

# Pemanfaatan Reaktor Kontinu dan Katalis Zeolit dalam Konversi Termal Limbah Poliolefin menjadi Bahan Bakar Ramah Lingkungan

Masri Ali <sup>1\*</sup>, Masri Ibrahim <sup>2</sup>, M. Nizar Machmud <sup>3</sup>

<sup>1\*,2,3</sup> Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Syiah Kuala, Kota Banda Aceh, Indonesia.

\*Correspondence email:  
[masri.ali@usk.ac.id](mailto:masri.ali@usk.ac.id)

Received: 15 January 2025  
Accepted: 25 January 2025  
Published: 31 January 2025

Full list of author information is  
available at the end of the article.

## Abstract

This study investigated the conversion of plastic waste into fuel oil through thermal and catalytic cracking with an innovative reactor. The study analyzed the effect of plastic type (LDPE, HDPE, PP), reactor temperature (400-550°C), and catalyst type (HZSM-5, ZSM-5, Ni-Mo/Zeolite) on the yield and characteristics of liquid products. The experimental results showed that LDPE produced the highest liquid product (78.5%), the optimum temperature was 500°C, and the HZSM-5 catalyst gave the best performance. GC-MS analysis identified the main components of C5-C12 hydrocarbons according to the characteristics of fuel oil. The liquid product had a calorific value of 42.5 MJ/kg and a sulfur content of <10 ppm with an energy efficiency of 65%. The results of the study prove the effectiveness of the innovative reactor in overcoming the problem of plastic waste while producing alternative energy.

**Keywords:** Plastic Waste; Fuel Oil; Implicit Catalytic Cracking in Pyrolysis; HZSM-5.

## Abstrak

Penelitian ini menginvestigasi konversi sampah plastik menjadi bahan bakar minyak melalui perengkahan termal dan katalitik dengan reaktor inovatif. Studi menganalisis pengaruh jenis plastik (LDPE, HDPE, PP), temperatur reaktor (400-550°C), dan jenis katalis (HZSM-5, ZSM-5, Ni-Mo/Zeolit) terhadap rendemen dan karakteristik produk cair. Hasil eksperimen menunjukkan LDPE menghasilkan produk cair tertinggi (78,5%), temperatur optimum 500°C, serta katalis HZSM-5 memberikan performa terbaik. Analisis GC-MS mengidentifikasi komponen utama hidrokarbon C5-C12 sesuai karakteristik bahan bakar minyak. Produk cair memiliki nilai kalor 42,5 MJ/kg dan kandungan sulfur <10 ppm dengan efisiensi energi 65%. Hasil penelitian membuktikan efektivitas reaktor inovatif dalam mengatasi masalah sampah plastik sekaligus menghasilkan energi alternatif.

**Kata Kunci:** Plastic Waste; Fuel Oil; Catalytic Cracking implisit dalam Pirolisis; HZSM-5.



## 1. Pendahuluan

Permasalahan sampah plastik telah menjadi tantangan global yang memerlukan solusi berkelanjutan. Setiap tahun, volume sampah plastik mengalami peningkatan signifikan seiring dengan pertumbuhan populasi dan aktivitas industri. Di Indonesia, berdasarkan data Kementerian Lingkungan Hidup tahun 2023, produksi sampah plastik mencapai 67,8 juta ton per tahun, dengan estimasi 14% dari total tersebut berakhir di lautan (Ibrahim *et al.*, 2022). Peningkatan volume sampah plastik yang tidak diiringi dengan pengelolaan yang tepat mengakibatkan dampak negatif terhadap lingkungan, seperti pencemaran tanah, air, dan udara (Putri, 2023; Purwaningrum, 2016). Oleh karena itu, teknologi konversi sampah plastik menjadi bahan bakar minyak menawarkan solusi yang menjanjikan untuk mengatasi permasalahan ini sekaligus menghasilkan sumber energi alternatif (Rafidah & Ismail, 2019; Lesmana & Apriyani, 2019). Proses konversi tersebut memanfaatkan karakteristik dasar plastik yang berasal dari turunan minyak bumi melalui proses perengkahan (*cracking*). Meskipun teknologi perengkahan telah dikembangkan selama beberapa dekade, efisiensi proses dan kualitas produk yang dihasilkan masih memerlukan pengembangan lebih lanjut (Rizak *et al.*, 2022; Zaman, 2024). Metode konversi yang umum digunakan meliputi perengkahan hidro (*hydrocracking*), perengkahan termal (*thermal cracking*), dan perengkahan katalitik (*catalytic cracking*) (Rafidah & Ismail, 2019). Setiap metode memiliki karakteristik dan tantangan tersendiri. Perengkahan hidro menghasilkan produk berkualitas tinggi namun membutuhkan konsumsi energi besar dan tekanan operasi tinggi (Rizak *et al.*, 2022). Perengkahan termal relatif sederhana tetapi menghasilkan distribusi produk yang beragam, sedangkan perengkahan katalitik menawarkan selektivitas produk yang baik namun memerlukan pengembangan katalis yang optimal (Zaman, 2024). Pengembangan desain reaktor konversi sampah plastik menghadapi beberapa tantangan teknis. Heterogenitas bahan baku sampah plastik mempengaruhi stabilitas proses dan kualitas produk (Putri, 2023). Pembentukan kokas pada permukaan katalis mengurangi efektivitas dan umur katalis (Panjaitan, 2024). Konsumsi energi yang tinggi mempengaruhi kelayakan ekonomi proses (Jariyanti *et al.*, 2022). Keempat, pembentukan produk samping berbahaya memerlukan sistem pengolahan khusus (Kholili, 2023). Optimasi desain reaktor konversi menjadi kunci untuk meningkatkan efisiensi proses dan kualitas produk. Beberapa aspek yang memerlukan inovasi meliputi sistem pengumpanan bahan baku, konfigurasi reaktor, pemilihan dan regenerasi katalis, serta sistem pemurnian produk (Agustin *et al.*, 2022).

Implementasi teknologi digital dalam sistem kontrol proses memberikan peluang peningkatan kinerja reaktor. Penggunaan sensor dan sistem monitoring real-time memungkinkan pengendalian parameter proses secara presisi (Azharman *et al.*, 2020). Analisis data operasi dapat digunakan untuk optimasi kondisi proses dan prediksi perawatan, sedangkan integrasi sistem kontrol cerdas membantu mengoptimalkan konsumsi energi dan meningkatkan keselamatan operasi (Mas'ud *et al.*, 2023). Aspek ekonomi dan lingkungan menjadi pertimbangan penting dalam pengembangan desain reaktor. Evaluasi kelayakan ekonomi meliputi biaya investasi, operasional, dan potensi pendapatan dari produk yang dihasilkan (Purwaningrum, 2016). Analisis dampak lingkungan mencakup perhitungan jejak karbon, pengelolaan limbah, dan potensi reduksi emisi (Nugroho, 2020). Standardisasi produk bahan bakar yang dihasilkan menjadi faktor penting untuk komersialisasi teknologi. Karakterisasi produk meliputi sifat fisika-kimia, kandungan pengotor, dan kesesuaian dengan spesifikasi bahan bakar komersial (Batutah *et al.*, 2021). Pengujian performa pada mesin diperlukan untuk memvalidasi kualitas produk, dan pengembangan standar kualitas produk membantu meningkatkan kepercayaan pengguna serta memperluas peluang pasar (Lesmana & Apriyani, 2019). Berdasarkan uraian tersebut, penelitian pengembangan desain inovatif reaktor konversi sampah plastik bertujuan meningkatkan efisiensi proses, kualitas produk, dan kelayakan ekonomi. Fokus penelitian meliputi optimasi konfigurasi reaktor, pengembangan sistem kontrol, dan evaluasi kinerja proses. Hasil penelitian diharapkan memberikan kontribusi signifikan pada pengembangan teknologi pengolahan sampah plastik yang berkelanjutan.

Krisis sampah plastik global telah mencapai tahap mengkhawatirkan, dengan produksi tahunan melebihi 400 juta ton pada 2023 menurut Program Lingkungan Perserikatan Bangsa-Bangsa (UNEP, 2023). Di Indonesia, data Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan (KLHK) mencatat 67,8 juta ton sampah plastik dihasilkan per tahun, 9,5 juta ton di antaranya bocor ke ekosistem laut melalui aliran sungai dan sistem pengelolaan limbah yang tidak memadai. Fenomena ini tidak hanya mengancam keanekaragaman hayati laut, tetapi juga berdampak pada rantai makanan manusia melalui mikroplastik yang terakumulasi dalam biota perairan. Studi terbaru oleh Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia (LIPI, 2023) menemukan konsentrasi mikroplastik mencapai 100 partikel per liter di perairan Teluk Jakarta, angka 40% lebih tinggi daripada temuan tahun 2020.

Upaya konvensional seperti daur ulang mekanis hanya menyelesaikan 9% masalah akibat

keterbatasan infrastruktur dan heterogenitas komposisi plastik. Padahal, karakteristik kimiawi polimer sintesis yang berasal dari minyak bumi justru membuka peluang transformasi limbah menjadi sumber energi melalui proses termokimia. Teknologi pirolisis katalitik muncul sebagai solusi strategis yang mampu mengonversi 1 ton sampah plastik campuran menjadi 700-800 liter bahan bakar setara solar, sekaligus mengurangi emisi CO<sub>2</sub> hingga 1,5 ton dibandingkan pembakaran terbuka. Perkembangan teknologi konversi plastik-menjadi-bahan bakar menghadapi empat tantangan utama. Pertama, variasi komposisi plastik (LDPE, HDPE, PP, PET) dalam limbah domestik menyebabkan fluktuasi kualitas produk akhir. Analisis termogravimetri (TGA) oleh Putri (2023) menunjukkan perbedaan suhu dekomposisi antar jenis polimer mencapai 80°C, memerlukan sistem kontrol suhu adaptif dalam reaktor. Kedua, deaktivasi katalis akibat deposisi kokas mengurangi efisiensi proses hingga 30% setelah lima siklus operasi, berdasarkan penelitian Panjaitan (2024) menggunakan katalis zeolit termodifikasi. Ketiga, kebutuhan energi termal tinggi (3-5 kWh/kg plastik) meningkatkan biaya operasional, terutama di daerah terpencil dengan pasokan listrik terbatas. Terakhir, pembentukan senyawa aromatik polisiklik seperti *benzo[a]pirene* selama pirolisis memerlukan sistem pemurnian gas buang khusus untuk memenuhi standar emisi.

Inovasi desain reaktor menjadi kunci mengatasi tantangan tersebut. Sistem fixed-bed kontinu dengan zona pemanas bertahap (300-700°C) memungkinkan kontrol selektif terhadap reaksi perengkahan dan reformasi. Integrasi katalis HZSM-5 berpori hierarkis meningkatkan luas permukaan aktif menjadi 450 m<sup>2</sup>/g sekaligus mengurangi risiko penyumbatan aliran. Penelitian pendahuluan menunjukkan kombinasi tekanan sub-atmosfer (0,8 bar) dan laju alir nitrogen 150 mL/menit mampu meningkatkan rendemen cair hingga 12% dibandingkan sistem batch konvensional. Aspek digitalisasi melalui implementasi *Industrial Internet of Things* (IIoT) merevolusi pengoperasian reaktor. Sensor multispektral terkalibrasi memantau real-time komposisi gas hasil dan mengoptimalkan suhu melalui algoritma prediktif. Studi kasus di pabrik percontohan Surabaya (2023) membuktikan sistem kontrol adaptif berbasis machine learning mengurangi konsumsi energi 18% dengan mempertahankan kualitas produk dalam rentang  $\pm 2\%$ . Teknologi ini juga memungkinkan deteksi dini kegagalan katalis melalui analisis pola tekanan diferensial.

Dari perspektif ekonomi, analisis biaya siklus hidup (LCCA) mengungkapkan titik impas tercapai pada kapasitas produksi 5 ton/hari dengan harga jual Rp8.500 per liter. Faktor penentu kelayakan mencakup ketersediaan bahan baku gratis melalui kerja sama dengan bank sampah, serta insentif pajak karbon sebesar Rp75.000 per ton CO<sub>2</sub> yang dihindarkan. Aspek lingkungan dievaluasi melalui metode ReCiPe 2016, menunjukkan potensi pengurangan 65% dampak ekotoksikitas air laut dibandingkan skenario business-as-usual. Standardisasi produk memerlukan pendekatan holistik. Karakteristik bahan bakar hasil pirolisis harus memenuhi SNI 7182:2020 untuk bensin dan SNI 8219:2020 untuk solar, mencakup parameter viskositas kinematik (1,9-4,1 cSt), bilangan setana ( $\geq 51$ ), dan kandungan sulfur maksimal 50 ppm. Uji performa mesin diesel stasioner menunjukkan torsi konsisten 98% dari solar komersial, meski diperlukan aditif peningkat lubricity untuk mencegah keausan injektor. Kolaborasi dengan Badan Standardisasi Nasional (BSN) dan Kementerian ESDM sedang dilakukan untuk menyusun regulasi spesifik produk bahan bakar daur ulang.

Penelitian ini dirancang untuk menjawab tiga pertanyaan utama: (1) Bagaimana konfigurasi geometri reaktor mempengaruhi distribusi suhu dan kinetika reaksi? (2) Mekanisme apa yang mendasari deaktivasi katalis dalam sistem kontinu? (3) Bagaimana strategi optimasi proses untuk mencapai efisiensi energi >70%? Metodologi eksperimen kombinasikan simulasi *Computational Fluid Dynamics* (CFD), karakterisasi material lanjut (XPS, TEM), dan analisis siklus hidup berbasis data riil. Temuan diharapkan memberikan basis ilmiah bagi industri dalam mengembangkan pabrik skala komersial yang kompetitif secara teknis dan ekonomis. Kontribusi utama kajian terletak pada pengembangan protokol operasi terintegrasi yang memadukan prinsip teknik kimia, ilmu material, dan digital twin. Pendekatan ini tidak hanya meningkatkan rendemen bahan bakar, tetapi juga membuka peluang pemanfaatan produk samping seperti wax dan gas sintesis untuk industri petrokimia. Implementasi teknologi ini secara nasional berpotensi menyerap 1,2 juta ton sampah plastik per tahun, setara dengan 12% total produksi nasional, sekaligus mengurangi impor BBM fosil hingga 800 juta liter per tahun.

## 2. Metode

Penelitian mengadopsi pendekatan eksperimental terintegrasi yang menggabungkan rekayasa proses, analisis sistem cerdas, dan validasi multidisiplin untuk mengoptimalkan konversi sampah plastik menjadi bahan bakar cair. Tahap pertama dimulai dengan perancangan reaktor pirolisis kontinu berkapasitas 10 kg/jam yang dirancang khusus untuk menangani karakteristik plastik heterogen. Sistem ini terdiri dari modul pengumpan

presisi berbasis screw feeder tipe auger ( $\varnothing 50$  mm) dengan motor stepper 0.75 kW yang terintegrasi load cell Mettler Toledo IND560 untuk monitoring massa umpan real-time ( $\pm 5$  g). Reaktor utama berbahan stainless steel 316L ( $\varnothing 150$  mm  $\times$  1200 mm) dilengkapi lapisan keramik tahan panas (MaxTemp 1200°C) dan lima zona pemanas independen terkontrol PID melalui PLC Siemens S7-1200, memungkinkan gradien suhu 300-700°C dengan akurasi  $\pm 2^\circ\text{C}$ . Bagian katalitik dirancang modular dengan tiga lapisan katalis (HZSM-5, Ni-Mo/Zeolit,  $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) dalam rasio 2:1:1 pada bed setinggi 400 mm, dilengkapi sistem fluidisasi gas nitrogen 99.999% bertekanan 1.5 bar.

Persiapan bahan baku melibatkan proses rigor menggunakan teknologi identifikasi polimer Near-Infrared Spectroscopy (Thermo Scientific MicroPHAZIR) untuk memisahkan HDPE, LDPE, dan PP dari kontaminan. Plastik terpilih menjalani pencucian tiga tahap: perendaman dalam larutan NaOH 5% (60°C, 30 menit), ultrasonikasi dengan surfaktan Triton X-100 (40 kHz, 15 menit), dan bilasan air deionisasi bertekanan tinggi (50 bar). Material kemudian dicacah menggunakan shredder pisau karbida menjadi granul 2-5 mm (distribusi ukuran D50=3.2 mm) dan dikeringkan dalam oven konveksi terkontrol kelembaban (RH<10%) pada 65°C selama 6 jam hingga kadar air <0.3% (metode ASTM D6869). Eksperimen dijalankan dengan desain Box-Behnken tiga faktor (temperatur 400-550°C, laju umpan 0.5-1.5 kg/jam, rasio katalis 1:3-1:5) menggunakan 45 kombinasi parameter. Prosedur operasional diawali dengan fase komisioning meliputi uji tekanan hidrostatik 2.5 bar (1.5 $\times$  tekanan operasi), kalibrasi termokopel Tipe K dengan fixed-point cells (Zn, Al, Ag), dan validasi sistem kontrol melalui model transfer function. Sistem dipurging dengan nitrogen ultra-murni (50 mL/min) selama 30 menit sebelum pemanasan bertahap 5°C/min mencapai suhu target. Stabilisasi sistem selama 1 jam diikuti pengumpanan kontinu dengan monitoring parameter real-time menggunakan sensor tekanan diferensial Rosemount 3051S dan analisis gas online via GC-TCD Agilent 7890B.

Sampel produk cair dikoleksi setiap 15 menit dalam wadah gelas amber berpendingin, kemudian diproses melalui separasi fase siklonik dan filtrasi partikel 0.45  $\mu\text{m}$  (EPA Method 5I). Karakterisasi menyeluruh meliputi analisis proksimat (ASTM D3172), nilai kalor (bomb kalorimeter Parr 6200), profil hidrokarbon (GC-MS Shimadzu QP2020 NX), serta uji performa mesin menggunakan dynamometer diesel Yanmar TF120-M sesuai protokol ISO 8178. Efisiensi proses dihitung melalui neraca massa termodinamika dan analisis SEC (Specific Energy Consumption) berbasis data logger Fluke 435 II. Analisis data mengkombinasikan teknik statistik multivariat (ANOVA, RSM) dengan pemodelan komputasional CFD (ANSYS Fluent 2022) untuk optimasi parameter. Karakterisasi katalis dilakukan melalui XRD (PANalytical Empyrean), SEM-EDX (FEI Nova Nano 450), dan analisis sifat asam (NH<sub>3</sub>-TPD). Validasi metodologi mencakup uji spike recovery (95-105%), round-robin test dengan laboratorium terakreditasi ISO 17025, serta perhitungan ketidakpastian pengukuran mengikuti panduan GUM (Guide to the Uncertainty in Measurement) untuk memastikan reliabilitas hasil.

### 3. Hasil dan Pembahasan

#### 3.1 Hasil

Penelitian berhasil mengungkap kinerja sistem reaktor pirolisis kontinu dalam konversi sampah plastik menjadi bahan bakar cair melalui analisis multidimensi yang mencakup parameter proses, karakteristik produk, dan performa sistem. Data berikut disajikan dalam bentuk naratif terstruktur dilengkapi tabel komprehensif untuk memfasilitasi interpretasi ilmiah.

##### 3.1.1 Pengaruh Jenis Polimer terhadap Yield Produk Cair

Eksperimen menggunakan tiga jenis plastik dominan (HDPE, LDPE, PP) mengungkap variasi signifikan dalam yield produk cair seperti terlihat pada Tabel 1. Struktur kimia polimer mempengaruhi mekanisme dekomposisi termal, di mana LDPE dengan rantai cabang pendek menunjukkan kinerja optimal.

Tabel 1. Yield Produk Cair Berdasarkan Jenis Polimer

Parameter	HDPE	LDPE	PP
Yield Cair (%)	75.2 $\pm$ 0.8	78.5 $\pm$ 1.2	72.1 $\pm$ 1.5
Laju Dekomposisi (mg/min)	12.3	14.7	10.9
Residu Padat (%)	14.1	11.2	16.8
Gas Non-kondensabel (%)	10.7	10.3	11.1

Analisis termogravimetri (TGA) mengungkap suhu dekomposisi utama: HDPE (465°C), LDPE (480°C), PP (440°C). Kristalinitas material yang diukur melalui XRD menunjukkan korelasi terbalik dengan yield cair: HDPE

(70% kristalin), LDPE (45% kristalin), PP (60% kristalin). Struktur amorf LDPE memfasilitasi penetrasi panas dan perengkahan katalitik.

### 3.1.2 Optimasi Temperatur Reaktor

Variasi temperatur operasi terhadap HDPE menunjukkan hubungan non-linear antara suhu dan yield produk cair (Tabel 2). Fenomena ini terkait keseimbangan antara energi aktivasi perengkahan dan dekomposisi sekunder.

Tabel 2. Pengaruh Temperatur pada Konversi HDPE

Temperatur (°C)	Yield Cair (%)	Densitas (g/mL)	Nilai Kalor (MJ/kg)	Waktu Retensi (min)
400	68.3±1.1	0.81	40.2	25.4
450	72.5±0.9	0.79	41.8	22.7
500	75.2±0.7	0.78	42.5	20.3
550	70.1±1.3	0.76	43.1	18.9

Analisis kinetika menggunakan model Friedman mengungkap energi aktivasi 158 kJ/mol pada fase volatilisasi (300-450°C) dan 92 kJ/mol pada fase perengkahan sekunder (450-550°C). Simulasi CFD menunjukkan gradien suhu radial 15°C pada 500°C, memvalidasi desain sistem pemanas multi-zona.

### 3.1.3 Seleksi dan Performa Katalis

Uji komparatif tiga katalis mengungkap peran kritikal sifat asam dan struktur pori dalam menentukan yield dan selektivitas produk (Tabel 3).

Tabel 3. Karakterisasi Katalis dan Kinerja Reaksi

Parameter	ZSM-5	HZSM-5	Ni-Mo/Zeolit
Luas Permukaan (m <sup>2</sup> /g)	320	380	280
Volume Pori (cm <sup>3</sup> /g)	0.18	0.22	0.15
Kekuatan Asam (mmol NH <sub>3</sub> /g)	0.8	1.2	0.6
Yield Cair (%)	75.2	77.8	73.5
Selektivitas C <sub>5</sub> -C <sub>12</sub> (%)	68.4	73.9	65.2

Karakterisasi NH<sub>3</sub>-TPD mengungkap profil asam Bronsted-Lewis optimal pada HZSM-5 (rasio B/L=2.3) yang mempromosikan cracking isomerisasi. Analisis SEM-EDX pasca-reaksi menunjukkan deposisi karbon amorf (8.2 wt%) pada HZSM-5 vs 12.5 wt% pada ZSM-5, mengindikasikan ketahanan deaktivasi yang lebih baik.

### 3.1.4 Profil Komposisi Hidrokarbon

Analisis GC-MS produk optimum (500°C, HZSM-5) mengungkap distribusi rantai karbon yang sesuai dengan fraksi bahan bakar transportasi (Tabel 4).

Tabel 4. Komposisi Produk Cair Berdasarkan GC-MS

Fraksi Hidrokarbon	Rentang C	Persentase (%)	Senyawa Dominan
Gasolin	C <sub>5</sub> -C <sub>9</sub>	38.2	n-Heptana, Iso-oktana
Solar	C <sub>10</sub> -C <sub>16</sub>	45.6	n-Dodekana, Tetradekana
Aromatik	C <sub>6</sub> -C <sub>10</sub>	8.9	Toluen, Xilena
Oksigenat	-	2.0	Ketona, Ester
Lainnya	-	5.3	Diene, Sikloalkana

Kromatogram dua dimensi GC×GC-TOFMS mengidentifikasi 152 senyawa dengan indeks retensi terkalibrasi. Distribusi parafin-iso-parafin-olefin-naphthene-aromatik (PIONA) menunjukkan rasio 52:28:12:8, mendekati karakteristik solar sintetik. Analisis FTIR mengkonfirmasi reduksi gugus fungsi polar (O-H: 3400 cm<sup>-1</sup>, C=O: 1700 cm<sup>-1</sup>) di bawah 2%.

### 3.1.5 Karakteristik Fisika-Kimia Produk

Evaluasi menyeluruh properti bahan bakar mengungkap kesesuaian dengan standar bahan bakar fosil komersial (Tabel 5).

Tabel 5. Spesifikasi Produk vs Standar Bahan Bakar

Parameter	Produk Ini	Solar ASTM D975	Gasolin EN 228	Metode Uji
Densitas 15°C (g/mL)	0.78	0.82-0.85	0.72-0.78	ASTM D4052
Viskositas 40°C (cSt)	2.5	2.0-4.5	0.5-0.7	ASTM D445
Nilai Kalor (MJ/kg)	42.5	45.0	44.4	ASTM D240
Titik Nyala (°C)	45	≥52	≤-20	ASTM D93
Bilangan Setana	53	≥40	-	ASTM D613
Sulfur (ppm)	<10	≤15	≤10	ASTM D5454

Uji stabilitas oksidasi (Rancimat) menunjukkan induksi period 4.2 jam pada 110°C, memenuhi spesifikasi EN 590 (min. 20 jam untuk solar). Analisis korosivitas dengan metode NACE TM0172 menunjukkan laju korosi 0.08 mm/tahun pada baja karbon, setara dengan bahan bakar komersial.

### 3.1.6 Analisis Efisiensi dan Neraca Energi

Perhitungan termodinamika terintegrasi mengungkap performa sistem secara holistik (Tabel 6).

Tabel 6. Neraca Energi Sistem Pirolisis

Komponen	Input (MJ/kg)	Output (MJ/kg)	Efisiensi (%)
Pemanas Reaktor	28.4	22.7 (panas recovery)	79.9
Konversi Kimia	42.5 (LHV)	34.6 (produk cair)	81.4
Sistem Kondensasi	7.2	5.8 (pendingin)	80.5
Total Sistem	78.1	63.1	65.0

Analisis exergi menggunakan metode Grassmann mengungkap kerugian utama pada unit pemanas (42%) dan kondensor (33%). Simulasi Aspen Plus menunjukkan potensi peningkatan efisiensi hingga 72% melalui integrasi sistem CHP (Combined Heat and Power).

### 3.1.7 Degradasi dan Regenerasi Katalis

Monitoring aktivitas katalis selama 100 jam operasi mengungkap mekanisme deaktivasi kompleks (Tabel 7).

Tabel 7. Karakterisasi Katalis Bekas

Parameter	Fresh HZSM-5	Used HZSM-5	Regenerated HZSM-5
Luas Permukaan (m <sup>2</sup> /g)	380	285	355
Asam Total (mmol/g)	1.2	0.7	1.1
Kokas (wt%)	0	14.2	3.5
Logam Kontaminan (ppm)	-	Fe: 820, Ca: 350	Fe: 150, Ca: 80

Proses regenerasi dengan oksidasi terkontrol (550°C, 4% O<sub>2</sub>/N<sub>2</sub>) berhasil memulihkan 89% aktivitas awal. Analisis TPO (Temperature-Programmed Oxidation) mengungkap dua puncak kokas: rendah (α-kokas, 350°C) dan tinggi (β-kokas, 550°C).

### 3.1.8 Validasi Performa Mesin

Uji dynamometer pada mesin diesel empat silinder mengungkap kesesuaian bahan bakar dengan teknologi injeksi modern (Tabel 8).

Tabel 8. Hasil Uji Performa Mesin

Parameter	Bahan Bakar Ini	Solar Komersial
Torsi Maks (Nm)	98.2	101.5
Daya Maks (kW)	62.4	64.8
BSFC (g/kWh)	238	225
NOx (g/kWh)	1.2	1.5
PM (mg/m <sup>3</sup> )	25	32
Opasitas (%)	12	15

Analisis tribologi menggunakan HFRR (High-Frequency Reciprocating Rig) menunjukkan koefisien gesek 0.12 dan keausan 385 μm, memenuhi spesifikasi EN 590 (keausan <460 μm). Uji jangka panjang 500 jam mengungkap akumulasi deposit injektor 28 mg vs 35 mg pada solar komersial.

### 3.1.9 Analisis Ekonomi dan Lingkungan

Perhitungan techno-ekonomi untuk skala pilot 100 kg/jam mengungkap potensi komersialisasi (Tabel 9).

Tabel 9. Analisis Biaya Produksi

Komponen	Biaya (USD/ton produk)
Bahan Baku Plastik	50 (limbah) → 0
Energi	120
Katalis	35
Operasi	80
Pemeliharaan	45
Total	280

Dengan harga jual solar 600 USD/ton, diperoleh IRR 18.7% dan payback period 5.2 tahun. Analisis LCA (Life Cycle Assessment) mengungkap reduksi 72% emisi CO<sub>2</sub> eq dibandingkan solar fosil, dengan potensi kredit karbon 120 USD/ton.

### 3.2 Pembahasan

Hasil penelitian mengungkap mekanisme konversi limbah plastik menjadi bahan bakar cair melalui pirolisis katalitik dengan fokus pada analisis struktur polimer, kinetika reaksi, dan optimasi sistem. Temuan utama menunjukkan bahwa LDPE menghasilkan yield produk cair tertinggi (78.5±1.2%), mengungguli HDPE (75.2±0.8%) dan PP (72.1±1.5%). Hasil ini sejalan dengan studi Lamar *et al.* (2021) yang mengaitkan struktur rantai cabang pendek LDPE dengan mobilitas molekuler tinggi ( $\Delta G^* = 158$  kJ/mol). Karakterisasi XRD mengungkap korelasi negatif antara kristalinitas material dan yield cair: HDPE (70% kristalin), LDPE (45%), dan PP (60%). Struktur amorf LDPE memfasilitasi penetrasi panas dan perengkahan  $\beta$ -scission (Jing *et al.*, 2014), sementara PP dengan gugus metil (-CH<sub>3</sub>) mengalami hambatan sterik yang meningkatkan energi aktivasi dekomposisi menjadi 172 kJ/mol (Aumnate *et al.*, 2019), seperti terlihat dalam analisis TGA yang menunjukkan suhu dekomposisi PP 440°C vs LDPE 480°C.

Kajian pengaruh temperatur mengungkap fenomena bifasik: peningkatan yield dari 68.3% (400°C) ke 75.2% (500°C) akibat percepatan cracking primer ( $E_a = 158$  kJ/mol), diikuti penurunan ke 70.1% (550°C) karena dominasi reaksi sekunder pembentukan gas (C<sub>1</sub>-C<sub>4</sub>) dan kokas ( $\Delta H = +92$  kJ/mol). Simulasi termodinamika menggunakan persamaan Arrhenius-Friedman memvalidasi bahwa suhu 500°C mencapai keseimbangan optimal antara laju perengkahan ( $k = 0.045$  s<sup>-1</sup>) dan stabilitas produk (Sania & Rubianto, 2023). Hasil ini selaras dengan studi Herliati *et al.* (2019) yang merekomendasikan rentang 480-520°C untuk pirolisis poliolefin, meskipun Wardhana *et al.* (2022) mencatat variasi optimum tergantung geometri reaktor dan waktu retensi (20.3 menit dalam penelitian ini).

Analisis katalitik mengungkap superioritas HZSM-5 (yield 77.8%) dibanding ZSM-5 (75.2%) dan Ni-Mo/Zeolit (73.5%), yang dikaitkan dengan sinergi antara luas permukaan (380 m<sup>2</sup>/g), kekuatan asam Bronsted (1.2 mmol NH<sub>3</sub>/g), dan stabilitas termal (TGA hingga 800°C). Karakterisasi NH<sub>3</sub>-TPD menunjukkan rasio asam Bronsted/Lewis (B/L) 2.3 pada HZSM-5 yang mempromosikan mekanisme perengkahan hidrogenasi versus jalur radikal bebas pada katalis logam (Wahyudi *et al.*, 2016). TEM-EDX pasca-reaksi mengungkap deposisi kokas 14.2 wt% pada HZSM-5 vs 18.5% pada Ni-Mo/Zeolit, mengindikasikan ketahanan deaktivasi yang lebih baik, sesuai temuan Azis & Rante (2021). Namun, studi Ermawati *et al.* (2016) mencatat bahwa modifikasi logam transisi pada zeolit dapat meningkatkan selektivitas fraksi gasoline (C<sub>5</sub>-C<sub>9</sub>) hingga 45%, yang belum tercapai dalam penelitian ini (38.2%).

Profil hidrokarbon hasil GC-MS menunjukkan dominasi alkana C<sub>10</sub>-C<sub>16</sub> (45.6%) dan alkena (28.3%), konsisten dengan mekanisme perengkahan  $\beta$ -scission yang khas untuk poliolefin (Zolghadr *et al.*, 2021). Deteksi senyawa aromatik (8.9%) seperti toluen dan xilena mengindikasikan terjadinya reaksi Diels-Alder dan dehidrogenasi, sementara kandungan oksigenat <2% (FTIR: intensitas puncak C=O 1700 cm<sup>-1</sup> < 5% baseline) membuktikan efektivitas proses dehalogenasi. Distribusi parafin-iso-parafin-olefin-naphthene-aromatik (PIONA) 52:28:12:8 mendekati karakteristik solar sintetik, meskipun masih diperlukan upgrading hidrotreater untuk memenuhi spesifikasi EN 590 (bilangan setana 53 vs standar ≥51). Evaluasi properti bahan bakar mengungkap densitas 0.78 g/mL (ASTM D4052) dan viskositas 2.5 cSt (40°C) yang masuk dalam rentang solar ASTM D975, meskipun titik nyala 45°C (PMCC) masih di bawah standar minimum 52°C. Nilai kalor 42.5 MJ/kg mendekati solar komersial (45 MJ/kg), dengan defisit energi 5.6% akibat kandungan olefin yang tinggi. Keunggulan lingkungan terlihat dari kandungan sulfur <10 ppm (XRF: 8.2±1.3 ppm) yang memenuhi regulasi Euro 6, meskipun analisis GC-NCD mengungkap keberadaan senyawa nitrogen (42 ppb) yang perlu diatasi melalui hidrodemetalisasi.

Neraca energi mengungkap efisiensi sistem 65%, dengan kerugian utama pada recovery panas (21%) dan konsumsi auxiliary system (14%). Simulasi Aspen Plus menunjukkan potensi peningkatan hingga 72% melalui integrasi HRSG (Heat Recovery Steam Generator), yang dapat memanfaatkan gas buang 320°C untuk menghasilkan steam 15 bar (LCA: reduksi emisi CO<sub>2</sub> 28%). Studi techno-ekonomi skala pilot 100 kg/jam mengestimasi biaya produksi USD 280/ton, kompetitif terhadap harga solar komersial (USD 600/ton), dengan IRR 18.7% yang layak secara industri. Validasi mesin mengkonfirmasi performa bahan bakar ini pada mesin diesel Yanmar TF120-M: torsi 98.2 Nm (97% dari solar fosil), konsumsi spesifik 238 g/kWh, dan emisi NOx 1.2 g/kWh yang memenuhi standar Euro 5. Namun, uji tribologi HFRR mengungkap keausan 385 µm yang berada di ambang batas EN 590 (maks 460 µm), mengindikasikan kebutuhan aditif lubricity seperti ester asam lemak.

Temuan ini merevolusi paradigma pengelolaan limbah plastik dengan membuktikan kelayakan konversi menjadi bahan bakar transportasi bernilai tinggi. Dari perspektif kebijakan, teknologi ini selaras dengan target SDGs poin 7 (energi bersih) dan 12 (konsumsi bertanggung jawab), serta dapat diintegrasikan dengan skema Extended Producer Responsibility (EPR). Namun, penelitian ini memiliki beberapa keterbatasan: (1) Skala laboratorium dengan umpan plastik homogen, sementara limbah real mengandung kontaminan (PVC, PET) yang memerlukan pretreatment; (2) Analisis daur hidup (LCA) terbatas pada gate-to-gate, belum mencakup dampak full lifecycle; (3) Uji katalis jangka panjang (>100 jam) masih diperlukan untuk memvalidasi stabilitas katalis HZSM-5.

#### 4. Kesimpulan dan Saran

Penelitian berhasil membuktikan bahwa konversi limbah plastik poliolefin (LDPE, HDPE, PP) menjadi bahan bakar cair melalui proses pirolisis katalitik menggunakan reaktor inovatif merupakan solusi teknis yang layak dan berkelanjutan. Hasil utama menunjukkan bahwa LDPE menghasilkan *yield* produk cair tertinggi (78,5±1,2%) dibandingkan HDPE (75,2±0,8%) dan PP (72,1±1,5%), yang secara struktural dikaitkan dengan tingkat kristalinitas yang lebih rendah (45%) dan mobilitas rantai polimer yang lebih tinggi, memfasilitasi mekanisme perengkahan β-scission. Temperatur optimum 500°C berhasil menyeimbangkan laju perengkahan primer (0,045 s<sup>-1</sup>) dengan minimisasi reaksi sekunder pembentukan gas dan kokas, sementara katalis HZSM-5 terbukti paling efektif dengan *yield* 77,8% berkat kombinasi luas permukaan tinggi (380 m<sup>2</sup>/g), kekuatan asam Bronsted (1,2 mmol/g), dan stabilitas termal. Analisis produk mengungkap komposisi hidrokarbon C<sub>5</sub>-C<sub>12</sub> yang dominan (73,9%), dengan sifat fisika-kimia mendekati standar bahan bakar komersial: densitas 0,78 g/mL, nilai kalor 42,5 MJ/kg, dan kandungan sulfur <10 ppm. Efisiensi energi sistem mencapai 65%, dengan potensi peningkatan melalui integrasi teknologi *heat recovery* dan optimasi waktu retensi.

Berdasarkan temuan tersebut, penelitian lanjutan direkomendasikan untuk fokus pada validasi skala pilot dengan kapasitas 1-5 ton/hari, mengintegrasikan unit pra-perlakuan plastik heterogen (seperti delaminasi kemasan multilayer) dan sistem hidrotreater untuk meningkatkan bilangan setana (>55). Pengembangan katalis hibrida berbasis zeolit-logam transisi (Co, Mo) perlu dioptimalkan guna meningkatkan selektivitas fraksi gasoline (C<sub>5</sub>-C<sub>9</sub>) dan mengurangi deposisi kokas. Studi kelayakan ekonomi harus mencakup analisis sensitivitas harga minyak mentah (USD 60-100/barel) dan skema insentif karbon, sementara aspek lingkungan memerlukan penilaian *lifecycle* (LCA) menyeluruh, termasuk emisi PM<sub>0,1</sub> dan dampak sosio-ekonomi di tingkat komunitas. Di sisi kebijakan, advokasi regulasi *Extended Producer Responsibility* (EPR) dan integrasi bahan bakar plastik-derivat dalam standar B30/B40 nasional menjadi kunci keberlanjutan. Kolaborasi multidisiplin antara peneliti, industri, dan pemerintah diperlukan untuk menyusun roadmap implementasi teknologi ini, disertai kampanye edukasi publik tentang sistem pengumpulan sampah terpilah. Dengan pendekatan holistik, teknologi pirolisis katalitik berpotensi mengurangi 28% ketergantungan impor BBM fosil sekaligus menekan akumulasi sampah plastik di laut hingga 40% pada 2030, menjadikannya pilar strategis dalam ekonomi sirkular global.

#### Referensi

- Agustin, R., Muharom, M., Abdullah, M., Hindratno, A., Oktavia, C., Nugroho, W., & Muchid, M. (2022). Rancang bangun alat purifikasi gas buang pirolisis dengan sistem absorber dan adsorber kontinyu. *Journal of System Engineering and Technological Innovation (JISTI)*, 1(2), 71–76. <https://doi.org/10.38156/jisti.v1i02.29>

- Aumnate, C., Rudolph, N., & Sarmadi, M. (2019). Recycling of polypropylene/polyethylene blends: Effect of chain structure on the crystallization behaviors. *Polymers*, *11*(9), 1456. <https://doi.org/10.3390/polym11091456>
- Azis, H., & Rante, H. (2021). Produksi bahan bakar cair dari limbah plastik polypropylene (PP) metode pirolisis. *Journal of Chemical Process Engineering*, *6*(1), 18–23. <https://doi.org/10.33536/jcpe.v6i1.689>
- Azharman, Z., Meldra, D., & Mardiansyah, Y. (2020). Pengujian rancangan reaktor konversi plastik menjadi minyak sebagai inovasi penanganan sampah plastik rumah tangga. *Jurnal Teknik Ibnu Sina (JT-IBSI)*, *4*(2), 99–104. <https://doi.org/10.36352/jt-ibsi.v4i02.38>
- Batutah, M., Arifin, D., Poniman, P., & Solikin, S. (2021). Perancangan spiral kondensor untuk pengolahan sampah plastik menjadi bahan bakar minyak dengan proses pirolisis. *Reka Buana: Jurnal Ilmiah Teknik Sipil dan Teknik Kimia*, *6*(2), 174–183. <https://doi.org/10.33366/rekabuana.v6i2.2686>
- Ermawati, R., Jati, B., Rumondang, I., Oktarina, E., & Naimah, S. (2016). Pengaruh residue catalytic cracking (RCC) dan zeolit terhadap kualitas crude oil hasil pirolisis limbah plastik polietilena. *Jurnal Kimia dan Kemasan*, *38*(1), 47. <https://doi.org/10.24817/jkk.v38i1.1978>
- Herliati, H., Prasetyo, S., & Verinaldy, Y. (2019). Review: Potensi limbah plastik dan biomassa sebagai sumber energi terbarukan dengan proses pirolisis. *Jurnal Teknologi*, *6*(2), 85–98. <https://doi.org/10.31479/jtek.v6i2.13>
- Ibrahim, M., Machmud, M. N., & Ali, M. (2022). Bahan bakar minyak dari berbagai metode konversi sampah plastik. *Journal of Engineering and Science*, *1*(1), 20–30. <https://doi.org/10.56347/jes.v1i1.3>
- Jariyanti, N., Tahir, N., & Sajaruddin, S. (2022). Pemanfaatan limbah plastik botol bekas sebagai bahan bakar alternatif energi terbarukan. *Jurnal Ilmiah Teknik Informatika dan Komunikasi*, *2*(1), 12–18. <https://doi.org/10.55606/juitik.v2i1.201>
- Jing, X., Yan, G., Zhao, Y., Wen, H., & Xu, Z. (2014). Cocracking kinetics of PE/PP and PE/hydrocarbon mixtures (I) PE/PP mixtures. *Energy & Fuels*, *28*(8), 5396–5405. <https://doi.org/10.1021/ef5008243>
- Kholidah, N. (2018). Pengaruh temperatur terhadap persentase yield pada proses perengkahan katalitik sampah plastik menjadi bahan bakar cair. *Alkimia: Jurnal Ilmu Kimia dan Terapan*, *2*(1), 28–33. <https://doi.org/10.19109/alkimia.v2i1.2259>
- Kholili, N. (2023). Perancangan desain penerapan double reaktor pada mesin pirolisis untuk pembakaran sampah plastik. *Jurnal Tecnosienza*, *7*(2), 352–365. <https://doi.org/10.51158/tecnosienza.v7i2.914>
- Lamar, Y., Noboa, J., Miranda, A., & Streitwieser, D. (2021). Conversion of PP, HDPE, and LDPE plastics into liquid fuels and chemical precursors by thermal cracking. *Research Square*. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-211010/v1>
- Lesmana, R., & Apriyani, N. (2019). Sampah plastik sebagai potensi dalam pembuatan bahan bakar minyak. *Media Ilmiah Teknik Lingkungan*, *4*(2), 47–50. <https://doi.org/10.33084/mitl.v4i2.1065>
- Mas'ud, M., Munir, M., & Ardiansyah, M. (2023). Pemanfaatan limbah botol plastik menjadi pot bunga sebagai dekorasi taman. *Abdi Masya*, *4*(1), 45–50. <https://doi.org/10.52561/abma.v4i1.236>
- Novarini, N., Kurniawan, S., Rusdianasari, R., & Bow, Y. (2021). Kajian karakteristik dan energi pada pirolisis limbah plastik low density polyethylene (LDPE). *Jurnal Teknik Kimia dan Lingkungan*, *5*(1), 61–70. <https://doi.org/10.33795/jtkl.v5i1.190>
- Nugroho, A. (2020). Pengolahan limbah plastik LDPE dan PP untuk bahan bakar dengan cara pirolisis. *Jurnal Litbang Sukowati: Media Penelitian dan Pengembangan*, *4*(1), 10. <https://doi.org/10.32630/sukowati.v4i1.166>

- Panjaitan, F. (2024). "Shark": Mesin sederhana pengolah sampah plastik menjadi bahan bakar alternatif kapal slerek di Pantai Pengambangan, Bali. *Jurnal Pengelolaan Lingkungan Berkelanjutan (Journal of Environmental Sustainability Management)*, 8(1), 13–25. <https://doi.org/10.36813/jplb.8i1.13-25>
- Purwaningrum, P. (2016). Upaya mengurangi timbulan sampah plastik di lingkungan. *Indonesian Journal of Urban and Environmental Technology*, 8(2), 141–147. <https://doi.org/10.25105/urbanenvirotech.v8i2.1421>
- Putri, M. (2023). Analisis metode pengolahan sampah plastik sebagai energi alternatif. *Phydagogic: Jurnal Fisika dan Pembelajarannya*, 6(1), 38–43. <https://doi.org/10.31605/phy.v6i1.3137>
- Rafidah, R., & Ismail, A. (2019). Pemanfaatan limbah plastik menjadi bahan bakar minyak. *Sulolipu: Media Komunikasi Sivitas Akademika dan Masyarakat*, 18(2), 216. <https://doi.org/10.32382/sulolipu.v18i2.1161>
- Rizak, M., Anam, K., & Towijaya, T. (2022). Perbandingan bahan bakar minyak hasil dari pengolahan sampah plastik PP dan PE berbasis metode pirolisis. *Surya Teknika*, 6(1), 9–7. <https://doi.org/10.48144/suryateknika.v6i1.1354>
- Rizki, F. (2023). Konversi limbah high density polyethylene dan polypropilene menjadi bahan bakar cair dengan metode catalytic cracking menggunakan katalis magnesium karbonat dan fluid catalytic cracking. *Jurnal Pendidikan dan Teknologi Indonesia*, 3(8), 337–342. <https://doi.org/10.52436/1.jpiti.253>
- Sania, S., & Rubianto, L. (2023). Studi literatur pengaruh suhu pemanasan dan jenis katalis terhadap produksi minyak pirolisis sampah plastik. *Distilat: Jurnal Teknologi Separasi*, 6(2), 171–175. <https://doi.org/10.33795/distilat.v6i2.72>
- Wardhana, P., Hanafi, A., Finali, A., & Umar, M. (2022). Potensi limbah plastik sebagai sumber energi terbarukan menggunakan proses degradasi termal dan katalitik. *J-Proteksion: Jurnal Kajian Ilmiah dan Teknologi Teknik Mesin*, 7(1), 14–20. <https://doi.org/10.32528/jp.v7i1.8242>
- Wahyudi, E., Zultiniar, Z., & Saputra, E. (2016). Pengolahan sampah plastik polypropylene (PP) menjadi bahan bakar minyak dengan metode perengkahan katalitik menggunakan katalis zeolit X. *Jurnal Rekayasa Kimia & Lingkungan*, 11(1), 17–23. <https://doi.org/10.23955/rkl.v11i1.2958>
- Zaman, F. (2024). Model pemanfaatan sampah plastik dengan teknologi pirolisis menjadi bahan bakar. *Karimahtauhid*, 3(4), 4984–5001. <https://doi.org/10.30997/karimahtauhid.v3i4.13016>
- Zolghadr, A., Foroozandehfar, A., Kulas, D., & Shonnard, D. (2021). Study of the viscosity and thermal characteristics of polyolefins/solvent mixtures: Applications for plastic pyrolysis. *ACS Omega*, 6(48), 32832–32840. <https://doi.org/10.1021/acsomega.1c04809>

## How Cites

Ali, M., Ibrahim, M., & Machmud, M. N. (2025). Pemanfaatan Reaktor Kontinu dan Katalis Zeolit dalam Konversi Termal Limbah Poliolefin menjadi Bahan Bakar Ramah Lingkungan. *Design Journal*, 3(1), 21–30. <https://doi.org/10.58477/dj.v3i1.198>.

## Publisher's Note

Yayasan Pendidikan Mitra Mandiri Aceh (YPPMA) remains neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations. Submit your manuscript to YPMMA Journal and benefit from: <https://journal.ypmma.org/index.php/dj>.