

Processing Mixture Of Polyethylene Terephthalate (PET) Plastic Waste and Oil Palm Empty Fruit Bunches by The Cracking Method

Rahmawati¹, Hutwan Syarifuddin¹, Nazarudin^{1,2,3}

¹Program Studi Magister Ilmu Lingkungan, Universitas Jambi

²Program Studi Teknik Kimia, Universitas Jambi

³Pusat Studi Energi dan Nano Material, LPPM, Universitas Jambi

Abstract

Komposisi sampah di Kota Jambi didominasi oleh limbah perkebunan dan sampah plastik, jika tidak dikelola dengan baik dapat berdampak negatif bagi lingkungan. Perlu adanya alternatif pengolahan sampah plastik dan limbah perkebunan salah satunya dengan proses perengkahan katalitik untuk menghasilkan bahan bakar alternatif. Katalis yang digunakan merupakan limbah industri pengilangan minyak bumi yang dapat dimanfaatkan kembali. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis karakteristik katalis spent FCC (Fluid Catalytic Cracking) serta pengaruh rasio sampah plastik Polyethylene Terephthalate (PET) dan tandan kosong kelapa sawit terhadap persentase produk yang dihasilkan. Rancangan percobaan yang digunakan pada penelitian ini yaitu Rancangan Acak Lengkap (RAL) dengan variasi rasio plastik PET : tandan kosong kelapa sawit yaitu 1:0, 1:1, 1:2, dan 1:3 pada temperatur 450°C dan waktu 40 menit. Hasil analisis menunjukkan bahwa katalis spent FCC diprediksi mengandung zeolite Y (kaya silika) yang memiliki struktur pori-pori dengan ukuran yang berbeda-beda, sedangkan rasio sampah plastik PET dan tandan kosong kelapa sawit berpengaruh nyata terhadap persentase Cairan Hasil Perengkahan (CHP), kokas (arang), dan gas. Perlakuan rasio 1:3 menghasilkan persentase CHP dan kokas terbanyak yaitu 27,85% dan 34,41%. Sedangkan persentase gas terbanyak pada perlakuan 1:0 yaitu 82,12%.

Kata kunci : Catalytic cracking, polyethylene terephthalate, plastic waste, biomass, empty bunches of palm oil, catalyst spent FCC

PENDAHULUAN

Kepadatan penduduk dan perkembangan teknologi berakibat pada peningkatan volume sampah. Komposisi sampah di Kota Jambi terdiri dari 61,9% sampah organik dan 38,1% sampah anorganik yang didominasi dengan sampah plastik (DLH Kota Jambi, 2020:1). Salah satu jenis plastik yang banyak diproduksi adalah plastik Polyethylene Terephthalate (PET). Plastik PET digunakan secara luas sebagai kemasan, seperti botol kemasan air minum sekali pakai. Sifat plastik yang tidak dapat terurai secara alami akan menimbulkan dampak buruk pada lingkungan. Alternatif dalam penanganan sampah plastik yang saat ini banyak diteliti dan dikembangkan yaitu konversi sampah plastik menjadi bahan bakar minyak dengan proses perengkahan. Konversi dapat

dilakukan karena pada dasarnya plastik berasal dari minyak bumi sehingga dapat diproses kembali ke bentuk semula (Kholidah, 2018:29).

Perengkahan adalah suatu reaksi pemutusan ikatan C-C dari rantai karbon panjang dan berat molekul besar menjadi rantai karbon pendek dengan berat molekul lebih kecil (Wahyudi, dkk., 2015:1). Proses perengkahan menggunakan katalis atau disebut perengkahan katalitik (catalytic cracking) membutuhkan panas yang lebih sedikit dan konversi produk yang lebih tinggi dibandingkan metode perengkahan lainnya (Tambun, dkk., 2016:47). Penelitian yang telah dilakukan oleh Wahyudi, dkk (2016:22) menunjukkan bahwa hasil yield (%) pada perengkahan katalitik sampah plastik Polypropylene (PP) yang tertinggi adalah dengan variasi suhu 450°C, yaitu sebesar 76,09%. Hasil penelitian oleh Iswadi, dkk (2017:7), menunjukkan bahwa 1 kg sampah plastik jenis PET menghasilkan sebanyak 368,47 ml minyak hasil pirolisis, dengan nilai kalor sebesar 42,6224 kg/L mendekati nilai kalor dari minyak tanah yaitu 43 kg/L. Penelitian lainnya yang dilakukan oleh Tambunan, dkk (2018:1), pirolisis 2 kg sampah plastik jenis PET dengan 3 variasi suhu (300°C, 350°C, 400°C) menunjukkan bahwa jumlah tertinggi minyak yang dihasilkan adalah 49 gr pada suhu pirolisis 400°C dengan nilai pemanasan yang diperoleh dari minyak distilasi sebesar 1537 J/gr.

Peningkatan luas lahan dan jumlah produksi kelapa sawit menyebabkan limbah padat berupa Tandan Kosong Kelapa Sawit (TKKS) terus meningkat. Satu ton tandan buah segar akan menghasilkan TKKS sebanyak 20-23% (Nasution dkk, 2018:2). TKKS merupakan biomassa yang dapat dimanfaatkan sebagai sumber energi alternatif. Komponen utama dari biomassa yang berasal dari tumbuhan adalah selulosa, hemiselulosa dan lignin (Herliati, dkk., 2019:89). Penelitian yang dilakukan oleh Syah, dkk (2016:6), menunjukkan bahwa pirolisis TKKS menjadi bio-oil dengan katalis Mo/NZA dapat menghasilkan bio-oil yang bisa digunakan sebagai energi alternatif. Sutrisno dan Hidayat (2018:1) dalam penelitiannya menyimpulkan bahwa produk pirolisis TKKS menunjukkan hasil maksimum pada suhu 450°C dengan karakteristik kimia produk yang berpotensi baik untuk diolah sebagai bahan bakar dan bahan baku kimia.

Salman, dkk (2019:5) dalam penelitiannya menyimpulkan bahwa pirolisis campuran biomassa dari limbah Tandan Kosong Kelapa Sawit (TKKS) dan sampah plastik air kemasan menunjukkan efek yang sinergis dan menjadi metode yang efektif untuk mengurangi limbah biomassa dan plastik menjadi sumber energi berkelanjutan. Zat volatil (TKKS: 81,4% dan plastik: 99,6%) dalam campuran bahan ini menghasilkan reaktivitas tingkat tinggi dan manfaat volatilitas yang sesuai untuk produksi bahan bakar cair. Menurut Zheng (2018:12), perengkahan sampah plastik dengan penambahan biomassa akan menghambat pembentukan karbon sisa, sehingga efektif untuk meningkatkan minyak hasil perengkahan.

Katalis adalah suatu zat yang dapat mempercepat terjadinya reaksi, katalis ikut dalam proses reaksi namun akan kembali ke keadaan semula pada akhir reaksi. Menurut Mufrodi, dkk. (2018:137), katalis memiliki peran penting dalam mempercepat proses reaksi kimia karena kemampuannya dalam mempengaruhi kecepatan reaksi tetapi tidak mempengaruhi kesetimbangan kimia pada akhir reaksi. Katalis yang digunakan pada proses perengkahan sampah plastik jenis Polyethylene Terephthalate (PET) dan Tandan Kosong Kelapa Sawit (TKKS) adalah katalis spent FCC (Fluid Catalytic Cracking). Katalis spent FCC merupakan katalis bekas pakai pada proses perengkahan katalitik yang digunakan dalam pengolahan minyak bumi. Spent FCC diambil dari

unit FCC kilang minyak bumi PT. Pertamina Palembang. Penggunaan katalis spent FCC (Fluid Catalytic Cracking) merupakan salah satu alternatif untuk memanfaatkan limbah industri minyak bumi karena kemampuan katalis ini dalam mengkonversi minyak mentah dengan viskositas tinggi (Sarosa, dkk., 2015:242).

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis karakteristik katalis spent FCC (Fluid Catalytic Cracking) yang digunakan serta pengaruh rasio sampah plastik Polyethylene Terephthalate (PET) dan tandan kosong kelapa sawit terhadap persentase produk yang dihasilkan.

METODE

Perengkahan katalitik sampah plastik jenis Polyethylene Terephthalate (PET) dan Tandan Kosong Kelapa Sawit (TKKS) dilakukan selama 40 menit pada temperatur 450°C dengan 4 variasi perlakuan yang dibedakan berdasarkan rasio sampah plastik PET dan TKKS, yaitu 1:0, 1:1, 1:2, dan 1:3 dengan masing-masing pengulangan sebanyak 3 kali. Analisis karakteristik katalis dilakukan menggunakan X-Ray Diffraction (XRD) dan Scanning Electron Microscope (SEM). Sedangkan rancangan penelitian yang akan digunakan untuk menganalisis pengaruh rasio plastik Polyethylene Terephthalate (PET) dan tandan kosong kelapa sawit terhadap persentas produk yang dihasilkan yaitu menggunakan Rancangan Acak Lengkap (RAL).

Tabel 1. Matriks Simbol Percobaan Pada Rancangan Penelitian RAL

A	B	C	D
PET	1 : 1	1 : 2	1 : 3
A ₁	B ₁	C ₁	D ₁
A ₂	B ₂	C ₂	D ₂
A ₃	B ₃	C ₃	D ₃

Keterangan :

A = Plastik PET

B = Rasio PET dan TKKS (1:1)

C = Rasio PET dan TKKS (1:2)

D = Rasio PET dan TKKS (1:3)

Prosedur penelitian diawali dengan persiapan bahan baku berupa pembersihan dan pencacahan sampah plastik jenis Polyethylene Terephthalate (PET) dan tandan kosong kelapa sawit. Bahan baku selanjutnya ditambahkan katalis yang sudah dikalsinasi dengan rasio katalis : umpan (1:10). Sampel direngkah pada suhu 450°C selama 40 menit. Reaktor dialiri dengan Gas Nitrogen (N₂) untuk mendorong uap hasil perengkahan sehingga mengalir ke wadah penampung. Hasil perengkahan kemudian dianalisa untuk mendapatkan kesimpulan dari penelitian yang dilakukan. Persentase produk yang dihasilkan dihitung dengan menimbang berat produk hasil perengkahan. Perhitungan untuk mencari presentase tersebut adalah sebagai berikut (Sangpacth, dkk., 2019:2)

:

$$\% \text{ cairan} = \left[\frac{\text{massa cairan}}{\text{massa total}} \right] \times 100\%$$

$$\% \text{ padatan} = \left[\frac{\text{massa padatan}}{\text{massa total}} \right] \times 100\%$$

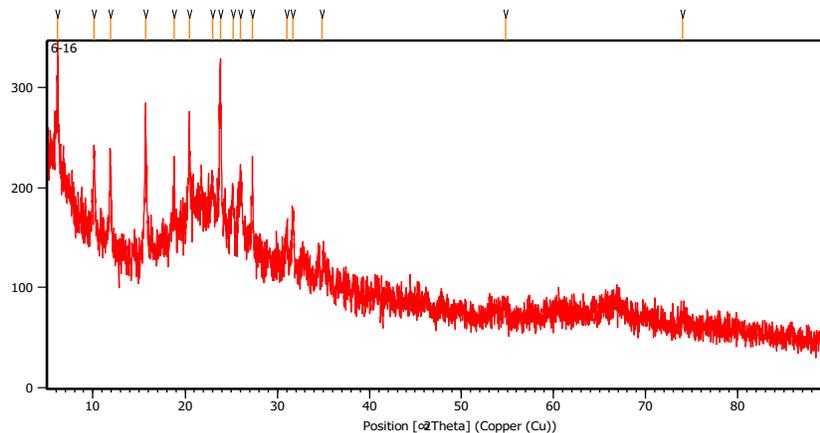
$$\% \text{ cairan} = 100\% - (\% \text{ cairan} + \% \text{ padatan})$$

HASIL DAN PEMBAHASAN HASIL

1. Karakteristik Katalis

Limbah katalis FCC (Fluid Catalytic Cracking) atau disebut katalis spent FCC berupa padatan yang berwarna hitam pekat karena masih mengandung sisa karbon dan zat pengotor lainnya. Pemanfaatan katalis spent FCC dapat dilakukan dengan mengaktifkan kembali atau reaktivasi situs aktif katalis yang mengalami penurunan kualitas selama masa operasionalnya. Reaktivasi katalis dilakukan dengan proses kalsinasi yang dilakukan dengan pemanasan pada suhu 550°C selama 6 jam yang dialiri oksigen untuk mendapatkan serbuk dengan kemurnian yang tinggi (Meilianti, 2017:3). Katalis spent FCC yang telah direaktivasi akan tampak berwarna putih. Analisis X-Ray Diffraction (XRD)

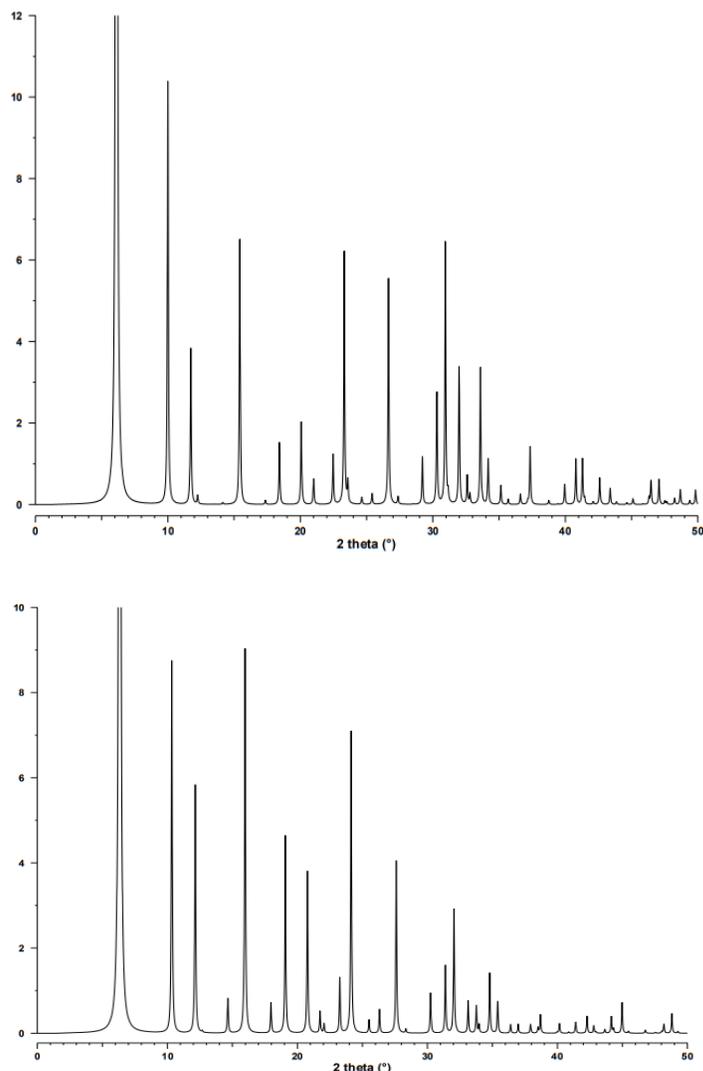
Analisis X-Ray Diffraction (XRD) merupakan salah satu metode karakterisasi material yang digunakan untuk mengidentifikasi fasa kristalin dengan cara menentukan parameter struktur kisi serta ukuran partikel.



Gambar 1. Pola Difraksi Katalis Spent FCC

Pola difraksi dinyatakan dengan besar sudut-sudut yang terbentuk sebagai hasil dari difraksi berkas cahaya oleh kristal pada material. Nilai sudut tersebut dinyatakan dalam 2θ , dimana θ merepresentasikan sudut datang cahaya. Sedangkan nilai 2θ merupakan besar sudut datang dengan sudut difraksi yang terdeteksi oleh detector (Didik, 2020:7). Berdasarkan Gambar 1, struktur kristal pada katalis spent FCC berada pada posisi $2\theta = 6,2^\circ; 10,12^\circ; 20,4^\circ; 23,8^\circ; 27,2^\circ$ dan 31° . Puncak yang kuat dan tajam menunjukkan bahwa katalis spent FCC (Fluid Catalytic Cracking) memiliki fase kristal. Hal ini sesuai dengan pendapat Anggraeni dan Manurung (2014:119) yang menyatakan bahwa puncak difraktogram yang tajam dengan intensitas yang tinggi menunjukkan padatan bersifat kristalin.

Katalis perengkahan umumnya adalah katalis alumina silikat yang mempunyai tingkat keasamaan yang baik, tahan suhu tinggi, dan dapat digunakan berulang kali. Katalis perengkahan yang biasa digunakan adalah zeolit tipe faujasit (Sarosa, dkk., 2015:242). Zeolite faujasit terdiri dari zeolite X (kaya alumina) dan zeolite Y (kaya silika).



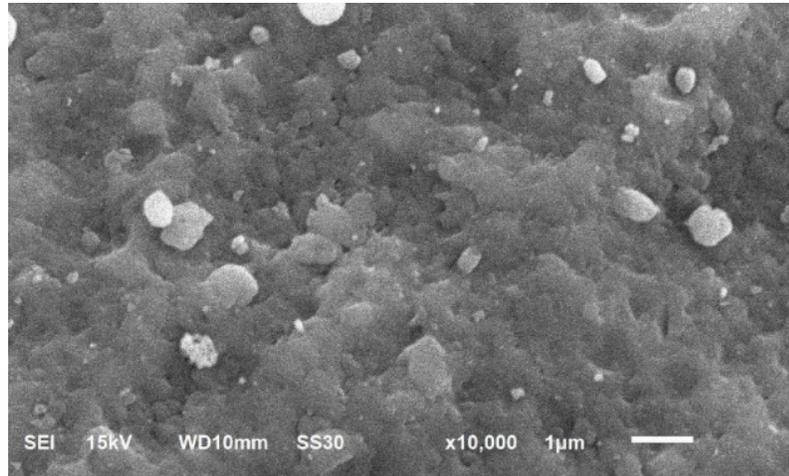
(b) Zeolite Y

Gambar 2. Pola Difraksi Standar (Treacy dan Higgins, 2001).

Zeolite X standar memiliki puncak-puncak tertinggi pada sudut $2\theta = 6,1^\circ; 10,7^\circ; 16^\circ; 27^\circ;$ dan $34,08^\circ$. Sedangkan zeolite Y standar memiliki puncak-puncak tertinggi pada sudut $2\theta = 6,33^\circ; 10,34^\circ; 12,14^\circ; 15,97^\circ; 19,07^\circ; 20,77^\circ; 24,13^\circ; 27,60^\circ;$ dan $32,04^\circ$ (Treacy dan Higgins, 2001). Jika dibandingkan dengan hasil analisis X-ray Diffraction (XRD) katalis spent FCC (Fluid Catalytic Cracking) yang berada di sudut $2\theta = 6,2^\circ; 10,12^\circ; 20,4^\circ; 23,8^\circ; 27,2^\circ$ dan 31° , maka puncak-puncak tertinggi pada katalis spent FCC diprediksi memiliki kesamaan yang lebih mendekati dengan zeolite Y (kaya silika). Kesamaan puncak tidak spesifik karena diduga katalis spent FCC telah mengalami perubahan struktur selama masa pakai atau masa hidupnya (lifetime). Menurut Widi (2018:26), masa hidup (lifetime) adalah rentang waktu katalis mempertahankan tingkat aktivitas dan selektivitas yang dikaitkan dengan kestabilan.

Analisis Scanning Electron Microscope (SEM)

Scanning Electron Microscope (SEM) adalah salah satu jenis mikroskop elektron yang menggunakan berkas elektron untuk menggambar profil permukaan atau morfologi suatu material. SEM digunakan untuk mengamati morfologi permukaan sampel dalam perbesaran tinggi.



(a) Perbesaran 10.000x

Berdasarkan hasil analisis SEM pada Gambar 3 menunjukkan bahwa sebagian kristal berbentuk amorf dan sebagiannya lagi berbentuk agregat atau menyatu. Hasil SEM dengan perbesaran 40.000x menunjukkan struktur spent FCC berbentuk gumpalan-gumpalan dengan ukuran yang bervariasi. Morfologi katalis spent FCC berupa adanya rongga pori-pori dengan ukuran yang berbeda-beda. Penurunan konsentrasi situs aktif atau penurunan luas permukaan secara umum dapat disebabkan oleh 3 hal, yaitu, penggabungan (sintering), peracunan (poisoning), dan pembentukan kokas (coking). Proses sintering dapat terjadi saat proses katalisis berlangsung yang memungkinkan antar situs aktif bertemu dan selanjutnya dapat bergabung (sintering). Penggabungan situs aktif menyebabkan ukuran pori menjadi tidak sesuai lagi karena mengalami perubahan. Peracunan dan pembentukan kokas juga dapat menurunkan luas permukaan (Widi, 2018:32).

2. Analisis Produk Hasil Perengkahan

Perengkahan katalitik sampah plastik jenis Polyethylene Terephthalate (PET) dan Tandan Kosong Kelapa Sawit (TKKS) menghasilkan produk berupa cairan, padatan, dan gas. Cairan yang tertampung di dalam wadah merupakan hasil utama yang diinginkan dalam proses perengkahan atau yang disebut CHP (Cairan Hasil Perengkahan). Hasil lainnya yang tertinggal di dalam reaktor berupa padatan berbentuk arang (kokas), sedangkan sisanya berupa gas yang tidak dapat terkondensasi.

Tabel 2. Hasil Perhitungan Persentase Yield Produk Hasil Perengkahan Sampah Plastik Jenis Polyethylene Terephthalate (PET) dan Tandan Kosong Kelapa Sawit (TKKS)

Rasio PET dan TKKS	Yield Produk Hasil Perengkahan (%)			Rata-Rata Yield Produk Hasil Perengkahan (%)			Total (%)
	CHP	KOKAS	GAS	CHP	KOKAS	GAS	

1:0	0,00	10,51	89,49	4,24	13,64	82,12	100
	12,73	13,43	73,84				
1:1	0,00	16,97	83,03	14,11	28,69	57,21	100
	16,57	27,88	55,56				
1:2	1,92	30,10	67,98	17,78	29,73	52,49	100
	23,84	28,08	48,08				
1:3	27,07	31,11	41,82	27,85	34,41	37,74	100
	9,60	26,67	63,74				
	16,67	31,41	51,92				
	24,55	35,66	39,80				
	26,36	32,12	41,52				
	32,63	35,45	31,92				

Analisis Persentase Cairan Hasil Perengkahan (CHP)

Cairan Hasil Perengkahan (CHP) adalah senyawa hidrokarbon dan senyawa organik lainnya yang mengalami proses pemutusan rantai karbon akibat adanya suhu tinggi. CHP yang dihasilkan memiliki aroma yang tajam seperti bahan bakar jenis solar. Secara fisik penampilan CHP berupa cairan berwarna kuning kecokelatan sampai dengan cokelat kehitaman.

Tabel 3. Analisis Keragaman Pengaruh Rasio terhadap Persentase Cairan Hasil Perengkahan (CHP)

Sumber Keragaman	Derajat Bebas	Jumlah Kuadrat	Kuadrat Tengah	F Hitung	F Tabel	
					5%	1%
Perlakuan	3	855,87	285,29	4,17*	4,07	7,59
Galat	8	547,75	68,47			
Total	11	1.403,62				

Berdasarkan analisis keragaman, nilai Fhitung > Ftabel ($\alpha:0,05$) yaitu $4,17 > 4,07$ sehingga dapat disimpulkan bahwa perlakuan rasio sampah plastik jenis Polyethylene Terephthalate (PET) dan Tandan Kosong Kelapa Sawit (TKKS) berpengaruh nyata terhadap persentase Cairan Hasil Perengkahan (CHP) yang dihasilkan. Menurut Ginting, dkk. (2015:158), Tandan Kosong Kelapa Sawit (TKKS) kaya kandungan lignoselulosa yang dapat dimanfaatkan sebagai sumber energi dengan diubah menjadi bahan bakar.

Penelitian yang telah dilakukan menunjukkan bahwa semakin banyak Tandan Kosong Kelapa Sawit (TKKS) yang ditambahkan ke dalam sampel akan meningkatkan jumlah CHP yang dihasilkan. Hal ini sejalan dengan hasil penelitian yang dilakukan oleh Zheng, dkk (2018:12) yang menjelaskan bahwa penambahan biomassa pada perengkahan plastik akan menghambat pembentukan karbon sisa selama proses perengkahan sehingga dapat meningkatkan hasil secara efektif.

Analisis Persentase Kokas (Arang)

Tabel 4. Analisis Keragaman Pengaruh Rasio terhadap Persentase Kokas (Arang)

Sumber Keragaman	Derajat Bebas	Jumlah Kuadrat	Kuadrat Tengah	F Hitung	F Tabel	
					5%	1%
Perlakuan	3	729,66	243,22	42,31*	4,07	7,59
Galat	8	45,99	5,75			
Total	11	775,65				

Berdasarkan analisis keragaman, nilai $F_{hitung} > F_{tabel}$ ($\alpha:0,05$) yaitu $42,31 > 4,07$ sehingga dapat disimpulkan bahwa perlakuan rasio sampah plastik jenis *Polyethylene Terephthalate* (PET) dan Tandan Kosong Kelapa Sawit (TKKS) berpengaruh nyata terhadap persentase kokas (arang) yang dihasilkan. Penelitian yang telah dilakukan menunjukkan bahwa semakin banyak biomassa TKKS yang ditambahkan maka akan meningkatkan jumlah kokas (arang) yang dihasilkan. Kandungan senyawa lignin yang tinggi pada cangkang sawit menyebabkan peningkatan produk arang yang dihasilkan karena sifat lignin yang sulit terdekomposisi (Basu, 2010:81). Semakin banyak plastik yang ditambahkan akan menurunkan jumlah kokas (arang) yang dihasilkan. Menurut Pinto, dkk (2016:157), selama proses pirolisis, plastik akan mudah terurai dan menyebabkan lingkungan pirolisis dipenuhi gas-gas terutama hidrogen. Kondisi ini berdampak pada tingginya laju

Analisis keragaman menunjukkan nilai $F_{hitung} > F_{tabel}$ ($\alpha:0,05$) yaitu $13,20 > 4,07$ sehingga dapat disimpulkan bahwa perlakuan rasio sampah plastik jenis *Polyethylene Terephthalate* (PET) dan Tandan Kosong Kelapa Sawit (TKKS) berpengaruh nyata terhadap persentase gas. Penelitian yang telah dilakukan menunjukkan rata-rata persentase Cairan CHP lebih rendah dibandingkan dengan rata-rata persentase gas. Menurut Wardana, dkk (2016:363), turunnya jumlah cairan diikuti dengan meningkatnya jumlah gas yang dihasilkan. Hal ini terjadi karena proses *secondary cracking* yang memecah rantai panjang senyawa organik dan hidrokarbon menjadi rantai pendek yang tidak dapat terkondensasi. Proses *secondary cracking* terjadi saat volatil pada plastik terlepas dan tidak segera terjadi proses pendinginan. Temperatur yang tinggi menyebabkan semakin cepatnya laju reaksi *secondary cracking*, sehingga produk gas akan meningkat dan produk cairan menurun.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan maka dapat disimpulkan sebagai berikut:

1. Karakteristik katalis *spent FCC (Fluid Catalytic Cracking)* yang digunakan pada proses perengkahan sampah plastik jenis Polyetylene Terephthalate (PET) dan Tandan Kosong Kelapa Sawit (TKKS) diprediksi mendekati pola difraksi pada zeolite Y (kaya silika). Struktur katalis *spent FCC* memiliki pori-pori dengan ukuran yang berbeda-beda.
2. Rasio sampah plastik jenis *Polyetylene Terephthalate* (PET) dan Tandan Kosong Kelapa Sawit (TKKS) berpengaruh nyata terhadap persentase Cairan Hasil Perengkahan (CHP), kokas (arang), dan gas. Semakin banyak jumlah biomassa yang ditambahkan ke dalam sampel akan meningkatkan persentase CHP dan kokas (arang), dengan rata-rata jumlah persentase tertinggi masing-masing yaitu 27,85% dan 34,41%. Sedangkan semakin banyak jumlah plastik yang ditambahkan akan meningkatkan persentase gas yang dihasilkan, yaitu dengan rata-rata sebesar 82,12%.

DAFTAR PUSTAKA

- Anggraeni, W., dan Manurung, P. 2014. Sintesis dan Karakterisasi ZrO₂-CuO Sebagai Fungsi Perbandingan Mol. *Jurnal Teori dan Aplikasi Fisika*, Vol 2 No. 2: 117-123.
- Basu, P. 2010. *Biomass Gasification and Pyrolysis Practical Design and Theory*. Elsevier. Oxford.
- Didik, L.A. 2020. Penentuan Ukuran Butir Kristal CuCr_{0,98}Ni_{0,02}O₂ dengan Menggunakan *X-Ray Diffraction* (XRD) dan *Scanning Electron Microscope* (SEM). *Indonesian Physical Review* Vol. 3 No. 1: 6-14.
- Dinas Lingkungan Hidup Kota Jambi. 2020. Volume Sampah di Kota Jambi Tahun 2015 – 2019: 1-5.
- Ginting, AS., Tambunan, AH., dan Setiawan, RPA. 2015. Karakteristik Gas-Gas Hasil Pirolisis Tandan Kosong Kelapa Sawit. *Jurnal Teknologi Industri Pertanian*, Vol. 25 No. 2: 158-163.
- Gita, A., dan Kamilah, MM. 2018. Perbandingan Karakteristik ZSM 5 Sintesis Secara Langsung dari Kaolin Bangka dengan ZSM 5 Sintesis dari Kaolin Afrika Selatan Tertemplat TPABR: 1-3. Herliati, Prasetyo, SB., dan Verinaldy, Y. 2019. Review: Potensi Limbah Plastik dan Biomassa sebagai Sumber Energi Terbarukan dengan Proses Pirolisis. *Jurnal Teknologi*, Vol. 6 No. 2: 85-98.
- Iswadi, D., Nurisa, F., dan Liastuti, E. 2017. Pemanfaatan Sampah Plastik LDPE dan PET Menjadi Bahan Bakar Minyak dengan Proses Pirolisis. Universitas Pamulang. *Jurnal Ilmiah Teknik Kimia*, Vol. 1 No. 2: 1-9.
- Kholidah, N. 2018. Pengaruh Temperatur terhadap Persentase Yield pada Proses Perengkahan Katalitik Sampah Plastik menjadi Bahan Bakar Cair. *Jurnal Ilmu Kimia dan Terapan*, Vol. 2 No. 1: 28-33.
- Meilianti. 2017. Isolasi Kalsium Oksida (CaO) pada Cangkang Sotong (Cuttlefish) dengan Proses Kalsinasi Menggunakan Asam Nitrat Dalam Pembuatan Precipitated Calcium Carbonat (PCC). *Jurnal Distilasi* Vol. 2 No.1: 1-8.
- Mufrodi, Z., Astuti, E., dan Budiarti, GI. 2018. Seminar Nasional Teknologi Terapan VI : 137-140. Nasution, ZA., Limbong, HP., dan Nasution, SS. 2018. Pengolahan Cangkang Kelapa Sawit Menjadi Carbon Black Skala IKM dan Studi Kelayakan. *Jurnal Industri Hasil Perkebunan*, Vol. 13 No: 1-10.
- Pinto, M., Miranda, dan Costa P. 2016. Production of Liquid Hydrocarbons from Rice Crop Wastes Mixtures by Co-Pyrolysis and Co-Hydropyrolysis. *Fuel Journal*, Vol 174: 153-163.
- Sangpatch, T., Supakata, N., Kanokkantapong, V., dan Jongsomjit, B. 2019. Fuel Oil Generate from the Cogon Grass-derived Al-Si (*Imperata cylindrica* (L.) Beauv) Catalysed Pyrolysis of Waste Plastic. *Heliyon*, Vol. 5. e02324
- Salman, B., Ong, MY., Nomanbhay, S., Salema, AA., Sankaran, R., dan Show, PL. 2019. Thermal Analysis of Nigerian Oil Palm Biomass with Sachet-Water Plastic Wastes for Sustainable Production of Biofuel. *Journal Processes*, Vol. 7 No. 475: 1-15.
- Sarosa, AH., Samadhi, TW., dan Budiyanto. 2015. Kajian Proses Produksi Katalis Mikrosferik untuk Perengkahan Minyak Bumi dengan Pengereng Sembur. *Jurnal Reaktor*, Vol. 15 No. 4: 241-247.

- Syah, F., Bahri, S., dan Amri, A. 2016. Pirolisis Tandan Kosong Sawit Menjadi Bio-Oil Menggunakan Katalis Mo/NZA. JOM Fakultas Teknik Universitas Riau, Vol. 3 No.2: 1-7.
- Sutrisno, B., dan Hidayat, A. 2018. Pyrolysis of Palm Empty Fruit Bunch: Yields and Analysis of Bio-oil. MATEC Web of Conferences 154: 1-4.
- Tambun, R., Saptawaldi, RP., Nasution, MA., dan Gusti, ON. 2016. Pembuatan Biofuel dari Palm Stearin dengan Proses Perengkahan Katalitik Menggunakan Katalis ZSM-5. Jurnal Rekayasa Kimia dan Lingkungan, Vol. 11 No.1: 46-52.
- Tambunan, BH., Simbun, dan Simanjuntak, JP. 2018. *Pyrolysis of Plastic Waste into The Fuel Oil*. 2nd Annual Conference of Engineering and Implementation on Vocational Education (ACEIVE 2018). Medan.
- Treacy, MMJ., dan Higgins, JB. 2001. Collection of Simulated XRD Powder Patterns for Zeolite. Elsevier, London.
- Wahyudi, E., Zultiniar, dan Saputra, E. 2015. Pengolahan Sampah Plastik Polypropylene (PP) Menjadi Bahan Bakar Minyak dengan Metode Perengkahan Katalitik Menggunakan Katalis Zeolit X. JOM Fakultas Teknik Universitas Riau, Vol. 2 No. 2: 1-4.
- Wahyudi, E., Zultiniar, dan Saputra, E. 2016. Pengolahan Sampah Plastik Polipropilena (PP) Menjadi Bahan Bakar Minyak dengan Metode Perengkahan Katalitik Menggunakan Katalis Sintetis. Jurnal Rekayasa Kimia dan Lingkungan, Vol. 11 No.1: 17-23.
- Wardana, NY., Caroko, N., dan Thoharudin. 2016. Pirolisis Lambat Campuran Cangkang Sawit dan Plastik dengan Katalis Zeolit Alam. Jurnal Teknologi Industri, Vol 22 No. 5: 361-366.
- Widi, RK. 2018. Pemanfaatan Material Anorganik, Pengenalan dan Beberapa Inovasi di Bidang Penelitian. Deepublish, Yogyakarta.
- Zheng, Y., Tao, L., Yang, X., Huang, Y., Liu, C., dan Zheng, Z. 2018. Study of The Thermal Behavior, Kinetics, and Product Characterization of Biomass and Low-Density Polyethylene Co-Pyrolysis by Thermogravimetric Analysis and Pyrolysis-GC/MS. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis. S0165-2370(17)31086-0.