

## KONVERSI LOW DENSITY POLYETHYLENE (LDPE) MENJADI BAHAN BAKAR CAIR PADA UNIT THERMAL CRACKING AND CATALYTIC REACTOR WITH CO<sub>2</sub> EMISSION REMOVAL

Yuliana<sup>1</sup>, Zikri Alghozaly<sup>2</sup>, Rahma Ladaina<sup>3</sup>, Tahdid<sup>4</sup>, Erlinawati<sup>5</sup>, Sahrul Effendy<sup>6</sup>

Program Studi Teknik Energi, Jurusan Teknik Kimia, Politeknik Negeri Sriwijaya  
Jl. Srijaya Negara, Bukit lama, Palembang Sumatera Selatan 30128  
E-mail: Ylianaaa63@gmail.com

### Abstract

The high demand for non-renewable energy has experienced a world crisis, this has forced the search for renewable energy to meet demand. Converting LDPE plastic waste into BBC through thermal cracking and catalytic reaction methods is considered to be the most effective answer. This research utilizes Low Density Polyethylene plastic (LDPE) to become a liquid fuels (BBC) by cracking long carbon chains into short carbon chains using heat and natural natural Zeolite as a catalyst. This research aims to increase the yield and calorific value of liquid fuel products. From the research results at the optimum point, with the operating conditions the zeolite recovery ratio is 0.15 and the operating temperature is 160°C, the highest % yield is 77.28 and the highest calorific value is 11130 Cal/gr. BBC analysis of this study includes specifications for gasoline and diesel.

**Keywords:** Thermal Cracking and Catalytic Reaction, Liquid Fuel, Zeolite, LDPE.

### Abstrak

Tingginya permintaan akan energi tak terbarukan sudah mengalami krisis dunia, hal ini memaksa pencarian energi terbarukan untuk mencukupi permintaan. Konversi sampah plastik LDPE menjadi BBC melalui metode thermal cracking dan catalytic Reaction dinilai menjadi jawaban yang paling efektif. Penelitian ini memanfaatkan plastic Low Density Polyethylene (LDPE) menjadi Bahan Bakar Cair (BBC) dengan cara perengkahan rantai karbon panjang menjadi rantai karbon pendek menggunakan panas dan Zeolit alam alam sebagai katalis. Penelitian ini bertujuan untuk meningkatkan rendemen serta nilai kalor produk bahan bakar cair. Dari hasil penelitian di titik optimum, dengan kondisi operasi rasio perolehan zeolit 0,15 dan suhu operasi 160 °C didapatkan %rendemen tertinggi yaitu 77,28 dan nilai kalor terbesar yaitu 11130 Cal/gr. Analisa BBC penelitian ini masuk spesifikasi kedalam bensin dan solar.

**Kata Kunci:** Thermal Cracking and Catalytic Reaction, Bahan Bakar Cair, Zeolit, LDPE.

## 1. Pendahuluan

Konsumsi BBM masyarakat di Indonesia cenderung mengalami tren kenaikan setiap

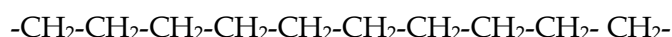
tahun, namun produksi ketersediaan BBM menunjukkan tren penurunan. Menurut data kementerian ESDM, tahun 2021 cadangan minyak bumi nasional sebesar 4,17 miliar barel dengan cadangan pasti sebesar 2,44 miliar barel serta 2,44 miliar barel sisanya merupakan data cadangan yang belum terbukti, dari data tersebut diungkapkan bahwa ketersediaan cadangan minyak bumi di Indonesia hanya akan tersedia hingga 9,5 tahun mendatang. Dari ketimpangan antara konsumsi pada data yang ditampilkan diatas, diketahui bahwa ketersediaan bahan bakar di Indonesia telah memasuki tahap yang kritis. [1]

Guna pengembangan energi terbarukan, dilakukan pengembangan energi alternatif yang ramah lingkungan, dan efisien dalam penggunaannya. Salah satu energi alternatif ramah lingkungan adalah plastik. Starting material plastik memiliki rasio hydrogen atau karbon yang tinggi dibanding dengan penggunaan batubara. [2]

Meninjau kelinearitas antara permasalahan diatas, sampah plastik menjadi angin segar sebagai salah satu potensi energi alternatif untuk sumber hidrokarbon karena merupakan produk turunan dari minyak bumi itu sendiri sehingga dapat di konversi kembali menjadi pembentuknya. Kandungan energi pada plastik hampir setara dengan bahan bakar seperti bensin, solar dan minyak tanah. [3]

Sampah plastik yang sering menjadi masalah di berbagai kota di Indonesia adalah jenis kantong plastik (LDPE) yang tidak lagi mempunyai nilai jual di pasaran, Sampah kantong plastik LDPE sudah menjadi sampah yang menumpuk dan sulit untuk diperbaharui sehingga sangat mendesak untuk ditangani terutama sampah plastik LDPE hasil sektor rumah tangga.

*Low density Polyethylene* (LDPE) adalah termoplastik yang terbuat dari monomer etilen, dengan rumus melokul  $(C_2H_4)_n$  atau  $(-CH_2-CH_2-)_n$ . Plastik jenis LDPE memiliki densitas antara 0,90-0,94 Gr/ml dengan titik leleh pada suhu  $155^{\circ}C$  serta titik leburnya  $140^{\circ}C$ . LDPE mengalami peningkatan kelenturan akibat dari Bergeraknya molekul bebas, hal ini terjadi karena LDPE mengalami pembesaran volume saat sudah mencapai titik leburnya. Pada kondisi operasi tersebut LDPE mengalami proses dekomposisi dan perubahan fasa dari padat ke cair. Dekomposisi adalah peregangan ikatan rantai molekul suatu zat karena energi thermalnya. Struktur ikatan LDPE dapat dilihat pada **Gambar 1**.



**Gambar 1. Ikatan Kimia Polyetheylen**

Ikatan struktur molekul LDPE memiliki dua ikatan molekul yaitu C-C dan C-H. Ikatan terlemah antara kedua jenis atom ini adalah ikatan antara atom C-C. Oleh karena itu, banyak kemungkinan produk yang dapat diperoleh dari proses pirolisis polietilen. Produk yang dapat dipulihkan dari proses pirolisis LDPE berdasarkan energi disosiasi ikatan terlemah adalah produk gas C1-C4, produk minyak ringan C5-C12 dan produk minyak berat  $C > 12$ .

Penelitian pada konversi sampah plastik terkhusus plastik jenis LDPE sudah banyak dilakukan, yang menghasilkan variasi nilai rendemen dari berbagai kondisi operasi. Tercatat sejak tahun 2016 Endang dkk dari Politeknik Negeri Bandung melakukan konversi sampah plastik menggunakan metode eksperimental di dalam Reaktor Pirolisis pada suhu optimum  $300^{\circ}C$  dan rendemen bersih yang dihasilkan mencapai 37,43%. [4]

Pada tahun 2018, Anene dkk dari Universitas of South-Eastern Norway, melakukan melakukan pirolisis plastik jenis LDPE menggunakan katalis Zeolit pada suhu 460°C dengan persen rendemen sebesar 96%. [5]

Memasuki pada tahun 2019, B. Supattra dkk dari Universitas Khon Kaen Thailand melakukan konversi dari sampah plastik jenis LDPE pada kondisi pirolisis dengan suhu 500°C mendapatkan formasi rendemen bahan bakar cair dengan katalis *bentonite clay* pada rasio 0,20 sebesar 87,6%. [6]

Dari ketiga riset yang telah dilakukan dalam mengkonversi limbah sampah plastik jenis LDPE menjadi bahan bakar cair, ketiganya merujuk pada metode pirolisis. Proses pirolisis merupakan proses dekomposisi suatu material dengan suhu yang tinggi namun tanpa dilibatkannya udara atau terbatas udara [7]. Produk pirolisis akan sangat dipengaruhi oleh suhu, perlakuan kimia atau katalis dan waktu proses.

Melalui pengkajian lebih lanjut, ketiga riset diatas dinilai belum optimal, karena hasil rendemen yang dihasilkan masih ada yang dibawah 50% dan dengan rentang suhu proses yang sangat tinggi yaitu 300-500°C serta penggunaan katalis yang belum efisien. Sehingga, perlunya pengkajian lebih lanjut untuk mencapai kondisi operasi yang optimal.

Untuk mengeliminasi permasalahan diatas, langkah perbaikan kondisi proses yang optimum untuk menurunkan suhu proses serta meningkatkan hasil rendemen yaitu, akan dilakukannya upaya penambahan rasio katalis terhadap bahan baku pada *reactor* guna menurunkan energi pengaktifan reaksi. Pemilihan jenis katalis yang digunakan berpacu pada katalis yang tahan pada suhu tinggi dan mempunyai luas permukaan aktivasi yang besar. Selain itu, juga diperhitungkan harga katalis yang relative murah sebagai tinjauan ekonomis pada proses. Dari berbagai parameter pemilihan katalis yang dimaksud, Zeolite Alam dinilai paling tepat sebagai katalis pada proses ini.

Peran katalis zeolit alam dalam proses pirolisis adalah untuk memutus rantai karbon komponen minyak berat yang dihasilkan oleh proses perengkahan termal. Penguraian minyak berat yang mengendap di reaktor pirolisis dapat dilakukan dengan bantuan katalis, minyak dengan rantai karbon panjang seperti  $C_{12}$  akan dipecah menjadi hidrokarbon minyak bumi ringan, sehingga rendemen bahan bakar yang dihasilkan meningkat. Reaksi perengkahan ikatan polietilen dengan reaksi thermal dan katalis zeolit alam, terjadi dengan 3 tahapan proses yaitu, tahap inisiasi, tahap propagasi, dan tahap stabilisasi.

Prosedural penelitian yang dilakukan selain mendapatkan hasil rendemen yang tinggi juga harus memperhatikan pengelolaan gas buang hasil pembakaran pada konversi sampah plastik LDPE. Upaya yang dilakukan pada penanggulangan gas buang berfungsi untuk mendukung dunia bebas emisi terkhususnya bebas  $CO_2$ . Salah satu langkah penurunan  $CO_2$  adalah penyerapan gas buang sisa pembakaran menggunakan absorben zat kimia.

Berdasar uraian diatas, maka lingkup penelitian ini bermaksud untuk mengembangkan dan meningkatkan konversi limbah kantong plastik LDPE menjadi bahan bakar cair yang dilakukan pada sebuah unit alat *Thermal Cracking And Catalytic Reactor* Sistem penyisihan emisi  $CO_2$  berskala rumah tangga dengan meninjau terhadap rasio katalis Zeolite Alam dan suhu proses guna mendapatkan hasil rendemen BBC dan nilai kalor yang lebih tinggi.

## 2. Metode Penelitian

Pada penelitian dilakukan menggunakan metode eksperimental murni dengan analisa percobaan. Penelitian ini dilakukan dengan mendegradasi limbah sampah plastik jenis LDPE menjadi bahan bakar cair. Guna melakukan riset eksperimen dan analisa digunakan beberapa langkah pemikiran yang sesuai dengan kaidah ilmu pengetahuan dan teknologi serta didukung oleh penelitian-penelitian terdahulu terkait, dimana hal ini berfungsi sebagai acuan penyelesaian permasalahan dengan optimal dan hasilnya mampu dipertanggung jawabkan.

1. Alat yang digunakan untuk penelitian konversi limbah plastik menjadi bensin dapat dilihat pada **Tabel 1**

**Tabel 1. Komponen alat Unit Pirolisis**

Komponen	Jumlah
Absorber	2 unit
Motor Penggerak	1 Unit
<i>Thermal Cracking &amp; Catalytic Reactor</i>	1 Set
Separator	2 unit
<i>Jacket Separator</i>	1 Unit
Tangki produk	2 unit
Feeder	1 unit

2. Bahan-bahan yang digunakan

Bahan-bahan yang digunakan pada penelitian ini adalah:

- Limbah plastik jenis *Low Density Polyethylen* (LDPE) sebanyak  $\pm 10$ kg/Run.
- Tempurung kelapa, digunakan sebagai bahan bakar digunakan sebanyak  $\pm 40$  Kg/run.
- Zeolit yang berfungsi sebagai katalis digunakan sebanyak 0 kg; 0,5 kg; 1,0 kg; 1,5 kg; 2.0 kg.

3. Data yang diperoleh dari penelitian ini berasal dari beberapa variasi perlakuan.

**Tabel 2. Variasi perlakuan terhadap sampel**

Variable tetap	Variable berubah
Massa kantong plastik: 10 kg	Suhu Operasi (130;140;150;160;170) °C
Volume reaktor : 0,120 m <sup>3</sup>	Rasio Zeolite alam/10 Kg bahan baku (0,00;0,05;0,10;0,15;0,20)
Massa tempurung kelapa: 40 kg	

*Unit Thermal and Catalytic Reactor* didesain untuk skala rumah tangga, dengan kapasitas 10 Kg bahan baku, unit ini akan diletakan pada bank-bank sampah pada perumahan di Indonesia. Pada proses awal tahapan yang dilakukan adalah menginput rasio katalis yang dikehendaki ke dalam reactor lalu disusul memasukan 10 Kg bahan baku. Selanjutnya, terjadi proses *thermal and catalytic Reaction*, dimana thermal akan dipengaruhi oleh suhu pembakaran pada *furnace*, dan *catalytic cracking* berupa Zeolite Alam sebagai katalisatornya. Proses ini diharapkan menghasilkan kualitas dan kuantitas bahan bakar cair yang tinggi.

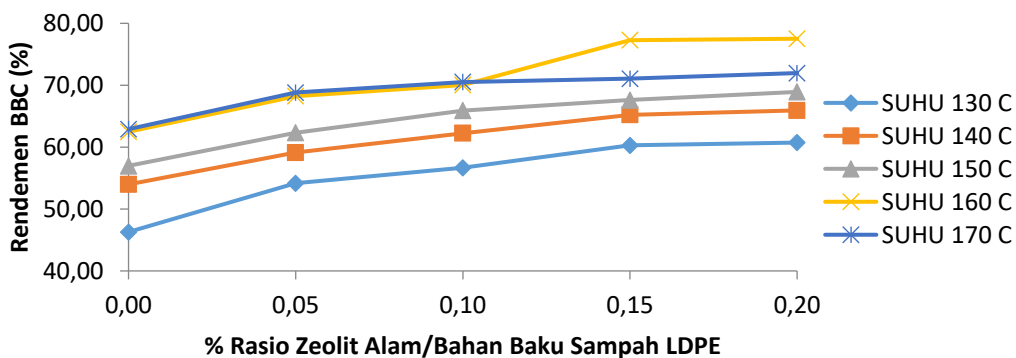
Produk yang teruapkan di *top reactor* akan dialirkan menuju Separator 1 guna terjadinya proses pemurnian dan pemisahan uap gas dengan BBC, kondisi operasi pada tahap ini harus mencapai suhu minimal dibawah 25°C untuk membantu proses kondensasi produk. Pada Separator 1 dilengkapi Sistem pendingin yaitu *Jacket Separator*. *Jacket Separator* dinilai dapat membantu proses pendinginan dan menjaga suhu SP-1 pada kondisi yang diinginkan. Produk hasil SP-1 akan keluar dari *bottom* SP-1, namun produk yang masih tidak terpisah sempurna dan masih dalam bentuk fasa uap akan dialirkan menuju top Separator 2 untuk pemurnian kembali. Produk hasil SP-2 akan dinamakan BBC 2.

Asap sisa pembakaran dari furnace akan diabsorb oleh absorber menuju tangki penyerapan, hal ini dilakukan guna mengurangi kadar CO<sub>2</sub> hasil pembakaran sebagai upaya keperdulian terhadap lingkungan.

### 3. Hasil dan Pembahasan

Pada penelitian ini telah didesain unit *Thermal Cracking and Catalytic Reactor with CO<sub>2</sub> Emission Removal* berbasis rumah tangga yang berguna untuk melakukan konversi limbah sampah plastik jenis *low density polyethylene* (LDPE) menjadi bahan bakar cair dengan berbagai proses yang ditawarkan pada unit ini. Parameter proses yang dipelajari pada proses ini meliputi rasio Zeolite alam dengan bahan baku dan suhu operasi didalam reactor. Variable proses rasio Zeolite alam dan bahan baku kisaran 0,00 hingga 0,20 atau dengan jumlah Zeolite alam 0,0kg sampai 2,00kg. Sedangkan, untuk kisaran variable suhu operasi rentang 130 - 170 °C.

Hubungan rasio Zeolit dengan bahan baku dan suhu reaksi akan mempengaruhi persen rendemen dan nilai kalor bahan bakar cair (BBC1) dan (BBC2) yang dihasilkan. Dari data penelitian yang telah dilakukan diperoleh grafik hubungan antara rasio Zeolit dengan bahan baku dan suhu reaksi terhadap % rendemen BBC yang dapat dilihat pada **Gambar 1**.



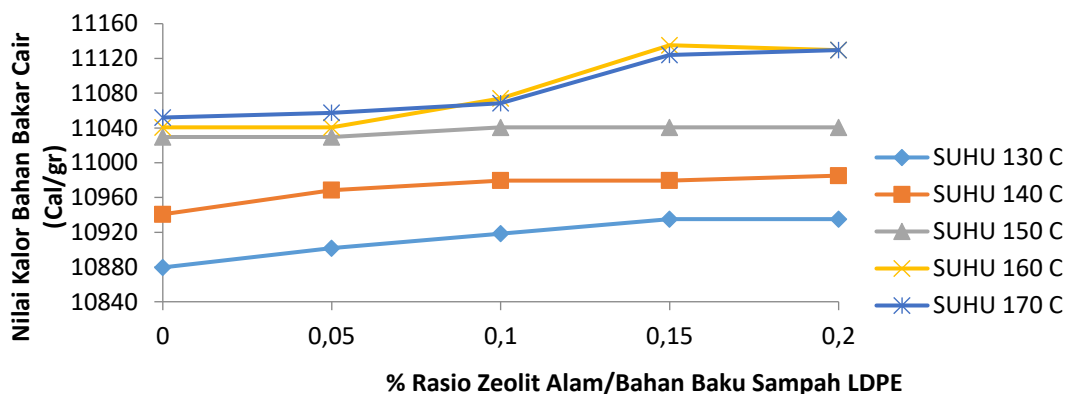
**Gambar 1. Hubungan Rasio Zeolit dengan Bahan Baku dan Suhu Reaksi terhadap % Rendemen BBC**

Dari **Gambar 1** terlihat bahwa, pengaruh rasio jumlah zeolit terhadap persen rendemen pada penelitian ini memberikan kondisi yang signifikan pada rasio zeolit sejak kisaran rasio 0,10 hingga 0,15. Kenaikan persen rendemen yang disebabkan oleh katalis disebabkan oleh adanya penurunan nilai energi pengaktifan pada proses reaksi degradasi komponen unsur kimia pada bahan baku limbah plastik LDPE menjadi bahan bakar cair [8]. Akan tetapi nilai rendemen cenderung konstan menginjak rasio zeolit

pada point 0,20. Hal ini memberikan indikasi secara jelas bahwa rasio zeolit optimal pada rasio 0,15 (pada percobaan nomor 19). Sedangkan untuk tanpa zeolit memberikan nilai rendemen perspektif yang cenderung lebih kecil dengan penggunaan zeolit.

Suhu reaksi sangat berpengaruh pada persen rendemen pada suhu terendah 130°C hingga suhu optimal 160°C pada rasio penggunaan katalis 0,15kg/10kg, persen rendemen dengan nilai 60,28% pada suhu 130°C dan 77,28% pada suhu 160°C, dengan kenaikan nilai rendemen sebesar 28,2%. Hal ini jauh sangat tinggi dibandingkan dengan kenaikan nilai rendemen antara suhu 160°C dengan suhu tertinggi 170°C yaitu 71,05%, tren ini mengalami range penurunan sebesar 8,07%. Terjadinya penurunan nilai rendemen pada suhu tertinggi disebabkan semakin tinggi suhu maka semakin banyak plastik yang mudah terurai menjadi gas yang menyebabkan produk tidak terkondensasi sempurna sehingga akan mempengaruhi laju perpindahan panas reaktor serta akan mempengaruhi ikatan struktur molekul pembentuknya sehingga rendemen hasil pun tidak signifikan keluar dan bahkan menurun.

Untuk melihat pengaruh penggunaan rasio jumlah Zeolit terhadap bahan baku LDPE dan suhu proses terhadap nilai kalor bahan bakar cair (HHV) yang dihasilkan dapat dilihat di **Gambar 2**.



**Gambar 2. Hubungan Rasio Zeolit dengan Bahan Baku dan Suhu Reaksi terhadap Nilai Kalor BBC (Cal/gr)**

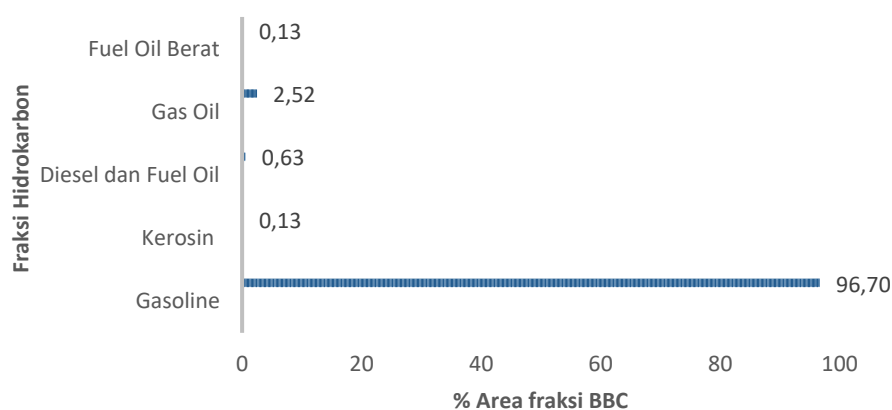
Dari **Gambar 2** didapatkan nilai kalor tertinggi pada penelitian yaitu sebesar 11.130 Cal/gr pada percobaan ke-16, yaitu suhu 160°C dan rasio Zeolite alam 0,15 kg/10kg bahan baku. Sementara nilai kalor terendah berada pada percobaan pertama dengan tanpa katalis serta pada suhu 130°C yaitu sebesar 10.879 cal/gr. Kenaikan nilai kalor disebabkan oleh suhu reaksi pirolisis, hal ini dikarenakan meningkatnya kandungan *Polyclic Aromatic Hydrocarbon* pada plastik LDPE yang mengakibatkan menurunnya nilai densitas seiring pada kenaikan suhu.

Penyebab kenaikan nilai kalor juga diakibatkan oleh penambahan jumlah katalis yang optimum, karena jumlah katalis mampu memutus ikatan rantai panjang hidrokarbon menjadi rantai hidrokarbon yang lebih pendek. Akan tetapi pada rasio penggunaan Zeolite alam 0,20kg/10kg bahan baku mengalami penurunan nilai kalor, hal ini diakibatkan rasio Zeolite alam sebelumnya sudah mencapai kondisi

optimum, dimana terpecahnya pembentuk utama ikatan bahan baku plastik LDPE dan terbentuknya senyawa yang mudah terbakar dan menguap.

Nilai kalor bahan bakar cair pada titik optimum yaitu 11.130Cal/gr masuk pada spesifikasi nilai kalor bensin sebesar 11.000-11.500Cal/gr. Kenaikan nilai kalor masih bisa di *upgrade* dengan pemurnian ulang agar lebih mendekati nilai kalor bensin di pasaran. Selain dipengaruhi oleh rasio Zeolite alam dan suhu nilai kalor juga dipengaruhi oleh waktu proses, semakin lama waktu proses maka akan mempengaruhi nilai kalor dari sampel yang diuji [8].

Dilakukan analisa *Gas Chromatography-Mass Spectrometry* (GCMS) pada sampel BBC, hasil analisa senyawa kimia dan komposisi BBC diasumsikan sebagai patokan hasil keseluruhan sampel *Thermal and Catalytic Reactor*.



**Gambar 3. Fraksi dan Komposisi BBC**

Dari **Gambar 3** diketahui bahwa fraksi BBC memiliki fraksi dominan oleh rantai C5-C12 sebesar 96,7 %, sedangkan komposisi kedua terbanyak adalah rantai C17-C20 sebesar 2,52%, selanjutnya diikuti rantai C13-C17 sebesar 0,63%, serta diikuti oleh rantai C11-C13 dan rantai C20-C45 dengan area masing-masing sebesar 0,13%. Senyawa dengan rantai area paling besar yaitu C5-C12 terkandung pada produk BBC dikarenakan proses *thermal and catalytic Reaction* yang variasi parameternya baik dan sesuai dengan karakteristik polimer etilen.

Penggunaan suhu operasi yang optimum yaitu 160 °C dan rasio katalis zeolite alam dengan bahan baku sebesar 0,15 terbukti mampu melakukan fungsinya masing-masing dalam proses rengkah senyawa etilen dengan maksimal, proses perengakahan berlangsung dengan senyawa yang memiliki fraksi ringan, namun tidak ada rantai C1-C4 yang terlihat pada data GCMS terlalu tinggi suhu dan terlalu banyak rasio zeolite alam terhadap bahan bakunya.

Pada produk BBC terlihat komponen senyawa terbanyak yaitu pada C8 dengan area sebesar 45,3 % lalu diikuti C9 dengan area sebesar 42,24%. Fraksi dominan berada pada rantai C5-C12 dengan total area 96,7% merupakan fraksi dari gasoline [9].

#### 4. Kesimpulan

Dari proses konversi plastik LDPE pada unit *Thermal dan Catalytic Reactor* dapat disimpulkan bahwa suhu reaksi berpengaruh dalam proses *Thermal and Cracking reaction*, dimana pada suhu 160°C menghasilkan %rendemen terbesar yaitu 77,28 dengan nilai kalor sebesar 11.130Cal/gr. Pada kenaikan 10°C dari suhu optimal yaitu 170°C mengalami persen penurunan rendemen sebesar 8,07% dan nilai kalor naik tetap.

Pada rasio zeolit alam terhadap bahan baku mengalami kondisi optimalnya pada rasio 0,15. Pada kondisi ini nilai rendemen yang dihasilkan sebesar 77,28% dan nilai kalor sebesar 11.130Cal/gr, sementara pada rasio zeolit 0,20 rendemen mengalami penurunan sebesar 6,52% dan nilai kalor turun sebesar 0,05%.

Produk bahan bakar cair yang dihasilkan masuk spesifikasi *gasoline*, hal ini dibuktikan dengan hasil analisa GCMS menunjukkan rantai karbon dominan sebesar 96,7% pada rantai C5-C12. Nilai kalor juga menunjukkan hal serupa pada titik optimum didapatkan nilai kalor sebesar 11.130Cal/gr. Pada unit *Thermal Cracking and Catalytic Reactor* dinilai mampu memberikan efek perpindahan massa, perpindahan panas, dan sistem hidrodinamika yang baik, hal ini terbukti dari kualitas dan kuantitas bahan bakar cair yang optimal.

Dari hasil penelitian peneliti memberikan saran berdasarkan data GCMS masih ada terkandung fraksi berat senilai 2,7% pada rantai karbon C17-C20, hal ini akan mengakibatkan dampak negatif apabila produk digunakan pada motor yang memiliki tingkat sensitifitas tinggi. Dari pernyataan tersebut perlunya mencari pengetahuan komprehensif tentang jenis zeolit alam yang memang benar-benar baik dalam proses pengaktifasinya.

#### Referensi

- [1] *Media Center Kementrian ESDM RI*. Retrieved from Kementrian ESDM RI: <https://www.esdm.go.id/id/media-center/arsip-berita/menteri-esdm-cadangan-minyak-indonesia-tersedia-untuk-95-tahun-dan-cadangan-gas-199-tahun>
- [2] Wong, S. L. Ngadi N, Abdullah. T.AT, Inuwa I.M. 2017. Conserverion of low denisty polyethylene (LDPE) over ZSM-5 Zeolit to sliquid fuel. *Fuel* 192,71 82
- [3] Mochamad Syamsiro, A. N. (2016). Rancang Bangun Mesin Pencacah Plastik Sebagai Bahan Baku . *Jurnal Mekanika dan Sistem Termal*, Vol. 1(2).
- [4] Endang, K., Mukhtar, G., Nego, A., dan Sugiyana, F.X.A. (2016). Pengolahan Sampah Plastik dengan Metoda Pirolisis menjadi Bahan Bakar Minyak. *Prosiding Seminar Nasional Teknik Kimia "Kejuangan" Pengembangan Teknologi Kimia untuk Pengolahan Sumber Daya Alam Indonesia*. ISSN 1693-4393.
- [5] Anene, A. F., Fredriksen, S. B., Sætre, K. A., & Tokheim, L. A. (2018). *Experimental study of thermal and catalytic pyrolysis of plastik waste components. Sustainability (Switzerland)*, 10(11).
- [6] Budsaerechai, S., Hunt, A. J., & Ngernyen, Y. (2019). *Catalytic pyrolysis of plastik waste for the production of liquid fuels for engines. RSC Advances*, 9(10), 5844–5857.



- [7] Pertamina. (2021, Januari 29). *Copyright PT Pertamina(Persero) 2020. All Right Reserved.* Retrieved from <https://www.pertamina.com/id/news-room/energia-news/apa-itu-pirolisis-bisa-ubah-sampah-plastik-jadi-bbm>
- [8] Dominggus G.H. Adoe, W. B. (April 2016). Pirolisis Sampah Plastik PP (Polyprophylene) menjadi Minyak Pirolisis sebagai Bahan Bakar Primer. *LONTAR Jurnal Teknik Mesin Undana*, Vol. 03, No 01.
- [9] Bani, G. A. (2023). Pemanfaatan Zeolit Alam Ende Sebagai Katalis dalam. *Fakultas Sains dan Pertanian, Universitas Aryasatya Deo Muri, Kupang, Indonesia*, Vol. 07 No. 1 (2023) pp. 13-21.