the use of catalyst for cracking waste plastics. This review summarizes some aspects in waste plastics conversion process from reaction mechanism to application in diesel engine. There are two methods for utilizing catalyst in a pyrolysis reaction i.e. direct catalytic cracking and combination of pyrolysis dan catalytic reforming processes. The use of natural zeolite as an alternative catalyst has also been discussed to replace the use of commercial catalysts. Finally, some physical properties of waste plastics oil has also been reviewed to meet the requirement of the engine.

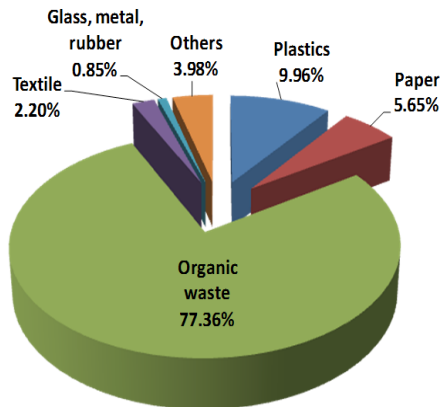
Keywords: waste plastics, fuel, pyrolysis, catalyst, catalytic reforming.

PENDAHULUAN

Saat ini plastik telah menjadi material penting di kehidupan moderen dan telah digunakan untuk berbagai macam aplikasi. Plastik masih menjadi bahan yang sulit tergantikan untuk berbagai kebutuhan sehari-hari seperti kemasan makanan, tas, produk-produk elektronik, otomotif, dan mainan. Penggunaan plastik akan terus meningkat mengingat kelebihan yang dimilikinya antara lain ringan dan kuat, tahan terhadap korosi, transparan, mudah diwarnai dan sifat insulasinya yang cukup baik.

Pertumbuhan produksi dan penggunaan plastik yang semakin tinggi menyebabkan terjadinya peningkatan jumlah sampah yang dihasilkan dari plastik tersebut. Di Amerika

Serikat, plastik berkontribusi 12,7% dari total sampah yang dihasilkan (EPA, 2013). Di beberapa negara Asia, komposisi sampah sangat tergantung dari tingkat ekonomi negara tersebut yang dapat dilihat dari besarnya produk domestik bruto (PDB). Di Jepang, komposisi sampah plastiknya mencapai 20% dari total sampah sementara Indonesia hanya berkontribusi 10% dari total sampah yang dihasilkannya (Borongan dan Okumura, 2010). Di Yogyakarta, ada sekitar 9,98% sampah plastik dihasilkan dari total sampah yang dibuang di tempat pembuangan akhir sampah (TPA) Piyungan (Syamsiro, 2015).



Gambar 1. Komposisi sampah di TPA Piyungan, Yogyakarta (Syamsiro, 2015).

Penanganan sampah plastik dengan sistem *landfill* maupun *open dumping* bukan merupakan pilihan yang tepat karena plastik mempunyai laju degradasi yang sangat lambat sehingga sangat sulit terurai di dalam tanah. Penggunaan teknologi insinerasi dengan cara dibakar juga tidak tepat karena akan menghasilkan polutan ke udara sehingga menyebabkan persoalan lingkungan. Untuk meminimalisasi dampak lingkungan dari sampah plastik, maka material ini harus didaur-ulang untuk mendapatkan kembali produk plastiknya ataupun untuk menghasilkan produk lain yang bernilai ekonomi. Ada beberapa metode untuk mendaur-ulang sampah plastik ini yaitu *mechanical recycling*, *feedstock recycling* dan *energy recovery* (Al-Salem dkk., 2009).

Mechanical recycling adalah proses untuk mendapatkan kembali produk plastik dari sampah plastik dengan cara-cara mekanis. Pada sistem ini, sampah plastik dilelehkan untuk kemudian dibuat pelet plastik yang kemudian digunakan sebagai bahan baku untuk pembuatan produk-produk berbahan baku plastik. Pada umumnya plastik hasil daur-ulang ini digunakan untuk membuat produk-produk dengan kualitas yang lebih rendah. Metode ini hanya dapat digunakan untuk jenis plastik tunggal, sehingga perlu adanya pemisahan berdasarkan jenis plastik sebelum dilelehkan. Sampah plastik yang terlalu banyak kontaminasi juga sulit didaur-ulang dengan metode ini karena akan

berpengaruh terhadap kualitas produk plastik yang dihasilkannya.

Feedstock atau *chemical recycling* merupakan teknologi yang lebih maju dimana sampah plastik dikonversi menjadi molekul dengan ukuran yang lebih kecil berbentuk cairan maupun gas untuk memproduksi bahan bakar maupun zat-zat kimia. *Energy recovery* adalah suatu metode untuk mendapatkan kembali energi yang terkandung di dalam sampah plastik dengan cara dibakar untuk menghasilkan energi dalam bentuk kalor, uap maupun listrik.

Plastik adalah salah satu produk turunan dari minyak bumi. Oleh karena itu, plastik mempunyai kandungan energi yang tinggi seperti bahan bakar pada umumnya seperti bensin, solar dan minyak tanah. Tabel 1 menunjukkan nilai kalor bahan plastik dibandingkan dengan bahan bakar. Berbagai jenis plastik seperti polietilen (PE), polipropilen (PP) dan polistiren (PS) mempunyai nilai kalor yang setara dengan bahan bakar yang berasal dari minyak bumi seperti minyak tanah, solar dan minyak berat. Oleh karena itu, mengkonversi sampah plastik menjadi bahan bakar dengan metode *feedstock recycling* merupakan pilihan yang menjanjikan untuk daur-ulang plastik yang tidak dapat didaur-ulang secara mekanis karena pertimbangan keekonomian.

Tabel 1: Nilai kalor beberapa jenis plastik dan bahan bakar.

Jenis Bahan	Nilai Kalor (MJ kg ⁻¹)
Polietilen	43.3-46.5
Polipropilen	46.50
Polistiren	41.90
Minyak tanah	46.50
Solar	45.20
Minyak berat	42.50
Minyak bumi	42.30

Sumber: Al-Salem dkk. (2009).

Feedstock recycling adalah metode daur-ulang yang melibatkan proses degradasi termal yang disebut dengan pirolisis untuk memecah

polimer dengan rantai panjang menjadi lebih pendek. Ada beberapa metode degradasi termal yang telah dikembangkan oleh banyak peneliti yaitu degradasi termal atau pirolisis, pirolisis katalitik dan kombinasi pirolisis dan reformasi katalitik.

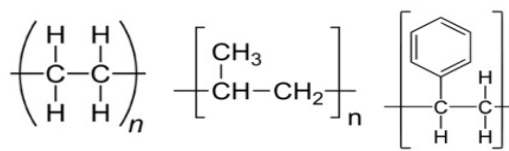
PIROLISIS SAMPAH PLASTIK

Pirolisis adalah proses degradasi termal bahan-bahan polimer seperti plastik maupun material organik seperti biomassa dengan pemanasan tanpa melibatkan oksigen di dalamnya. Proses ini umumnya berlangsung pada temperatur antara 500-800 °C (Aguado dkk., 2007). Produk dari pirolisis ini terdiri dari fraksi gas, cair dan residu padatan (Buekens dan Huang, 1998). Pada suhu tersebut, plastik akan meleleh dan kemudian berubah menjadi gas. Pada saat proses tersebut, rantai panjang hidrokarbon akan terpotong menjadi rantai pendek. Selanjutnya proses pendinginan dilakukan pada gas tersebut sehingga akan mengalami kondensasi dan membentuk cairan. Cairan inilah yang nantinya menjadi bahan bakar, baik berupa bensin maupun bahan bakar diesel.

Pirolisis plastik melibatkan tiga mekanisme dekomposisi yaitu : 1) pemotongan secara random rantai polimer yang menyebabkan terbentuknya rantai polimer yang lebih pendek, 2) pemotongan pada ujung rantai dimana molekul kecil dan rantai panjang polimer akan terbentuk, 3) pemisahan rantai polimer membentuk molekul-molekul kecil. Mekanisme tersebut akan sangat berhubungan dengan energi disosiasi ikatannya, derajat aromatisasi maupun keberadaan halogen dan heteroatom lainnya di dalam rantai polimer (Xingzhong, 2006). Dalam banyak kasus, proses ini umumnya berlangsung secara simultan. PE dan PP akan terdekomposisi secara termal dengan cara pemotongan rantai karbon secara random dan pemotongan pada ujung rantai karbon.

Jenis plastik yang digunakan sebagai umpan pada proses pirolisis mempunyai korelasi langsung terhadap kualitas bahan bakar

yang dihasilkan seperti distribusi atom karbon, *flash point*, bilangan oktan, bilangan setana, dan *pour point*. Tiap jenis plastik mempunyai struktur kimia dan mekanisme reaksi yang berbeda seperti ditunjukkan pada gambar 2.

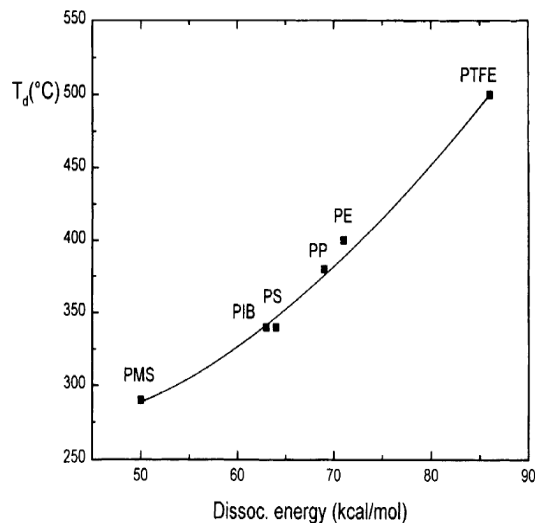


Polyethylene Polypropylene Polystyrene

Gambar 2. Struktur molekul PE, PP dan PS.

PE adalah jenis plastik yang paling banyak ditemukan di dalam sampah plastik baik itu yang massa jenisnya rendah (LDPE) maupun yang tinggi (HDPE). PE disintesis dari polimerisasi etilen, dimana perbedaan kondisi reaksi akan menghasilkan berbagai tipe PE. PP merupakan hasil polimerisasi propilen. Produk cairan hasil pirolisis PP yang utama adalah olefin yang menyerupai rangka dari molekul PP. Dibandingkan dengan PE, PP menghasilkan lebih sedikit residu padatan dan lebih banyak produk cairan tetapi dengan rantai karbon yang lebih ringan. PS diproduksi dari polimerisasi styrene monomer yang cukup baik untuk isolator pada komponen listrik. Hasil utama dari pirolisis PS adalah styrene monomer yang dapat digunakan sebagai bahan bakar maupun bahan baku kimia.

Dekomposisi termal dari bahan plastik merupakan proses endotermik sehingga dibutuhkan energi minimal sebesar energi disosiasi ikatan rantai C-C di dalam rantai plastik. Gambar 3 menunjukkan hubungan langsung antara energi disosiasi dengan temperatur dekomposisi untuk berbagai jenis plastik. PE mempunyai temperatur dekomposisi yang lebih tinggi dibandingkan dengan PP dan PS, hal ini dikarenakan perbedaan struktur molekul dari tiap-tiap jenis plastik seperti ditunjukkan oleh gambar 2.



Gambar 3. Hubungan antara energi disosiasi ikatan rantai C-C dengan temperatur dekomposisi (Aguado dan Serrano, 1999)

Kuantitas dan kualitas produk yang dihasilkan dari proses pirolisis sampah plastik juga dipengaruhi oleh beberapa parameter antara lain tipe reaktor, temperatur, dan waktu tinggal di dalam reaktor (Miskolczi dkk., 2004). Konduktivitas termal yang rendah dan viskositas yang tinggi dari plastik adalah permasalahan utama di dalam mendesain reaktor pirolisis. Oleh karena itu, desain reaktor menjadi parameter penting di dalam pirolisis sampah plastik.

Ada beberapa tipe reaktor yang telah dikembangkan dan digunakan untuk pirolisis seperti *batch/semi batch*, reaktor unggun tetap (*fixed bed*), reaktor unggun terfluidisasi (*fluidized bed*), *spouted bed* dan *screw kiln*. Reaktor tipe *batch/semi batch* telah digunakan oleh banyak peneliti karena desainnya yang lebih sederhana dan kemudahan dalam operasionalnya. Namun demikian, tipe *batch* mempunyai kekurangan di dalam stabilitas proses khususnya untuk aplikasi skala besar. Oleh karena itu, reaktor sistem kontinyu merupakan pilihan yang tepat karena dapat menjaga kestabilan proses seperti temperatur, tekanan dan jumlah *feedstock* yang konstan (Murata dkk., 2010).

Pengaruh temperatur dan waktu tinggal pada pirolisis campuran sampah plastik telah diteliti oleh Miskolczi dkk. (2004). Hasilnya menunjukkan bahwa volatilnya meningkat seiring dengan kenaikan temperatur dan waktu tinggal. Hal ini disebabkan oleh perbedaan stabilitas termal pada rantai polimer. Pada waktu tinggal 1,2 jam, plastik yang meleleh akan tinggal lebih lama pada kondisi degradasi termal, sehingga menghasilkan cairan dan gas lebih banyak.

Namun demikian, degradasi termal pada bahan plastik memiliki sejumlah kelemahan diantaranya produk yang dihasilkan memiliki sebaran panjang rantai karbon yang luas dan kebutuhan akan temperatur yang tinggi. Hal ini membatasi aplikasi pada skala komersial dan dapat meningkatkan biaya produksi untuk pengolahan sampah plastik. Oleh karena itu, pirolisis dengan menggunakan katalis dapat digunakan untuk meminimalisir permasalahan di atas. Penggunaan katalis diharapkan dapat menurunkan temperatur reaksi, mempercepat reaksi dekomposisi dan memperbaiki kualitas produk.

PIROLISIS KATALITIK SAMPAH PLASTIK

Keberadaan katalis mempunyai peranan penting di dalam proses pirolisis karena dapat menurunkan kebutuhannya dibandingkan dengan yang tanpa katalis serta menghasilkan formasi hidrokarbon cabang yang lebih banyak. Katalis juga dapat menurunkan waktu reaksi inisiasi dan memperbaiki kuantitas dan kualitas produk keluarannya. Katalis juga dapat mendorong selektifitas produk akhir sesuai dengan yang diinginkan. Perbandingan degradasi termal dan katalitik bahan plastik telah dipelajari oleh beberapa peneliti menggunakan berbagai macam katalis seperti silika alumina, *fluid catalytic cracking* (FCC), zeolit Y, HZSM-5, MCM-41 dan zeolit alam (Lee, 2009; Lee, 2006; Uddin dkk., 1997; Walendziewski dan Steininger, 2001). Ada dua jenis katalis yang telah digunakan oleh para peneliti, yaitu katalis

homogen dan heterogen. Secara umum, katalis heterogen merupakan pilihan yang lebih baik karena kemudahan dalam pemisahan dan mendapatkannya kembali dari dalam reaktor (Aguado dkk., 2006).

Distribusi produk hasil pirolisis plastik sebagai efek penggunaan katalis telah diteliti oleh Seo dkk. (2003) dan dapat dilihat di tabel 2. Secara umum, penggunaan katalis akan menurunkan fraksi minyak dan residu serta meningkatkan fraksi gas jika dibandingkan dengan degradasi termal. Hal ini disebabkan karena fraksi minyak yang dihasilkan dari degradasi termal telah direngkang menggunakan katalis sehingga rantai panjang hidrokarbonnya dipotong menjadi rantai yang lebih pendek. Hal ini berakibat sebagian fraksi minyak dikonversi menjadi gas dengan rantai karbon yang lebih pendek. Dari tabel 2 juga dapat dilihat bahwa pirolisis katalitik dapat menghasilkan lebih dari 70% minyak untuk semua jenis katalis terkecuali katalis ZSM-5. Semua jenis katalis menunjukkan performa katalitik yang sangat baik pada proses perengkahan, isomerisasi dan aromatisasi. Katalis ZSM-5 mempunyai struktur pori yang berbeda dan rasio silika alumina yang lebih tinggi sehingga memiliki kestabilan termal dan asam yang tinggi.

Tabel 2: Distribusi produk minyak, gas dan residu hasil pirolisis HDPE pada temperatur 450°C dari beberapa jenis katalis.

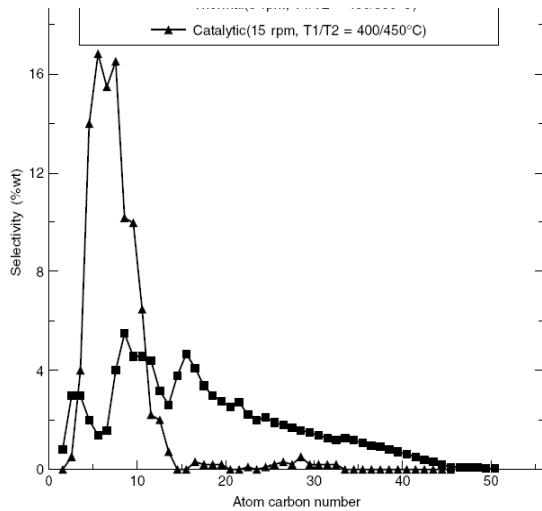
Hasil produk	Minyak (wt%)	Gas (wt%)	Residu (wt%)
Termal	84,00	13,00	3,00
ZSM-5 (powder)	35,00	63,50	1,50
Zeolit Y (powder)	71,5	27,00	1,50
Zeolit Y (pelet)	81,00	17,50	1,50
Mordenite (pelet)	78,50	18,50	3,00
Silika-alumina (powder)	78,00	21,00	1,00
Alumina (powder)	82,00	15,90	2,10

Sumber: Seo dkk. (2003).

Pelet zeolit Y mempunyai luas permukaan yang lebih kecil sehingga menghasilkan lebih banyak minyak dibandingkan dengan powder zeolit Y. Luas permukaan yang lebih besar dari katalis akan berkontribusi terhadap proses degradasi HDPE dan menghasilkan gas dan hidrokarbon rantai pendek yang lebih banyak. Silika alumina yang memiliki sifat asam menghasilkan 21% gas dan hanya 1% residu, sementara itu katalis alumina yang tidak mempunyai situs asam menghasilkan 15,90% gas dan 2,10% residu. Tingkat keasaman katalis akan sangat berpengaruh terhadap distribusi produk hasil pirolisis sampah plastik.

Pengaruh penggunaan katalis terhadap distribusi atom karbon menggunakan reaktor tipe ulir (*screw kiln*) dapat dilihat di gambar 4. Keberadaan katalis dapat memperbesar puncak selektivitas dan menggesernya ke atom karbon yang lebih kecil. Hal ini berarti bahwa penggunaan katalis dapat meningkatkan fraksi bensin (C_5-C_{12}) dan menurunkan fraksi solar ($C_{13}-C_{20}$) dan minyak berat ($>C_{20}$). Katalis juga dapat digunakan untuk memecah rantai *wax* yang biasanya muncul pada proses degradasi termal. Keberadaan *wax* di dalam minyak plastik akan sangat mengganggu karena akan membeku pada suhu yang rendah.

Mekanisme dari pirolisis katalitik sampah plastik telah dikembangkan oleh Buekens dan Huang (1998) menggunakan PE sebagai sampelnya sebagai berikut : i) inisiasi, dimana terjadi pada bagian cacat dari rantai polimer ; ii) depropagasi, dimana pada tahap ini berat molekul rantai polimer dapat dikurangi melalui reaksi dengan situs asam atau ion karbonium dan pembelahan rantai sehingga menghasilkan fraksi oligomer ; iii) isomerisasi, dimana ion karbonium akan mengalami penataan ulang oleh pergeseran atom hidrogen dan karbon yang menyebabkan isomerisasi ikatan rangkap olefin ; iv) aromatisasi, dimana terjadi reaksi siklisisasi pada ion karbonium.

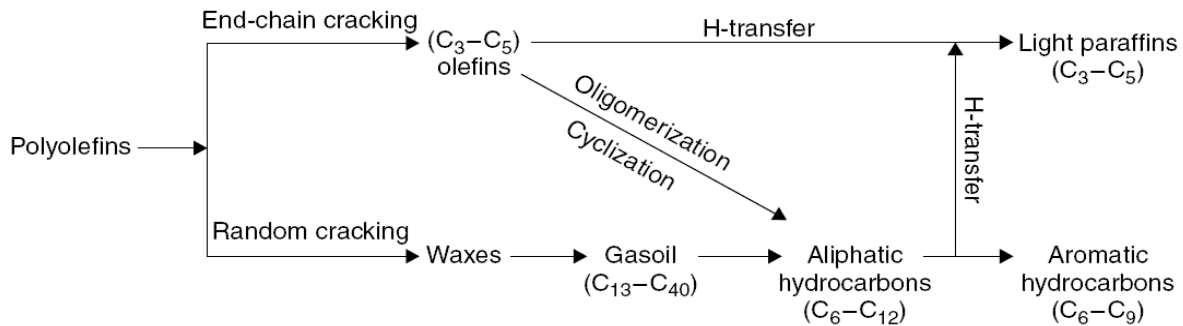


Gambar 4. Selektivitas jumlah atom karbon dari degradasi termal dan katalitik LDPE menggunakan reaktor tipe ulir (Lee, 2006)

Produk yang dihasilkan dari pirolisis katalitik sampah plastik akan sangat tergantung dari beberapa variabel. Kemungkinan produk yang dihasilkan dari pirolisis plastik jenis

poliolefin menggunakan katalis padat asam ditunjukkan oleh gambar 5. Reaksi yang terjadi pada proses ini utamanya adalah pemotongan secara random atau pada ujung rantai yang menghasilkan masing-masing wax dan distilasi menengah seperti bensin dan solar atau hidrokarbon ringan.

Namun demikian, metode ini memiliki beberapa kelemahan yang membuatnya sulit untuk diterapkan secara komersial. Yang pertama terkait dengan sulitnya mendapatkan kembali katalisnya setelah penggunaan yang berarti meningkatkan biaya operasional. Yang kedua, kontak langsung antara katalis dan plastik membuat katalis terdeaktivasi lebih cepat karena adanya pengotor di dalam sampah plastik seperti klorin, sulfur, dan nitrogen (Aguado dkk., 2007). Oleh karena itu, pemisahan antara reaksi pirolisis dengan reformasi katalitik menjadi pilihan metode yang tepat untuk mengatasi permasalahan tersebut.

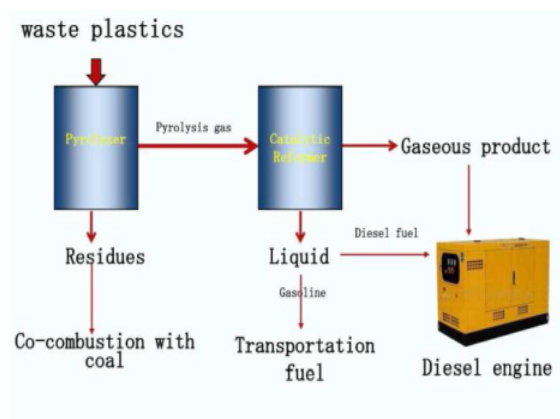


Gambar 5. Mekanisme pirolisis katalitik poliolefin menggunakan katalis padat asam (Aguado dkk., 2006)

PIROLISIS DAN REFORMASI KATALITIK

Metode pemisahan reaktor pirolisis dengan reformasi katalitik pertama kali diteliti oleh Bagri dan Williams (2002, 2004) untuk plastik jenis polietilen dan polistiren menggunakan katalis zeolit Y dan ZSM-5. Penggunaan katalis yang lain seperti silika alumina, Al-MCM-41 telah dilakukan oleh beberapa peneliti (Miguel dkk., 2009; Williams dan Bagri, 2004).

Analisis awal penggunaan metode ini untuk valorisasi sampah plastik telah dilakukan oleh Iribarren dkk. (2012). Dari perspektif energi dan lingkungan, hasilnya menunjukkan bahwa metode ini sangat cocok untuk diterapkan pada sampah plastik. Performa energi dari sistem ini telah dianggap tepat berdasarkan perhitungan dari permintaan energi kumulatif dan nilai rasio energinya.



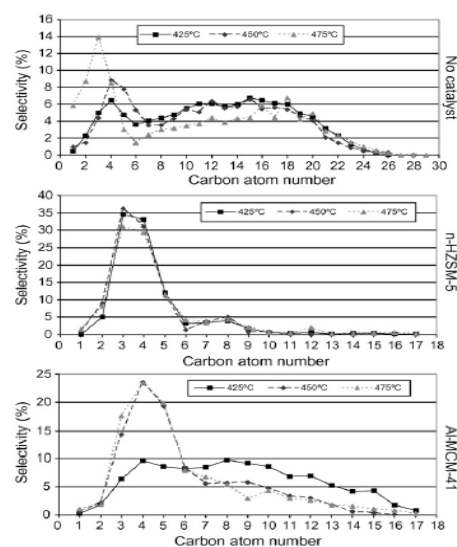
Gambar 6. Kombinasi pirolisis dan reformasi katalitik sampah plastik (Syamsiro dkk., 2014)

Metode ini juga telah dikembangkan di *Tokyo Institute of Technology* seperti ditunjukkan oleh gambar 6 (Syamsiro dkk., 2014). Produk utama dari sistem ini adalah minyak plastik dengan hasil sampingan berupa bahan bakar gas dan padat. Sistem ini terdiri dari dua buah reaktor yaitu reaktor pirolisis dan reaktor untuk reformasi katalitik. Gas pirolisis yang dihasilkan dari reaktor pertama diproses lebih lanjut di reaktor kedua yang di dalamnya berisi katalis sehingga akan terjadi proses perengkahan katalitik untuk mengubah gas pirolisis menjadi hidrokarbon rantai pendek. Gas hasil perengkahan kemudian dikondensasi untuk mendapatkan minyak plastiknya. Gas yang tidak terkondensasi akan menjadi bahan bakar gas yang dapat digunakan untuk pemanasan reaktor ataupun untuk bahan bakar pada mesin diesel sistem *dual fuel*. Di dalam reaktor pirolisis akan dihasilkan residu yang masih mempunyai nilai kalor yang cukup tinggi dan dapat digunakan sebagai bahan bakar untuk campuran batubara atau biomassa.

Syamsiro dkk. (2013, 2014) telah meneliti pirolisis sampah plastik menggunakan metode ini dengan katalis zeolit Y dan zeolit alam. Fraksi cair yang dihasilkan terdiri dari komponen bensin dan solar serta sebagian minyak berat. Komposisi fraksi gas didominasi oleh propana dan propena yang mengindikasikan bahwa produk gas yang dihasilkan setara gas LPG yang komponen utamanya adalah propana.

Penggunaan katalis zeolit alam menjadi sangat prospektif mengingat penggunaan katalis komersial mengakibatkan kenaikan biaya operasional produksi minyak dari sampah plastik. Namun demikian, zeolit alam harus dimodifikasi terlebih dahulu supaya layak menjadi katalis untuk perengkahan sampah plastik dengan metode kalsinasi, impregnasi maupun perlakuan asam.

Aguado dkk. (2007) juga telah melakukan penelitian distribusi atom karbon menggunakan metode ini untuk katalis HZSM-5 dan Al-MCM-41 dan hasilnya dapat dilihat di gambar 7. Penggunaan kedua katalis tersebut telah memodifikasi profil nomor karbon dengan kenaikan yang cukup signifikan pada fraksi gas dan penurunan fraksi solar dan minyak berat. Dari gambar 7 juga dapat dilihat bahwa katalis HZSM-5 menghasilkan fraksi ringan yang lebih banyak dibandingkan dengan katalis Al-MCM-41. Hal ini dapat dilihat dari puncak maksimumnya yang mencapai lebih dari 35%, sedangkan katalis Al-MCM-41 memiliki puncak yang kurang dari 25%. Struktur rangka, luas permukaan dan tingkat keasaman katalis berperan penting dalam proses perengkahan yang berdampak pada perbedaan distribusi atom karbonnya.



Gambar 7. Selektivitas produk hasil pirolisis dan reformasi katalitik LDPE (Aguado dkk., 2007)

Disamping sifat-sifat kimia dari minyak plastik, sifat fisik dari minyak plastik juga harus diteliti dalam kaitannya untuk aplikasi di mesin pembakaran dalam seperti mesin diesel dan bensin. Karakteristik fisik minyak plastik dan perbandingannya dengan solar ditunjukkan oleh tabel 3. Secara umum minyak plastik dapat digunakan untuk menggantikan bahan bakar solar di mesin diesel baik sebagai bahan bakar tunggal maupun campuran dengan solar. Nilai kalor yang tidak berbeda jauh menjadikan minyak plastik layak digunakan sebagai pengganti solar. Namun demikian, ada beberapa sifat yang harus diperbaiki untuk meningkatkan performanya.

Dari tabel 3 dapat dilihat bahwa viskositas kinematiknya lebih kecil dari solar. Viskositas akan sangat berpengaruh sekali terhadap atomisasi dan vaporisasi bahan bakar yang pada akhirnya berdampak pada konsumsi bahan bakar, emisi dan deposit pada mesin. Viskositas juga mempunyai peranan penting untuk pelumasan pada sistem injeksi bahan bakar. Viskositas yang terlalu rendah akan menyebabkan terjadinya kebocoran injektor dan kebutuhan pemompaan yang lebih besar.

Minyak plastik mempunyai titik tuang yang lebih tinggi dibandingkan dengan solar. Keberadaan minyak berat ataupun *wax* akan meningkatkan titik tuang minyak plastik. Hal ini menjadi catatan penting ketika menggunakannya di daerah dengan temperatur udara yang lebih rendah karena akan terjadi pembekuan bahan bakar. Pemrosesan lebih lanjut dengan distilasi dapat dilakukan untuk memisahkan *wax* sehingga nilai titik tuangnya dapat diturunkan mendekati spesifikasi yang ada pada bahan bakar solar. Titik nyala menjadi parameter penting bahan bakar dalam hal penyimpanan karena akan menentukan kemudahan bahan bakar tersebut menyala. Semakin rendah titik nyala mengakibatkan bahan bakar semakin mudah terbakar. Rendahnya titik nyala pada minyak plastik disebabkan oleh keberadaan fraksi ringan yang masih dijumpai pada minyak ini. Pemisahan fraksi ringan dapat dilakukan

untuk meningkatkan titik nyalanya.

Tabel 3: Karakteristik fisik minyak plastik dari hasil pirolisis sampah HDPE menggunakan beberapa katalis (Syamsiro, 2014).

Properties	units	Termal	Zeolit Y	Zeolit alam	Solar
Densitas @ 15°C	g/cm ³	0.8719	0.824	0.868	0.845
Viskositas kinematik @ 40°C	cSt	1.999	1.838	2.191	4.012
Titik nyala (flash point)	°C	<10	<10	<10	66.5
Titik tuang (pour point)	°C	27	24	24	6
Kandungan air	%vol	0.5	trace	trace	trace
Nilai kalor	MJ/kg	46.74	46.67	45.58	45.79

KESIMPULAN

Bahan bakar minyak dari sampah plastik mempunyai prospek ke depan yang baik untuk menggantikan bahan bakar konvensional seperti bensin dan solar. Dari hasil kajian literatur ini dapat disimpulkan bahwa penggunaan katalis untuk proses perengkahan sampah plastik berfungsi cukup efektif untuk memperbaiki karakteristik minyak plastik. Keberadaan katalis dapat meminimalisir produksi *wax* dan minyak berat yang biasanya dihasilkan pada proses pirolisis non katalis. Tiap-tiap katalis mempunyai struktur rangka, luas permukaan dan tingkat keasaman yang berbeda sehingga akan memberikan hasil distribusi atom karbon yang berbeda. Keberadaan katalis juga akan mengubah distribusi produk minyak, gas dan residu yang dihasilkan. Fungsi perengkahan dari katalis menyebabkan fraksi minyak berkurang sedangkan fraksi gas bertambah karena sebagian minyak akan dikonversi menjadi gas. Selain sifat kimia, sifat fisik minyak plastik juga sangat penting untuk aplikasi di mesin pembakaran dalam seperti mesin diesel dan bensin. Sifat-sifat ini akan berpengaruh terhadap performa dan emisi dari mesin yang menggunakan minyak plastik.

DAFTAR PUSTAKA

- Aguado, J., Serrano, D.P., San Miguel, G., Castro, M.C., Madrid, S., (2007). Feedstock recycling of polyethylene in a two-step thermo-catalytic reaction system. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 79, 415-423.
- Aguado, J., Serrano, D.P., Escola, J.M., (2006). Catalytic upgrading of plastic wastes. in: J. Scheirs (Ed.) Feedstock recycling and pyrolysis of waste plastics. John Wiley & Sons, West Sussex - UK, pp. 73-110.
- Aguado, J., Serrano, D.P., (1999). Feedstock recycling of plastic wastes. Royal Society of Chemistry, Cambridge, UK.
- Al-Salem, S.M., Lettieri, P., Baeyens, J., (2009). Recycling and recovery routes of plastic solid waste (PSW): A review. *Waste Management*, 29, 2625-2643.
- Bagri, R., Williams, P.T., (2002). Catalytic pyrolysis of polyethylene. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 63, 29-41.
- Borongan, G., Okumura, S., (2010). Municipal waste management report : Status-quo and issues in Southeast and East Asian Countries. United Nations Environment Programme, Regional Resource Center for Asia and the Pacific (AIT/UNEP RRC.AP), Pathumthani-Thailand.
- Buekens, A.G., Huang, H., (1998). Catalytic plastics cracking for recovery of gasoline-range hydrocarbons from municipal plastic wastes. *Resources, Conservation and Recycling*, 23, 163-181.
- EPA, (2013). Municipal solid waste generation, recycling and disposal in the United States : Facts and figures for 2012. United States Environmental Protection Agency, Washington.
- Iribarren, D., Dufour, J., Serrano, D., (2012). Preliminary assessment of plastic waste valorization via sequential pyrolysis and catalytic reforming. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 14, 301-307.
- Lee, K.-H., (2009). Thermal and catalytic degradation of pyrolytic oil from pyrolysis of municipal plastic wastes. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 85, 372-379.
- Lee, K.-H., (2006). Thermal and catalytic degradation of waste HDPE. in: J. Scheirs (Ed.) Feedstock recycling and pyrolysis of waste plastics. John Wiley & Sons, West Sussex - UK, pp. 73-110.
- Miguel, G.S., Serrano, D.P. and Aguado, J. (2009) Valorization of waste agricultural polyethylene film by sequential pyrolysis and catalytic reforming, *Ind. Eng. Chem. Res.*, 48:8697-8703.
- Miskolczi, N., Bartha, L., DeÁjk, G., Já³ver, B., (2004). Thermal degradation of municipal plastic waste for production of fuel-like hydrocarbons. *Polymer Degradation and Stability*, 86, 357-366.
- Murata, K., Brebu, M. and Sakata, Y., (2010) The effect of silica-alumina catalysts on degradation of polyolefins by a continuous flow reactor, *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 89:30-38.
- Seo, Y.H., Lee, K.H. and Shin, D.Y. (2003) Investigation of catalytic degradation of high-density polyethylene by hydrocarbon group type analysis, *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 70: 383-398.
- Syamsiro, M., (2015). Effect of catalytic reforming on pyrolytic oil production from waste plastics, Ph.D thesis, Tokyo Institute of Technology, Japan.
- Syamsiro, M., Cheng, S., Hu, W., Saptoadi, H., Pratama, N.N., Trisunaryanti, W., Yoshikawa, K., (2014). Liquid and Gaseous Fuels from Waste Plastics by Sequential Pyrolysis and Catalytic Reforming Processes over Indonesian

- Natural Zeolite Catalysts. *Waste Technology*, 2(2), 44-51.
- Syamsiro, M., Saptoadi, H., Norsujianto, T., Noviasri, P., Cheng, S., Zainal, Z.A., Yoshikawa, K., (2014). Fuel Oil Production from Municipal Plastic Wastes in Sequential Pyrolysis and Catalytic Reforming Reactors, *Energy Procedia* 47, pp. 180-188.
- Syamsiro, M., W. Hu, S. Komoto, S. Cheng, P. Noviasri, P. Prawisudha, K. Yoshikawa, (2013). Co-production of liquid and gaseous fuels from polyethylene and polystyrene in a continuous sequential pyrolysis and catalytic reforming system, *Energy and Environment Research*, Vol. 3 No. 2: 90-106.
- Uddin, M.A., Koizumi, K., Murata, K., Sakata, Y., (1997). Thermal and catalytic degradation of structurally different types of polyethylene into fuel oil. *Polymer Degradation and Stability*, 56, 37-44.
- Walendziewski, J., Steininger, M.A., (2001). Thermal and catalytic conversion of waste polyolefines. *Catalysis Today*, 65, 323-330.
- Williams, P.T., Bagri, R., (2004). Hydrocarbon gases and oils from the recycling of polystyrene waste by catalytic pyrolysis. *International Journal of Energy Research*, 28, 31-44.
- Xingzhong, Y., (2006). Converting waste plastics into liquid fuel by pyrolysis: Developments in China. in: J. Scheirs, W. Kaminsky (Eds.), *Feedstock recycling and pyrolysis of waste plastics*. John Wiley & Sons, West Sussex, UK, pp. 729-755.