



Potensi Limbah Plastik sebagai Sumber Energi Terbarukan Menggunakan Proses Degradasi Termal dan Katalitik

The Potential of Plastic Waste as a Renewable Energy Source Using Thermal and Catalytic Degradation Processes

Prabuditya Bhisma Wisnu Wardhana^{1,a)}, Agung Fauzi Hanafi¹, Asmar Finali¹, Mega Lazuardi Umar¹

¹Program Studi Teknik Mesin Politeknik Negeri Banyuwangi

^{a)}Corresponding author: prabuditya@poliwangi.ac.id

Abstrak

Limbah plastik membutuhkan waktu lama untuk terurai secara alami dikarenakan laju degradasinya yang lambat. Pemusnahan sampah plastik akibat pembakaran pada suhu tinggi dapat menimbulkan bahaya. Tujuan dari penelitian ini adalah melakukan pengolahan limbah plastik menjadi sumber energi terbarukan untuk mendukung kebutuhan energi. Bahan baku dari penelitian ini adalah limbah plastik polietilen. Degradasi termal mampu mengkonversi sekitar 65% minyak, 26% gas yang tidak bisa dikondensasi, dan 9% produk padat yang berupa arang limbah plastik (*char*). Sedangkan pada proses degradasi menggunakan katalis zeolit alam mampu menghasilkan 59% minyak, 36% gas dan 5% *char*. Degradasi termal dan katalitik mampu menghasilkan produk minyak yang memiliki kecenderungan mirip dengan sebaran karbon pada biosolar. Penggunaan katalis menurunkan kuantitas fraksi sedang (C_{12} - C_{22}) dan meningkatkan kuantitas fraksi ringan (C_4 - C_{11}). Penggunaan katalis zeolit alam mempengaruhi distribusi produk (cair, gas, padat), distribusi senyawa karbon, distribusi kelompok senyawa hidrokarbon dan sifat minyak dari limbah plastik. Penggunaan katalis zeolit alam juga menurunkan kuantitas senyawa karbon fraksi sedang (C_{12} - C_{22}) yang cenderung setara dengan biosolar dan fraksi berat ($>C_{23}$) yang cenderung setara dengan parafin atau aspal, namun meningkatkan kuantitas fraksi ringan (C_4 - C_{11}) yang cenderung setara dengan bensin.

Kata Kunci: limbah plastik; degradasi; katalis; termal; bahan bakar

Abstract

Plastic waste takes tens to hundreds of years to decompose naturally due to its slow degradation rate. Plastic waste removal by burning at high temperatures can cause pollution problems. The purpose of this research is to process plastic waste into a renewable energy source to support energy needs. Polyethylene plastic was used in this study/research. Thermal degradation was able to convert about 65% of oil products, 26% of the gas that cannot be condensed, and 9% of solid products in the form of solid product (*char*). The degradation process using natural zeolite catalysts is able to produce 59% oil, 36% gas and 5% *char*. Thermal and catalytic degradation were able to produce oil products that have a characteristic similar to the distribution of carbon in biodiesel. The use of a catalyst decreased the quantity of the medium fraction (C_{12} - C_{22}) and increased the quantity of the light fraction (C_4 - C_{11}). The use of natural zeolite catalysts affected the distribution of products (liquid, gas, solid), distribution of carbon compounds, distribution of hydrocarbon compounds and the liquid sifat of plastic waste. By using the natural zeolite catalysts, the number of carbon compounds was reported (i) the light fraction (C_4 - C_{11}) tends to be equivalent to gas, (ii) the moderate fraction (C_{12} - C_{22}) tends to be equivalent to biodiesel, and (iii) the heavy fraction tends to be equivalent to paraffin or asphalt.

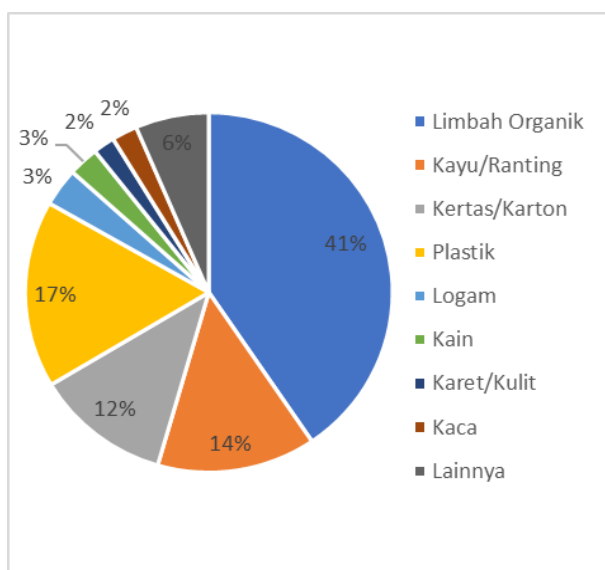
Keywords: plastic waste; degradation; catalyst; thermal; fuel

PENDAHULUAN

Permasalahan krusial di Indonesia dewasa ini adalah kekurangan suplai energi, terutama bahan bakar minyak. Pertambahan penduduk yang tinggi dan perkembangan industri yang pesat telah menyebabkan meningkatnya konsumsi bahan bakar. Di lain sisi, produksi bahan bakar minyak dalam negeri juga mengalami penurunan. Hal ini dikarenakan persediaan minyak yang ada di sumur produksi semakin berkurang, sehingga tidak lagi memenuhi kebutuhan suplai bahan bakar dalam negeri [1].

Di satu sisi, persoalan sampah juga menjadi isu penting dalam masyarakat akhir-akhir ini. Permasalahan yang umum terjadi adalah tempat pembuangan akhir sampah memiliki keterbatasan lahan, dan timbunan sampah meningkat. Akibat permasalahan tersebut, terdapat kecenderungan pembuangan limbah yang tidak tepat. Salah satu sampah yang bermasalah adalah sampah plastik.

Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan Republik Indonesia mengemukakan bahwa limbah plastik merupakan limbah terbesar kedua setelah limbah organik di Indonesia. Sesuai dengan ilustrasi pada Gambar 1. berikut, limbah plastik menyumbang 16% dari total limbah di Indonesia pada tahun 2020. Limbah plastik sebagian besar berasal dari botol air mineral, plastik kemasan makanan dan kemasan plastik lainnya. Limbah plastik memerlukan waktu bertahun-tahun untuk bisa terurai secara alami di tanah [2].



Gambar 1. Persentase Limbah di Indonesia [3]

Plastik merupakan makromolekul yang dibentuk dengan proses polimerisasi, yaitu proses peleburan

beberapa molekul sederhana atau biasa disebut monomer menjadi polimer melalui proses kimiawi [4].

Sejalan dengan peningkatan populasi dunia, konsumsi produk plastik juga meningkat. Produk plastik lebih ringan tetapi lebih kuat, ketahanan korosi yang baik, transparansi dan pewarnaan yang mudah, serta proses pembuatan yang lebih murah. Jenis plastik yang banyak digunakan adalah polietilen. Plastik ini digunakan sebagai kemasan bahan makanan. Saat ini, sampah plastik jenis *Low Density Polyethylene* banyak dibuang tempat pembuangan sampah. Pada saat yang sama, sampah yang lain dibakar dan hanya sebagian kecil saja yang didaur ulang. Perlakuan semacam ini tidak menghilangkan masalah. Pengolahan sampah plastik dengan cara dibakar pada temperatur tinggi dapat menimbulkan masalah pencemaran karena menghasilkan karsinogen berbahaya seperti *polychlorinated dibenzodioxins* dan *polychlorinated dibenzofurans* [5].

Saat ini proses daur ulang sangat populer, sampah plastik akan diolah kembali menjadi bahan baku plastik yang kualitasnya di bawah standar awalnya. Namun kapasitas daur ulang plastik terbatas, sehingga kualitasnya rendah dan dinilai tidak efisien. Perlu dipertimbangkan upaya lain untuk mengolah limbah plastik menjadi material lain yang lebih bernilai, contohnya adalah bahan bakar sintetis yang dapat menggantikan bahan bakar konvensional. Solusi ini sangat mungkin dilakukan karena bahan baku plastik berasal dari minyak bumi. Nilai kalor plastik sangat tinggi, diketahui mencapai 40 MJ/kg, yang mana nilai ini hampir setara dengan bahan bakar bensin dan solar [6].

Proses konversi sampah plastik menjadi bahan bakar dilakukan pada temperatur tinggi, sehingga disebut proses degradasi termal atau proses pirolisis. Penelitian menyebutkan bahwa pengolahan limbah polimer/plastik bisa dilakukan dengan metode degradasi termal maupun katalitik menggunakan *fixed bed reactor* [7].

Perkembangan penelitian menggunakan katalis terutama zeolit alam sangat masif dilakukan oleh beberapa peneliti. Hasil penelitian pirolisis plastik menggunakan katalis zeolit alam menunjukkan bahwa produk akhir yang dihasilkan sangat bervariasi. Penelitian serupa menyatakan bahwa penggunaan katalis zeolit alam dapat mempengaruhi tingkat kejernihan dan viskositas minyak hasil pirolisis [8]. Proses pirolisis dengan katalis zeolit alam pada rentang suhu 350-400°C meningkatkan *yield* produk cair dan menghasilkan minyak dengan fraksi *gasoline* [9]. Penggunaan katalis zeolit alam pada pirolisis plastik mampu menurunkan temperatur proses dan menghasilkan produk hidrokarbon yang mendekati karakteristik bahan bakar bensin [10].

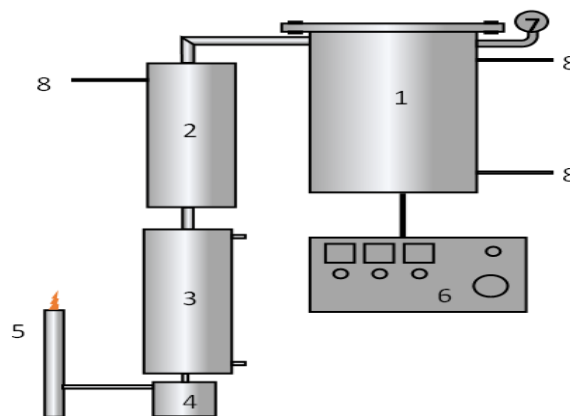
Proses pirolisis katalitik menggunakan zeolit alam mampu menurunkan kebutuhan energi dan waktu reaksi dibandingkan dengan pirolisis termal serta mampu memperbaiki kualitas dan kuantitas produk yang dihasilkan [11]. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui pengaruh penggunaan katalis zeolit alam terhadap distribusi produk dari pirolisis limbah plastik serta menjadikan limbah plastik menjadi sumber energi terbarukan untuk mendukung kebutuhan energi masyarakat.

METODE PENELITIAN

Bahan baku dari riset ini adalah sampah plastik polietilen yang didapatkan dari limbah rumah tangga. Setelah limbah plastik tersebut dikumpulkan, kemudian dibersihkan, dijemur hingga kering dan dicacah hingga berukuran $\pm 2 \times 2$ cm. Cacahan plastik sejumlah 1500 gram tersebut kemudian dimasukkan ke dalam reaktor untuk dipanaskan hingga temperatur 450°C dengan durasi proses selama ± 240 menit.

Pada penelitian ini menggunakan reaktor dengan pemanas listrik dengan harapan temperatur operasi bisa dijaga kestabilannya. Katalis yang digunakan adalah zeolit alam sejumlah 200 gram yang di dapatkan dari daerah Klaten, Jawa Tengah. Sebelum digunakan, katalis zeolit alam ini dipanaskan pada temperatur $\pm 200^\circ\text{C}$ selama 30 menit. Hal ini bertujuan agar pori-pori katalis terbuka dan untuk membersihkan kotoran yang masih melekat di katalis. Katalis ini juga dipanaskan hingga temperatur 450°C untuk mengaktifkan proses perengkahan katalitik. Gas dari limbah plastik kemudian dialirkan ke dalam kondenser berpendingin air yang tersirkulasi. Aliran air ini untuk menjaga temperatur operasi air sesuai dengan kondisi operasi yang optimal. Gas yang terkondensasi kemudian ditampung pada wadah/gelas ukur untuk mengetahui kualitas cairan. Gas yang tidak terkondensasi dinyalakan oleh api atau di proses dengan *water trap* untuk mengurangi polusi udara. Setelah gas terlihat mulai berkurang dan tetesan minyak tidak ada lagi, proses pengolahan diakhiri.

Peralatan uji yang serupa juga pernah dibuat dengan merencanakan reaktor dengan kapasitas 4 kg dan temperatur pemanasan $\pm 300^\circ\text{C}$ menggunakan pemanas dari tungku LPG [7]. Setelah itu fraksi cair dan padat di timbang. Jumlah fraksi gas dapat dicari dengan mencari selisih nilai dari massa produk cair dan padat. Produk cair hasil pengolahan kemudian dianalisis di laboratorium untuk mengetahui karakteristik dan kandungan kimianya. Skema alat dapat dilihat pada [Gambar 2](#). berikut.



Gambar 2. Skema alat penelitian

Keterangan :

1. Reaktor pirolisis
2. Reaktor katalis
3. Kondenser
4. Penampung minyak
5. Flare
6. Kontrol temperatur
7. Pressure Gauge
8. Termokopel

HASIL DAN PEMBAHASAN

Produk hasil proses degradasi termal dan katalitik limbah plastik polietilen dianalisa tentang distribusi produk atau kesetimbangan massa produk yang dihasilkan, sebaran senyawa karbon, distribusi senyawa hidrokarbon dan sifat dari produk cair yang dihasilkan. Analisa distribusi produk akan menjelaskan tentang bagaimana proses pengolahan dari sampah plastik menjadi produk lain yang berupa minyak, *char* dan gas. Analisa ini bertujuan agar dapat memberikan representasi tentang efektivitas pengolahan sampah plastik menjadi bahan bakar alternatif. Analisis berikutnya adalah sebaran senyawa karbon dari minyak limbah plastik yang kemudian akan dibandingkan dengan biosolar pertamina. Analisa data selanjutnya adalah distribusi kelompok senyawa hidrokarbon yang menjelaskan tentang senyawa parafin, olefin, naftan dan aromatik. Analisis yang terakhir adalah tentang sifat minyak limbah plastik.

Distribusi Produk Hasil Pengolahan

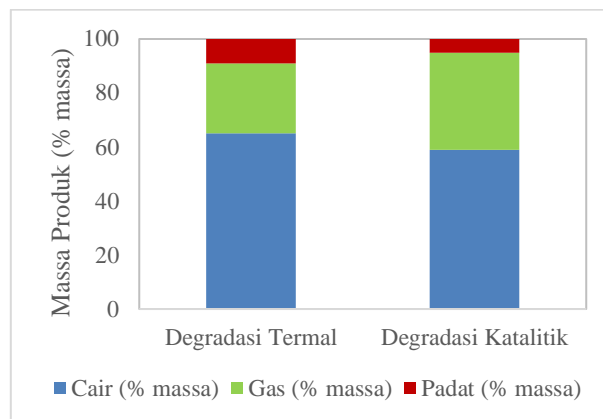
Distribusi produk hasil degradasi termal dan katalitik limbah plastik pada temperatur 450°C ditunjukkan pada [Gambar 3](#). Proses pirolisis dengan temperatur operasi $\pm 450^\circ\text{C}$ mampu menghasilkan bahan bakar minyak kurang lebih 60 % dari total massa bahan baku limbah plastik [12]. Penelitian ini mampu mengkonversi sekitar 65% produk cair atau minyak, 26% gas yang tidak bisa

dikondensasi, dan 9% produk padat yang berupa arang limbah plastik (*char*). Sedangkan pada proses degradasi menggunakan katalis zeolit alam mampu menghasilkan 59% minyak, 36% gas dan 5% *char*.

Dari distribusi produk ini menunjukkan bahwa penggunaan katalis zeolit alam menurunkan kuantitas produk cair dan meningkatkan kuantitas produk gas. Degradasi katalitik ini mengakibatkan hidrokarbon rantai panjang terpecah menjadi hidrokarbon dengan ikatan rantai yang lebih pendek. Mekanisme ini menyebabkan peningkatan komponen molekular yang lebih kecil (gas) dan menurunkan komponen molekular yang lebih besar (cair). Pada penelitian lain juga menyebutkan bahwa penggunaan katalis zeolit alam menurunkan kuantitas minyak dan meningkatkan kuantitas gas [13]. Penambahan katalis pada proses degradasi limbah plastik juga cenderung meningkatkan kualitas dari produk cair dengan mengubah komposisi kimia dari minyak limbah plastik tersebut. Peneliti lain juga mengemukakan bahwa peningkatan kuantitas massa katalis zeolit alam menghasilkan produk cair yang lebih sedikit namun meningkatkan kuantitas produk gas secara signifikan [14]. Peneliti tersebut menyampaikan bahwa degradasi termal menghasilkan 61,25 % minyak dan 26,5 % gas, penggunaan katalis 100 gram menghasilkan 56,75 % minyak dan 38,60 % gas, penggunaan katalis sebesar 200 gram menghasilkan 44,75 % minyak dan 49,15 % gas dan penggunaan katalis sebanyak 300 gram menghasilkan 30,05 % minyak dan 57,45 % gas.

Persentase Senyawa Karbon

Distribusi senyawa karbon dijelaskan pada Gambar 4. Kualitas dari produk minyak hasil pirolisis dapat dilihat dari distribusi atau sebaran nomor atom karbon [13]. Terdapat tiga kelompok ikatan fraksi rantai karbon, yaitu kelompok pertama (C_4-C_{11}) yang mewakili fraksi ringan yang lebih cenderung setara dengan fraksi bensin. Kelompok kedua ($C_{12}-C_{20}$) yang mewakili fraksi sedang yang lebih cenderung setara dengan biosolar dan kelompok ketiga ($>C_{23}$) yang mewakili fraksi berat yang cenderung setara dengan parafin, lilin dan aspal. Data ini dimaksudkan untuk mengetahui pola distribusi senyawa karbon dari minyak limbah plastik yang akan dibandingkan dengan biosolar. Degradasi termal dan katalitik mampu menghasilkan produk minyak yang memiliki kecenderungan mirip dengan sebaran karbon pada biosolar. Dimana degradasi termal menghasilkan fraksi karbon ringan yang lebih sedikit dibandingkan dengan degradasi katalitik.

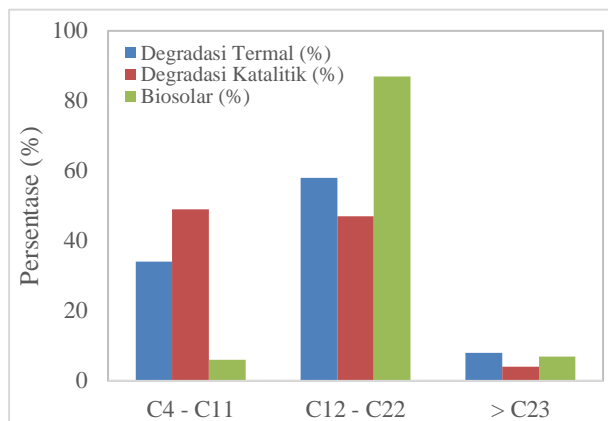


Gambar 3. Distribusi Produk Perengkahan Limbah Plastik

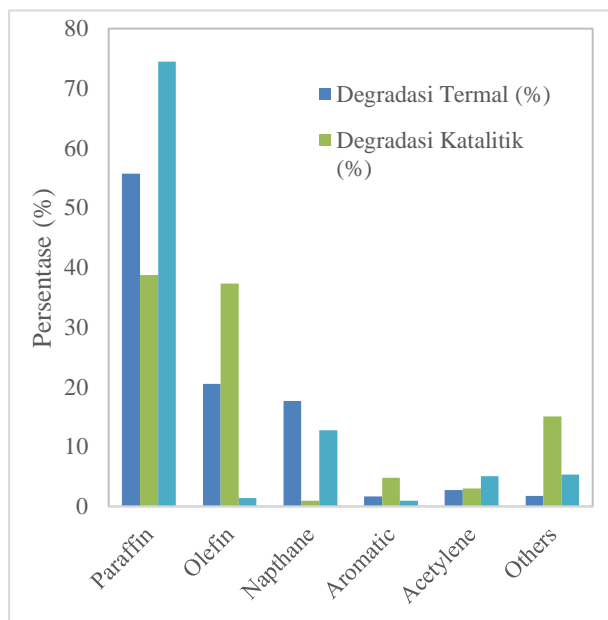
Penggunaan katalis menurunkan kuantitas fraksi sedang ($C_{12}-C_{22}$) dan meningkatkan kuantitas fraksi ringan (C_4-C_{11}). Hal ini dikarenakan penggunaan katalis mampu memutus rantai fraksi panjang menjadi lebih pendek. Jika kita menginginkan produk cair (minyak) yang cenderung mirip ke biosolar maka disarankan melakukan proses degradasi termal tanpa katalis. Dari hasil penelitian tersebut menjelaskan bahwa katalis berpengaruh terhadap produk minyak yang dihasilkan. Fungsi katalis selain mempercepat proses degradasi juga mampu mengarahkan proses ke distribusi produk yang kita kehendaki. Pada kasus ini katalis zeolit alam mengarahkan produk lebih cenderung ke produk fraksi rantai karbon ringan yang kurang lebih setara dengan bensin dibandingkan dengan proses degradasi termal yang lebih mengarahkan produk cenderung ke fraksi sedang yang setara dengan biosolar seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.

Sebaran Kelompok Senyawa Hidrokarbon

Penetapan senyawa hidrokarbon didasarkan pada rumus dasar dari setiap senyawa hidrokarbon, seperti *Naphane* ($Cyclo C_nH_{2n}$), *Olefin* (C_nH_{2n}), *Paraffin* (C_nH_{2n+2}), *Aromatic* (C_nH_{2n-6} dan C_nH_n) dan *Acetylene* (C_nH_{2n-2}) [15]. Kandungan unsur hidrokarbon yang terdapat pada sampel minyak pirolisis dan biosolar diteliti menggunakan metode GCMS (*Gas Chromatography Mass Spectroscopy*). Pengujian GCMS ini menghasilkan data berupa kandungan senyawa beserta jumlahnya dalam setiap sampel uji. Hasil pengujian menunjukkan bahwa minyak hasil degradasi termal dan katalitik menghasilkan unsur hidrokarbon yang bervariasi. Hasil riset menyatakan bahwa degradasi termal menghasilkan fraksi parafin lebih banyak dibandingkan fraksi yang lain. Penggunaan katalis zeolit alam menurunkan kuantitas fraksi parafin dan meningkatkan kuantitas fraksi olefin seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5.



Gambar 4. Sebaran Ikatan Rantai C (Karbon)



Gambar 5. Distribusi Senyawa Hidrokarbon

Sifat Produk Minyak Hasil Pirolisis

Analisa menyebutkan bahwa minyak limbah plastik memiliki sifat yang cenderung serupa dengan sifat biosolar atau bahan bakar mesin diesel seperti yang ditunjukkan pada Tabel 1. Hal ini juga sesuai dengan yang dilakukan peneliti terdahulu yang menyebutkan bahwa sifat fisik dari minyak limbah plastik menunjukkan densitas yang lebih kecil daripada bahan bakar diesel [16]. Viskositas kinematik adalah perbandingan antara viskositas dinamik dengan kerapatan fluida. Dimana viskositas dinamik adalah properti fluida yang menghubungkan antara gerakan fluida dengan tegangan geser [17]. Dengan kata lain viskositas merupakan ukuran hambatan minyak untuk mengalir atau fraksi intenal [18].

Hasil pengujian dari viskositas kinematis juga menunjukkan bahwa minyak hasil degradasi limbah plastik lebih rendah dibandingkan dengan biosolar. Harapannya, jika minyak limbah plastik ini digunakan sebagai campuran biosolar untuk bahan bakar mesin diesel maka akan mengurangi viskositas campuran bahan bakar secara signifikan dan berujung pada meningkatnya performa mesin. Nilai viskositas kinematis dari minyak hasil degradasi termal masih berada dalam kisaran standar yang diperbolehkan oleh ESDM, namun viskositas minyak hasil degradasi katalitik dengan zeolit alam berada jauh dibawah dari standar yang ditetapkan yaitu 2,0 – 4,5 mm²/s [19]. Titik tuang dari minyak limbah plastik lebih tinggi dibandingkan dengan biosolar, hal ini akan mengakibatkan bahan bakar akan lebih cepat membeku menjadi *wax* pada temperatur ruang jika tidak dipanaskan.

Hal ini perlu mendapat sedikit perhatian, jika akan melakukan pencampuran minyak limbah plastik dengan biosolar. Dari data tersebut dapat disimpulkan bahwa penggunaan katalis zeolit alam akan menaikkan densitas minyak namun menurunkan viskositas kinematis. Nilai viskositas kinematis yang rendah akan menyebabkan minyak lebih mudah dan cepat mengalir dibandingkan dengan biosolar sehingga akan mempermudah proses suplai bahan bakar dari tangki ke *combustion chamber* mesin. Hal ini disebabkan karena semakin kecil nilai viskositas kinematisnya menyebabkan nilai gaya gesek antara fluida dan permukaan akan semakin menurun.

Katalis zeolit alam juga berperan dalam menurunkan titik tuang minyak dibandingkan dengan degradasi termal. Nilai titik tuang yang rendah akan membuat minyak tidak mudah membeku membentuk *wax* jika disimpan pada temperatur ruang. Namun nilai titik tuang minyak hasil degradasi limbah plastik berada jauh di atas standar yang ditentukan. Nilai maksimal yang diperbolehkan untuk titik tuang bahan bakar diesel adalah 18°C [19]. Minyak hasil degradasi limbah plastik untuk semua sampel bisa menyala pada temperatur 10°C.

Titik nyala minyak limbah plastik memiliki nilai yang lebih kecil dibandingkan dengan titik nyala biosolar (55°C). Titik nyala (*flash point*) berkaitan dengan masalah keamanan, distribusi dan penyimpanan. Dengan titik nyala yang rendah (<25°C@1atm), minyak limbah plastik bersifat lebih mudah terbakar. Beberapa sumber pengapian bahan bakar yang perlu dihindari seperti permukaan dinding yang panas, gesekan fluida dan dinding, gas atau uap yang gampang terbakar, arus listrik, serta sumber pengapian yang lainnya. Nilai titik nyala minyak limbah plastik berada jauh dibawah standar dari Dirjen Migas [19].

Nilai kandungan air minyak pirolisis masih tinggi berkisar antara 0,9–1,6% vol. Hal ini dapat disebabkan karena adanya sebagian uap air yang menguap dalam reaktor tidak dapat keluar sehingga terkondensasi di dalam penampung minyak. Uap air ini muncul akibat dari penggunaan bahan baku limbah plastik yang masih lembab. Kandungan air minyak pirolisis masih cukup besar jika dibandingkan dengan kandungan air biosolar yang dipersyaratkan. Kandungan abu (*ash content*) pada minyak pirolisis bervariasi. Tingginya kandungan abu pada minyak sampah plastik diakibatkan oleh tingginya kadar *char* hasil dari pirolisis, sebagian *char* ini kemudian terbawa dalam saluran hingga menuju penampung minyak.

Tabel 1. Sifat Produk Cair

No	Karakteristik	Satuan	Termal	Katalitik	Solar
1	Specific gravity at 60/60°F	-	0,8052	0,8137	0,8445
2	Viskositas kinematis pada 40°F	mm ² /s	2,438	1,639	4,012
3	Titik nyala	°C	*)	*)	(min) 55
4	Titik tuang	°C	33	21	3
5	Titik awan	°C	**)	**)	4
6	Kand. air	% vol	0,9	Trace	Trace
7	Kand. abu	% vol	0,004	-	0,076

Keterangan :

*) pada temperatur 10°C sudah menyala

***) titik awan tidak dapat diamati, sampel berwarna gelap

PENUTUP

Kesimpulan

Proses degradasi termal dan katalitik dapat diaplikasikan untuk mengkonversi sampah plastik menjadi bahan bakar alternatif. Penggunaan katalis zeolit alam mempengaruhi distribusi produk (cair, gas, padat), distribusi senyawa karbon, distribusi kelompok senyawa hidrokarbon dan sifat minyak dari limbah plastik. Penggunaan katalis zeolit alam menurunkan kuantitas minyak dan *char* namun meningkatkan kuantitas gas. Penggunaan katalis zeolit alam juga menurunkan kuantitas fraksi senyawa karbon sedang (C₁₂-C₂₂) yang lebih setara dengan biosolar dan fraksi senyawa karbon berat (>C₂₃) yang cenderung setara dengan parafin atau aspal. Katalis zeolit alam mampu meningkatkan kuantitas fraksi senyawa karbon ringan (C₄-C₁₁) yang cenderung setara dengan bensin. Proses degradasi termal dan katalitik menghasilkan kuantitas viskositas kinematis yang lebih rendah dibandingkan dengan biosolar, namun menghasilkan kuantitas nilai titik tuang yang lebih tinggi dibandingkan dengan biosolar.

Saran

Saran untuk penelitian selanjutnya adalah penggunaan berbagai macam katalis, baik berupa katalis alam ataupun katalis buatan, beserta pengaruh massa katalis terhadap *yield* minyak pirolisis. Karena menurut beberapa penelitian menyatakan bahwa jenis dan massa katalis berpengaruh terhadap produk minyak yang dihasilkan.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] R. P. Liestiono, M. S. Cahyono, W. Widyawidura, A. Prasetya and M. Syamsiro, "Karakteristik Minyak dan Gas Hasil Proses Dekomposisi Termal Plastik Jenis Low Density Polyethylene (LDPE)," *Jurnal OFFSHORE*, pp. 1-9, 2017.
- [2] A. Susastriawan, Purnomo and A. Sandria, "Experimental study the influence of zeolite size on low-temperature pyrolysis of low-density polyethylene plastic waste," *Thermal Science and Engineering Progress*, pp. 1-5, 2020.
- [3] MENLHK, "Sistem Informasi Pengelolaan Sampah Nasional," 28 Maret 2021. [Online]. Available: <http://sipsn.menlhk.go.id/sipsn/public/data/komposisi>.
- [4] U. B. Surono and Ismanto, "Pengolahan Sampah Plastik Jenis PP, PET dan PE Menjadi Bahan Bakar Minyak dan Karakteristiknya," *Jurnal Mekanika dan Sistem Termal*, pp. 32-37, 2016.
- [5] R. Ermawati, "Konversi Limbah Plastik sebagai Sumber Energi Alternatif," *Jurnal Riset Industri*, pp. 257-263, 2011.
- [6] Syamsiro and Arbiyantoro, "Pengolahan Sampah Plastik dari TPA Piyungan menjadi Bahan Bakar Minyak," *Jurnal Riset Daerah*, pp. 1-9, 2014.
- [7] P. B. W. Wardhana, A. Finali and A. F. Hanafi, "Pengembangan Reaktor Pirolisis Termal Limbah Plastik Skala Laboratorium," *Jurnal Teknik Mesin - Elemen*, pp. 39-44, 2020.
- [8] Y. P. Anggono, N. Ilminnafik, A. A. Rosyadi and G. Jatisukamto, "Pengaruh katalis zeolit alam pada pirolisis plastik polyethylene terephthalate dan polypropylene," *Jurnal Energi dan Manufaktur*, pp. 22-27, 2020.
- [9] J. Waluyo, A. P. Perkasa and D. Ramadhana, "Pirolisis Sampah Plastik HDPE sebagai Alternatif Pengganti Kerosin/Gasolin dengan Menggunakan Katalis Zeolit Alam," *EQUILIBRIUM*, pp. 33-40, 2019.

- [10] R. Pratiwi and W. Dahani, "Pengaruh Penggunaan Katalis Zeolit Alam Dalam Pirolisis Limbah Plastik Jenis Hdpe Menjadi Bahan Bakar Cair Setara Bensin," in *Seminar Nasional Sains dan Teknologi*, Jakarta, 2015.
- [11] M. Syamsiro, "Kajian Pengaruh Penggunaan Katalis Terhadap Kualitas Produk Minyak Hasil Pirolisis Sampah Plastik," *Jurnal Teknik*, pp. 47-56, 2015.
- [12] P. B. W. Wardhana and H. Saptoadi, "Konversi Limbah Plastik Polietilen menjadi Bahan Bakar dengan Metode Pirolisis," *DISPROTEK*, pp. 1-4, 2016.
- [13] M. Syamsiro, Z. Mufrodi, R. Rafly and S. Machmud, "Energy Recovery from Food Packaging Plastics by Thermal and Catalytic Pyrolysis Processes," *Universal Journal of Mechanical Engineering*, pp. 51-58, 2020.
- [14] S. D. Kurniawan and H. Saptoadi, "Pengaruh Massa Katalis Zeolit Alam pada Proses Pirolisis Limbah Plastik Low Density Polyethylene (LDPE)," *Jurnal Teknologi TECHNOSCIENTIA*, pp. 81-85, 2016.
- [15] M. Mathur and R. Sharma, *Internal Combustion Engine*, New Delhi: Dhanpat Rai Publications, 2014.
- [16] R. Singh, B. Ruj, A. Sadhukhan, P.Gupta and V. Tigga, "Waste plastic to pyrolytic oil and its utilization in CI engine: Performance analysis and combustion characteristics," *FUEL*, pp. 1-10, 2019.
- [17] B. R. Munson, D. F. Young and T. H. Okiishi, *Mekanika Fluida*, Jakarta : Erlangga, 2003.
- [18] Istadi, *Teknologi Katalis untuk Konversi Energi - Fundamental dan Aplikasi*, Yogyakarta: Graha Ilmu, 2011.
- [19] D. j. M. d. G. B. K. E. d. S. D. M. R. I. ESDM, "Migas ESDM," 03 Desember 2020. [Online]. Available: <https://migas.esdm.go.id/uploads/regulasi/regulasi-kkkl/2020/146.K-10-DJM-2020.pdf>.
- [20] S. D. Kurniawan and H. Saptoadi, "Pengaruh Massa Katalis Zeolit Alam Pada Proses Pirolisis Limbah Plastik Low Density Polyethylene (LDPE)," *Jurnal Teknologi Technosciantia*, pp. 81-85, 2016.
- [21] K. Sa'diyah and S. R. Juliastuti, "Pengaruh Jumlah Katalis Zeolit Alam Pada Produk Proses Pirolisis Limbah Plastik Polipropilen (PP)," *Jurnal Bahan Alam Terbarukan*, pp. 40-45, 2015.