

## Optimasi Proses Pirolisis Pada Sampah Plastik LDPE (*Low Density Polythylene*) Menggunakan Pendekatan RSM (*Response Surface Methodology*) Menjadi Bahan Bakar Minyak

Ainun Nadiya Alya Salsabila<sup>1</sup>, Kusmiyati<sup>2\*</sup>

Program Studi Teknik Industri, Fakultas Teknik, Universitas Dian Nuswantoro  
Jl. Imam Bonjol No. 207, Pendrikan Kidul, Kec. Semarang Tengah, Kota Semarang, Jawa Tengah  
[nadiyaalya06@gmail.com](mailto:nadiyaalya06@gmail.com), [kusmiyati@dsn.dinus.ac.id](mailto:kusmiyati@dsn.dinus.ac.id)\*

### ABSTRAK

Penelitian ini mengombinasikan LDPE, katalis zeolit alam, dan optimasi proses menggunakan *Response Surface Methodology* (RSM) berbasis *Central Composite Design* (CCD) untuk memaksimalkan *yield* minyak pirolisis melalui laju pemanasan (10–30 °C/menit) dan berat katalis (10–30 g). Kondisi optimal tercapai pada laju pemanasan 10 °C/menit dan berat katalis 24,04 g, menghasilkan 523,83 mL atau 52,38% *yield* terhadap masa umpan. Analisis GC-MS menunjukkan dominasi *methyl ester of ricinoleic acid* (39,44%), *oleic acid* (16,22%), dan *9-octadecenoic acid, methyl ester* (10,25%) dengan karakteristik fraksi yang umum ditemukan pada solar. Model kuadratik signifikan ( $R^2= 0,9394$ ) membuktikan efektivitas RSM dalam optimasi konversi LDPE.

**Kata Kunci:** Pirolisis, LDPE, Bahan Bakar Minyak, RSM, GC-MS, Optimasi.

### ABSTRACT

*This study combines LDPE, natural zeolite catalyst, and process optimization using Response Surface Methodology (RSM) based on Central Composite Design (CCD) to maximize pyrolysis oil yield through heating rate (10–30 °C/min) and catalyst weight (10–30 g). Optimal conditions were achieved at a heating rate of 10 °C/min and a catalyst weight of 24.04 g, producing 523.83 mL or 52.38%. GC-MS analysis showed the dominance of methyl ester of ricinoleic acid (39.44%), oleic acid (16.22%), and 9-octadecenoic acid, methyl ester (10.25%) with fraction characteristics commonly found in diesel fuel. A significant quadratic model ( $R^2= 0.9394$ ) proved the effectiveness of RSM in optimizing LDPE conversion.*

**Keywords:** Pyrolysis, LDPE, Fuel Oil, RSM, GC-MS, Optimization.

### Pendahuluan

Sampah merupakan material sisa yang tidak lagi digunakan oleh manusia dan umumnya dibuang. Masyarakat cenderung memandang sampah sebagai sesuatu yang kotor, sehingga perlu segera dibakar atau dibuang [1]. Berdasarkan data Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan, timbulan sampah nasional pada tahun 2022 mencapai 38,54 juta ton, dengan 37,37% di antaranya tidak terkelola. Jawa Tengah menjadi penyumbang sampah terbesar akibat tingginya kepadatan penduduk urbanisasi dan aktivitas ekonomi yang intensif [2].

Sampah terdiri dari dua jenis, yaitu organik dan anorganik. Sampah terdiri atas dua jenis, yaitu organik dan anorganik. Sampah organik berasal dari bahan-bahan hayati yang dapat terurai secara alami melalui proses biologi, seperti pembusukan oleh mikroorganisme. Sampah anorganik berasal dari aktivitas industri dan non industri yang sulit terurai secara alami sehingga cenderung menumpuk dan berpotensi mengganggu keseimbangan lingkungan [3];[4]

Sampah plastik merupakan penyumbang utama pencemaran lingkungan global. Plastik dibagi menjadi termoplastik yang dapat didaur ulang, dan termoset yang tidak dapat dilelehkan kembali setelah mengeras [5];[6]. Plastik LDPE (*Low Density Polythylene*) termasuk salah satu jenis plastik yang bersifat termoplastik dan dibuat dari minyak bumi [7]. Jenis-jenis plastik LDPE yang umumnya dipakai contohnya bungkus makanan ringan, kantong kresek, plastik sampah botol – botol yang lembut dan plastik tipis lainnya [8]. Material plastik telah berkembang pesat dan sekarang mempunyai peranan yang sangat penting dibidang elektronika, tekstil, furniture, kemasan kosmetik, mainan anak – anak dan produk – produk industri lainnya [9].

Metode yang dapat digunakan untuk mengkonversi sampah plastik menjadi bahan bakar cair, antara lain: *pyrolysis*, *thermal cracking*, and *catalitic cracking*. Diantara ketiga metode tersebut, metode pirolisis adalah metode yang dinilai prospektif untuk mengonversi limbah plastik menjadi minyak tanpa proses kimia kompleks dan termasuk dekomposisi termal pada kondisi minim atau tanpa oksigen yang menghasilkan uap [10];[11]. Pengelolaan sampah plastik melalui teknologi pirolisis memerlukan partisipasi aktif masyarakat untuk menjamin keberlanjutan penerapannya [12].

Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa proses pirolisis tanpa penggunaan katalis menghasilkan minyak yang kurang optimal sehingga memerlukan suhu dan waktu reaksi lebih tinggi serta menurunkan efisiensi proses akibat dekomposisi termal yang kurang efektif. Hal ini ditunjukkan oleh karakteristik minyak yang memiliki bau menyengat, warna

keruh pada suhu tinggi, serta kecenderungan menghasilkan jelaga saat proses pembakaran. Untuk mendapatkan hasil minyak yang optimal penelitian tersebut perlu menerapkan pendekatan optimasi berbasis statistik, dan sebagian besar hanya terbatas pada eksplorasi variasi temperatur tanpa mempertimbangkan interaksi antar variabel secara sistematis [13]. Berdasarkan latar belakang tersebut, studi ini memanfaatkan katalis zeolit alam untuk meningkatkan konversi termal serta mengoptimalkan proses pirolisis plastik LDPE menggunakan metode *Response Surface Methodology* (RSM) dengan desain eksperimen *Central Composite Design* (CCD). Analisis dilakukan untuk mengevaluasi pengaruh simultan laju pemanasan dan berat katalis terhadap volume minyak, membangun model kuadratik guna memprediksi kondisi optimum, serta menilai potensi minyak sebagai bahan bakar alternatif. Kebaruan penelitian ini terletak pada kombinasi penggunaan LDPE, katalis zeolit alam, dan optimasi RSM–CCD dengan fokus pada kedua variabel tersebut secara bersamaan.

## Metode Penelitian

Penelitian ini menggunakan metode eksperimental dan optimasi yang dilakukan untuk memanfaatkan sampah plastik pada proses pirolisis menjadi bahan bakar minyak.

### Bahan Penelitian

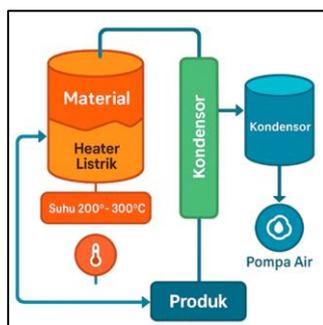
Bahan baku yang digunakan seperti pada Gambar 1 adalah limbah plastik LDPE pascakonsumsi sebanyak 1 kg untuk setiap percobaan. Pemilihan LDPE didasarkan pada ketersediaannya yang melimpah dan potensinya sebagai bahan bakar cair melalui pirolisis. Penggunaan massa yang konsisten (dicacah) bertujuan menjaga keseragaman kondisi dan memastikan akurasi perbandingan hasil antar variabel.



**Gambar 1.** Plastik LDPE yang telah dicacah

### Alat Penelitian

Gambar 2 memperlihatkan rangkaian peralatan pirolisis penelitian yang terdiri dari tabung reaktor, kondensor, tabung penampung minyak, termometer, dan tabung air pendingin. Reaktor dilengkapi pemanas LPG dengan suhu operasi 200–300°C dan menggunakan katalis zeolit alam untuk meningkatkan efisiensi pirolisis. Volume minyak diukur langsung dengan gelas ukur.



**Gambar 2.** Rangkaian alat pirolisis yang digunakan pada penelitian ini

### Cara Kerja

Bahan baku cacahan plastik (LDPE) dimasukkan ke dalam reaktor berbentuk tabung yang dilengkapi dengan pemanas sebagai sumber panas. Reaktor ini beroperasi pada rentang suhu antara 200 – 300°C, di mana suhu dapat dimonitor melalui sistem kontrol temperatur. Pada suhu tersebut, material plastik mengalami proses degradasi termal secara *anaerob* (tanpa oksigen), dan menghasilkan uap hidrokarbon sebagai produk pirolisis primer. Uap yang dihasilkan dari reaktor kemudian dialirkan melalui pipa menuju kondensor. Kondensor berfungsi untuk menurunkan suhu uap dan mengubahnya menjadi bentuk cair. Pendinginan kondensor didukung oleh sirkulasi air dari tabung air. Air pendingin ini mengalir secara terus-menerus, menyerap panas dari uap pirolisis, lalu kembali ke tabung air untuk menjaga suhu sistem tetap stabil. Setelah mengalami kondensasi, uap hidrokarbon akan berubah menjadi cairan yang kemudian ditampung sebagai produk minyak hasil pirolisis. Minyak ini kemudian diukur volumenya dan dianalisis dengan GC-MS untuk melihat kandungannya.

### Design Of Experiment (DOE)

Perancangan eksperimen atau DOE yaitu bidang statistik terapan yang merencanakan, melakukan, menganalisis, dan menginterpretasikan uji terkontrol untuk menilai faktor-faktor yang mempengaruhi nilai parameter. Desain percobaan dilakukan menggunakan metode *Central Composite Design* (CCD) dengan pendekatan *Response Surface Methodology* (RSM) [14]. CCD dipilih karena mampu mengidentifikasi efek linier, interaksi, dan kuadrat dari variabel bebas dengan jumlah eksperimen yang efisien [15].

**Tabel 1.** Penentuan Faktor dan Level

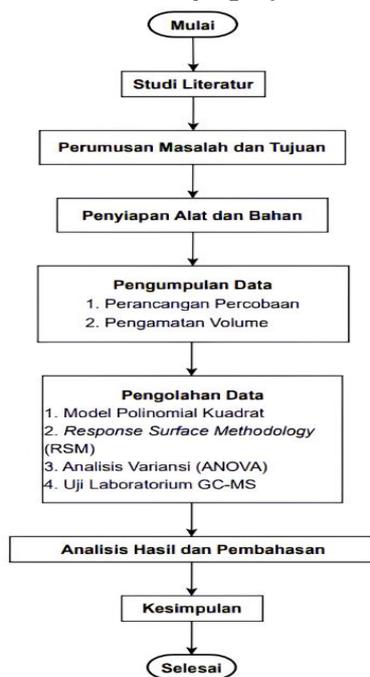
Variabel	Simbol	Kode Level		
		-1	0	1
A : Kecepatan Suhu ( $^{\circ}\text{C}/\text{menit}$ )	$X_1$	10	20	30
B : Berat Katalis ( <i>gram</i> )	$X_2$	10	20	30

Faktor dan level faktor yang akan diujikan dapat dilihat pada Tabel 1. Faktor-faktor yang digunakan dalam penelitian antara lain  $X_1$  sebagai laju pemanasan ( $^{\circ}\text{C} / \text{menit}$ ) dan  $X_2$  sebagai berat katalis (*gram*). Level faktor masing-masing diberi kode antara lain level rendah dengan kode -1, level menengah dengan kode 0, serta level tinggi dengan kode +1. Berdasarkan faktor dan level faktor pada Tabel 1 memperoleh hasil rancangan percobaan A sebagai laju pemanasan dan B sebagai berat katalis dari *software Design Expert* yang dapat dilihat pada Tabel 2 berikut :

**Tabel 2.** Perancangan Percobaan

Run	Faktor 1	Faktor 2
	A : Kecepatan Suhu ( $^{\circ}\text{C}/\text{menit}$ )	B : Berat Katalis ( <i>gram</i> )
1	10	30
2	20	20
3	20	20
4	33.41	20
5	30	30
6	6.59	20
7	20	33.41
8	20	20
9	30	10
10	20	20
11	20	6.59
12	10	10

Gambar 3 menunjukkan tahapan penelitian optimasi pirolisis LDPE, dimulai dari studi literatur hingga kesimpulan. Proses ini mencakup perumusan masalah, persiapan alat dan bahan, perancangan percobaan, hingga analisis data menggunakan pendekatan RSM dan uji laboratorium GC-MS yang dapat dilihat pada diagram alir berikut ini :



**Gambar 3.** Diagram Alir Penelitian

### Hasil Dan Pembahasan

Penelitian ini bertujuan untuk menguji optimasi hasil pengaruh laju pemanasan, berat katalis dan volume minyak yang dihasilkan dari sampah jenis LDPE melalui proses pirolisis.

#### Data Hasil Pirolisis

Penelitian ini dilakukan dengan mempirolisis sampah plastik jenis LDPE menggunakan rentang parameter proses pirolisis yaitu laju pemanasan 10-30 °C/menit dan berat katalis yaitu 10-30 g.

Tabel 3. Data Hasil Pirolisis Sampah Plastik LDPE

Run	Faktor 1	Faktor 2	Volume Minyak (mL)			Rata – Rata Volume (mL)
	A : Kecepatan Suhu (°C/menit)	B : Berat Katalis (gram)	Respon 1	Respon 2	Respon 3	
1	10	30	500	450	500	483.3
2	20	20	450	550	550	516.7
3	20	20	450	350	500	433.3
4	33.41	20	350	400	475	408.3
5	30	30	350	300	325	325
6	6.59	20	350	500	500	450
7	20	33.41	300	250	275	275
8	20	20	350	200	450	333.3
9	30	10	450	300	425	391.7
10	20	20	500	300	500	433.3
11	20	6.59	200	350	275	275
12	10	10	250	300	275	275

Berdasarkan Tabel 3, hasil penelitian run 1–12 menunjukkan bahwa plastik LDPE dengan kombinasi laju pemanasan 20 °C/menit dan berat katalis 20 g menghasilkan volume minyak tertinggi, yaitu 516,7 mL atau setara 51,67% yield terhadap massa umpan. Temuan ini sejalan dengan penelitian [16] yang melaporkan bahwa limbah oli mesin pada kombinasi suhu 210 °C dan berat katalis 60 g menghasilkan volume minyak tertinggi, yakni 898 mL atau 89,8%. Selaras dengan itu, penelitian [17] pada pirolisis LDPE juga menunjukkan bahwa penambahan katalis zeolit alam dapat meningkatkan yield minyak dari 70% menjadi 80% pada massa umpan 6 kg. Peningkatan yield pada ketiga studi tersebut mengindikasikan bahwa penggunaan katalis berpori, seperti zeolit, mampu menurunkan energi aktivasi pemutusan rantai polimer, sehingga memfasilitasi pembentukan senyawa volatil yang kemudian terkondensasi menjadi minyak.

Data pengamatan dianalisis menggunakan metode RSM dengan bantuan perangkat lunak *Design Expert*. Pendekatan ini digunakan untuk mengevaluasi pengaruh laju pemanasan dan berat katalis terhadap volume minyak yang dihasilkan, sekaligus menentukan kondisi optimum proses pirolisis. Seluruh data hasil eksperimen kemudian diuji menggunakan metode Analisis Variansi (*Analysis of Variance / ANOVA*) untuk menilai signifikansi masing-masing variabel. Hasil pengolahan data tersebut selanjutnya digunakan untuk membangun model kuadrat yang berfungsi memprediksi respons dan memvalidasi kesesuaian model terhadap data aktual [18].

#### Model Polinomial Kuadrat

Model polinomial kuadrat digunakan untuk memprediksi kondisi optimal berdasarkan data hasil rancangan percobaan. Pemilihan model ini didasarkan pada dua faktor yang digunakan dalam percobaan, yaitu laju pemanasan dan berat katalis, sehingga dinilai sesuai untuk kondisi tersebut. Berdasarkan hasil pengolahan menggunakan perangkat lunak *Design Expert*, persamaan model polinomial kuadrat yang terbentuk dari kedua faktor adalah sebagai berikut :

$$Y = 499.336 - 7.704A + 16.455B - 81.25AB - 2.919A^2 - 121.088B^2$$

Keterangan :

Y = Respon (Output)

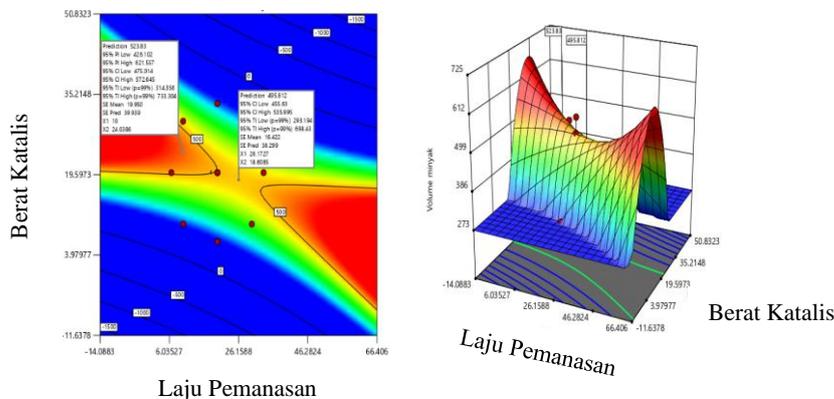
A = Variabel bebas 1 (Kecepatan Suhu (°C / menit))

B = Variabel bebas 2 (Berat Katalis (gram))

Persamaan ini merupakan model kuadrat hasil analisis RSM yang menggambarkan hubungan antara laju pemanasan (A) dan berat katalis (B) terhadap volume minyak (Y) yang dihasilkan. Nilai koefisien menunjukkan bahwa berat katalis (B) memiliki pengaruh positif lebih besar dibandingkan laju pemanasan (A), namun terdapat efek interaksi negatif antara keduanya. Selain itu, nilai kuadratik A<sup>2</sup> dan B<sup>2</sup> yang bernilai negatif mengindikasikan bahwa peningkatan laju pemanasan atau berat katalis secara berlebihan dapat menurunkan volume minyak. Oleh karena itu, diperlukan optimasi untuk memperoleh hasil maksimal [19].

#### RSM (Response Surface Methodology)

Gambar 4 memperlihatkan permukaan respon berbentuk *saddle point* yang menggambarkan interaksi kompleks antara laju pemanasan dan berat katalis terhadap *yield* minyak. Titik stasioner teridentifikasi pada volume 495,81 mL dengan laju pemanasan 26,17 °C/menit dan berat katalis 18,61 g. Namun, hasil optimasi numerik RSM menunjukkan titik optimum pada laju pemanasan 10 °C/menit dan berat katalis 24,04 g, dengan prediksi volume minyak sebesar 523,83 mL. Titik optimum ini berada di lereng permukaan, tetapi tetap valid secara eksperimental karena menghasilkan respons tertinggi dalam rentang pengujian [20].



Gambar 4. (A) Hasil *Contour Plot* dan (B) Respon Permukaan 3D

Gambar A menampilkan *contour plot* yang menggambarkan hubungan antara laju pemanasan dan berat katalis terhadap volume minyak. Volume tertinggi terlihat pada area berwarna merah, yaitu pada laju pemanasan 20 °C/menit dan berat katalis 20 g. Gambar B menunjukkan *surface plot* 3D yang memperlihatkan puncak volume minyak pada kombinasi variabel tersebut. Kedua grafik ini mengindikasikan bahwa kombinasi laju pemanasan dan berat katalis tersebut menghasilkan volume minyak yang mendekati kondisi optimal [21]. Selain itu, pola gradien warna pada *contour plot* menggambarkan distribusi respons volume minyak secara bertahap dari area rendah ke tinggi, yang menunjukkan bahwa perubahan kecil pada kedua variabel dapat memberikan pengaruh signifikan terhadap hasil. *Surface plot* 3D juga memperlihatkan adanya interaksi nonlinier antara laju pemanasan dan berat katalis, ditandai oleh bentuk permukaan yang melengkung. Hal ini konsisten dengan model kuadratik yang digunakan dalam metode RSM, di mana titik optimum tercapai pada kombinasi variabel yang tidak berada pada level ekstrem [22]

### Analisis Variansi (ANOVA)

Metode *Analysis of Variance* (ANOVA) merupakan teknik analisis statistik yang digunakan untuk menguji hipotesis secara inferensial dan menghasilkan kesimpulan yang lebih akurat [23]. Hasil uji ANOVA pada Tabel 4 menunjukkan bahwa model kuadratik yang digunakan memiliki tingkat signifikansi  $p = 0,0014$ . Nilai  $F$  sebesar 18,6 mengindikasikan bahwa model tersebut signifikan, dengan peluang kesalahan hanya sebesar 0,14%. Uji *lack of fit* menghasilkan  $p = 0,7431$ , di mana  $p > 0,05$  menunjukkan bahwa sekitar 74,31% *error* yang muncul disebabkan oleh variasi acak (*noise*), bukan karena kesalahan struktur model. Dengan demikian, model ini layak digunakan untuk prediksi dan interpretasi selanjutnya [24]

Tabel 4. Hasil ANOVA

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F-value	P-value
Model	1.114	5	22271.78	18.6	0.0014
A – Kecepatan Suhu	450.88	1	450.88	0.3766	0.5619
B – Berat Katalis	2056.85	1	2056.85	1.72	0.2379
A * B	26406.25	1	26406.25	22.06	0.0033
A <sup>2</sup>	47.24	1	47.24	0.0395	0.8491
B <sup>2</sup>	81272.88	1	81272.88	67.89	0.0002
Residual	7182.78	6	1197.13		
Lack of Fit	2182.78	3	727.59	0.4366	0.7431
Pure Error	5000	3	1666.67		
Cor Total	1.19	11			

### Hasil Uji Laboratorium Gas Chromatography–Mass Spectrometry (GC-MS)

Pengujian kandungan senyawa kimia dalam minyak hasil pirolisis dilakukan menggunakan metode kromatografi gas dengan spektrometri massa (GC-MS) (Shimadzu GCMS-QP2010 SE). Hasil uji GC-MS disajikan sebagai senyawa yang diukur sebagai persentase luas sampel. Pada Tabel 5 menjelaskan analisis GC-MS yang menunjukkan senyawa dominan yang terdeteksi adalah *methyl ester of ricinoleic acid* (39,44%), diikuti *oleic acid* (16,22%) dan *9-octadecenoic acid, methyl ester* (10,25%), Ketiga senyawa ini termasuk asam lemak dan ester rantai panjang yang umum ditemukan pada biodiesel dan fraksi

bahan bakar solar [25]. Senyawa lain seperti *n-hexadecanoic acid*, *octadecanoic acid methyl ester*, dan *eicosanoic acid methyl ester* berkontribusi sebagai fraksi utama bahan bakar cair. Analisis GC-MS menunjukkan adanya fraksi berat seperti wax yang berasal dari hidrokarbon rantai panjang hasil degradasi LDPE. Kandungan fraksi berat ini dapat meningkatkan viskositas minyak pirolisis sehingga membatasi penggunaannya secara langsung sebagai bahan bakar mesin konvensional. Kehadiran wax dapat menyebabkan masalah pada sistem injeksi dan pembakaran karena sifatnya yang mudah mengendap pada suhu rendah. Oleh karena itu, pemurnian lebih lanjut melalui fraksinasi atau *hydrocracking* diperlukan untuk menurunkan kandungan fraksi berat dan meningkatkan kesesuaian sifat minyak dengan spesifikasi bahan bakar komersial [26].

**Tabel 5.** Hasil Uji GC-MS

Peak#	R. Time	Area	Area%	Height	Name
1	10.828	16131196	0.54	3590497	<i>1-Dodecanol (CAS)</i>
2	22.781	25703481	0.86	8570182	<i>Hexadecanoic acid, methyl ester (CAS)</i>
3	22.8	173476596	5.81	15082041	<i>n-Hexadecanoic acid</i>
4	26.152	47507515	1.59	11262824	<i>9,12-Octadecadienoic acid (Z,Z)-, methyl ester (CAS)</i>
5	26.315	306265480	10.25	6196287	<i>9-Octadecenoic acid (Z)-, methyl ester (CAS)</i>
6	26.762	500221507	1.68	12160876	<i>Octadecanoic acid, methyl ester</i>
7	27.304	484513152	16.22	37758405	<i>Oleic Acid</i>
8	27.606	400300359	1.35	7291049	<i>9-Octadecenoic acid (Z)- (CAS)</i>
9	28.054	24568197	0.82	6724329	<i>Hexadecanoic acid</i>
10	29.947	117822931	39.44	117778649	<i>METHYL ESTER OF RICINOLEIC ACID</i>
11	30.373	51107940	1.71	9842253	<i>Eicosanoic acid, methyl ester (CAS)</i>
12	31.532	99543487	3.33	34379203	<i>Henicosane</i>
13	32.061	40047859	1.01	10068360	<i>1-Tetradecanol, (Z)-</i>
14	32.841	48998252	1.64	8788583	<i>1,2-Epoxyoct-3-ene, 5,5-dimethyl-8-methylene-</i>
15	33.159	128814849	4.31	3490856	<i>Tetradetracontane (CAS)</i>
16	33.39	17378188	0.58	3201926	<i>Hexadecanoic acid, 2-hydroxy-1-(hydroxymethyl)ethyl ester (CAS)</i>
17	33.667	18133113	0.61	5944218	<i>Docosanoic acid, methyl ester (CAS)</i>
18	33.829	60139296	1.34	10843753	<i>Acetic acid, (triphenylphosphoranylidene)-, methyl ester (CAS)</i>
19	34.058	24974282	0.83	4254940	<i>(Z)14-Tricosenyl formate</i>
20	34.713	18019677	2.95	2729984	<i>Hexacosane (CAS)</i>
21	36.212	74561596	2.50	21100984	<i>Tetradetracontane (CAS)</i>
22	39.052	21989930	0.64	5573994	<i>Tetracosane</i>
		2987659483	100	460248308	

Gambar 5 menunjukkan hasil pirolisis berupa residu padat berwarna hitam pekat dan minyak berwarna coklat keemasan. Warna minyak yang dihasilkan mengindikasikan kandungan senyawa hidrokarbon kompleks, sedangkan terbentuknya residu menunjukkan adanya fraksi berat yang tidak terurai sempurna selama proses pirolisis.



**Gambar 5.** Residu dan hasil minyak

### Kesimpulan

Penelitian ini membuktikan bahwa metode pirolisis dengan pendekatan RSM efektif dalam mengoptimalkan konversi sampah plastik LDPE menjadi bahan bakar cair. Kombinasi variabel proses yang optimal ditemukan pada laju pemanasan 10 °C/menit dan berat katalis 24,04 g dengan volume minyak sebesar 523,83 mL. Model kuadrat yang diperoleh signifikan secara statistik dengan nilai  $R^2$  sebesar 0,9394 mampu memprediksi hasil dengan baik. Hasil penelitian

ini membuktikan bahwa penggunaan katalis zeolit alam dalam proses pirolisis memberikan pengaruh terhadap peningkatan volume dan kualitas minyak yang dihasilkan. Analisis GC-MS menunjukkan dominasi senyawa ester asam lemak dan hidrokarbon jenuh dengan karakteristik mendekati fraksi solar. Penelitian ini dapat menjadi dasar pengembangan proses pirolisis skala pilot untuk pengolahan limbah plastik secara berkelanjutan. Kontribusi praktis dari penelitian ini adalah penyediaan model optimasi proses yang dapat diadaptasi pada skala industri untuk memaksimalkan yield dan kualitas produk.

### Daftar Pustaka

- [1] M. R. Apriansyah and V. R. Sushanty, "Pengelolaan sampah rumah tangga dan penyuluhan peduli lingkungan kepada siswa Sekolah Dasar," *Dikmas: Jurnal Pendidikan Masyarakat dan Pengabdian*, vol. 2, no. 2, pp. 447–460, 2022.
- [2] M. P. Arum, C. M. Hidayat, P. Paradise, and A. W. Munthe, "Upaya Meningkatkan Pengelolaan Sampah Berkelanjutan Dengan Penerapan Circular Economy System," *Budimas: Jurnal Pengabdian Masyarakat*, vol. 6, no. 3, 2024.
- [3] B. Hamdani and H. Sudarso, "Pemanfaatan sampah plastik menjadi kerajinan tangan guna meningkatkan kreatifitas warga sekitar dusun kecil Desa Kertonegoro," *JA (Jurnal Abdiku): Jurnal Pengabdian Kepada Masyarakat*, vol. 5, no. 1, pp. 41–56, 2022.
- [4] A. T. Hidayat and K. Kusmiyati, "Pemanfaatan Sampah Plastik PET (Polyethylene Terephthalate) dan PP (Polypropylene) Menggunakan Proses Pirolisis menjadi Bahan Bakar Minyak," *Ranah Research: Journal of Multidisciplinary Research and Development*, vol. 7, no. 4, pp. 2840–2854, 2025.
- [5] R. Shofiyah and I. Irawati, "Pengolahan Sampah Polimer Termoplastik dan Termoset di Lingkungan Bank Sampah Induk Kabupaten Jember," *Jurnal Komunitas: Jurnal Pengabdian kepada Masyarakat*, vol. 6, no. 2, pp. 180–190, 2024.
- [6] K. Kusmiyati, D. K. Wijaya, B. J. R. Hartono, G. F. Shidik, and A. Fudholi, "Harnessing the power of cow dung: Exploring the environmental, energy, and economic potential of biogas production in Indonesia," *Results in Engineering*, vol. 20, p. 101431, 2023.
- [7] E. N. Anggraini, M. M. Rosadi, and D. A. Rokhmahwati, "Pengaruh Variasi Perbandingan Sampah Plastik Jenis LDPE Dan PS Terhadap Volume Dan Nilai Kalor Minyak Pada Proses Pirolisis," *Jurnal Motion (Manufaktur, Otomasi, Otomotif, dan Energi Terbarukan)*, vol. 3, no. 1, pp. 1–7, 2024.
- [8] P. S. I. A. K. Sadhu, "Pengaruh Variasi Massa Campuran Sampah Plastik Jenis *Low Density Polyethylene* (LDPE) Dan *Poly Propylene* (PP) Terhadap Volume Produk Cair Proses Pirolisis," *Jurnal Ilmiah Teknik Desain Mekanika*, vol. 13, pp. 188–191, 2024.
- [9] L. Rosmainar, D. N. Tukan, and M. Deviyanti, "Perbandingan Plastik Dari Material-Material Bioplastik," *Jurnal Jejaring Matematika dan Sains*, vol. 3, no. 1, pp. 19–28, 2021.
- [10] M. Mustam, N. Ramdani, and I. Syaputra, "Perbandingan Kualitas Bahan Bakar dari Pengolahan Sampah Plastik Menjadi Bahan Bakar Minyak dengan Metode Pirolisis," *EduMatSains: Jurnal Pendidikan, Matematika dan Sains*, vol. 6, no. 1, pp. 219–230, 2021.
- [11] A. Wisnujati and F. Yudhanto, "Analisis karakteristik pirolisis limbah plastik low density polyethylene (LDPE) sebagai bahan bakar alternatif," *Jurnal Program Studi Teknik Mesin*, 2020.
- [12] M. M. Sari, A. S. Afifah, and I. W. K. Suryawan, "Pengelolaan Sampah Plastik Melalui Teknologi Pirolisis di TPST Manding, Kabupaten Sragen: Analisis Efektivitas dan Potensi Keberlanjutan," *Jurnal Energi Baru Dan Terbarukan*, vol. 4, no. 3, pp. 246–256, 2023.
- [13] A. S. Nugroho, "Pengolahan limbah plastik LDPE dan PP untuk bahan bakar dengan cara pirolisis," *Jurnal Litbang Sukowati: Media Penelitian Dan Pengembangan*, vol. 4, no. 1, pp. 91–100, 2020.
- [14] D. Ekawati, R. Nadhira, D. Darmadi, A. Adisalamun, and M. Murdani, "Penerapan *Response Surface Methodology* (RSM) Untuk Pengolahan Limbah Cair Rumah Sakit Secara Elektrokoagulasi Menggunakan Elektroda Al-A," *Jurnal Inovasi Ramah Lingkungan*, vol. 3, no. 3, pp. 16–18, 2022.
- [15] I. Veza, M. Spraggon, I. M. R. Fattah, and M. Idris, "Response surface methodology (RSM) for optimizing engine performance and emissions fueled with biofuel: Review of RSM for sustainability energy transition," *Results in Engineering*, vol. 18, p. 101213, 2023.
- [16] D. Sukoco, "Desain Dan Optimasi Proses Pirolisis *Waste Oil* Menggunakan Pendekatan RSM," *Jurnal Inovasi Teknologi Terapan*, vol. 1, no. 2, pp. 396–404, 2023.
- [17] E. M. Mayora, A. Arifin, and P. W. Nugraheni, "Pirolisis Limbah Plastik Jenis *Low Density Polyethylene* (LDPE) dan *Polypropylene* (PP) Menggunakan Katalis Zeolit Alam," *Jurnal Teknologi Lingkungan Lahan Basah*, vol. 11, no. 3, pp. 773–779, 2023.
- [18] A. Irmawati, S. A. R. Kuntjahjawi, and N. C. Firsta, "Optimasi Formulasi *Virgin Coconut Oil* (VCO), Susu Full Cream, dan Maltodekstrin Terhadap Karakteristik Fisikokimia Mayonnaise Rendah Lemak Menggunakan *Response Surface Methodology* (RSM)," *Agrotech: Jurnal Ilmiah Teknologi Pertanian*, vol. 5, no. 1, pp. 1–12, 2023.

- [19] A. H. Fatmawati, D. R. Adawiyah, and N. Wulandari, "Optimasi Formula Produk Spreadable Gel Berbahan Dasar Biji Selasih Menggunakan Teknik Response Surface Methodology," *agritech*, vol. 41, no. 3, pp. 294–304, 2021.
- [20] S. Salimuddin, Z. G. Ginting, S. B. Bahri, M. Muhammad, and J. Jalaluddin, "Optimasi Variabel Massa, Suhu Dan Waktu Pirolisis Pada Pembuatan Asap Cair (*Liquid Smoke*) Dari Limbah Padat Nilam Menggunakan Metode RSM," *Chemical Engineering Journal Storage (CEJS)*, vol. 3, no. 3, pp. 338–350, 2023.
- [21] A. M. S. Haque, A. Ristikawati, and S. S. Santi, "Optimasi Proses Adsorpsi Penurunan Angka Asam Bio-Oil Hasil Pirolisis Batang Tembakau Menggunakan *Response Surface Methodology* (RSM)," *Jurnal Integrasi Proses*, vol. 14, no. 1, pp. 39–47, 2025.
- [22] K. Nisah, A. Sateria, Y. Oktriadi, E. Yudo, and Z. S. Suzen, "Optimasi Parameter Proses 3D Print Produk Kopling Menggunakan Filamen PLA (*Polylactic Acid*) dan *Response Surface Methodology*," *Jurnal Inovasi Teknologi Terapan*, vol. 3, no. 1, pp. 191–198, 2025.
- [23] E. Ningsih, "Analisis Yield Bahan Bakar Cair pada Pirolisis Ban Luar Sepeda Motor Dengan Katalis?-Alumina dengan Pendekatan Anova," in *Prosiding Seminar Nasional Teknik Elektro, Sistem Informasi, dan Teknik Informatika (SNESTIK)*, 2021, pp. 333–338.
- [24] O. Setiawan and A. T. Pradipta, "Penggunaan Metode *Response Surface Methodology Box Behnken* Untuk Pemodelan dan Optimasi Proses Fenton pada Pengolahan Limbah Cair Home Industri Sarung Tenun Tradisional Medangan Gresik," *Metana*, vol. 20, no. 2, pp. 97–107, 2024.
- [25] I. Mufandi, R. Suntivarakorn, W. Treedet, and P. Singbua, "Analisis Termogravimetri dan Dekomposisi Termal pada Produksi Bio-Oil dari Daun Tebu Menggunakan Proses Pirolisis Cepat," *Eksergi*, vol. 20, no. 2, pp. 82–88, 2023.
- [26] A. Mufidah and I. Siregar, "Uji Karakteristik Minyak Pirolisis Berbahan Baku Limbah Plastik *Polyethylene Terephthalate*," *Jurnal Teknik Mesin*, vol. 10, no. 03, pp. 143–150, 2022.