

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Hasil Penelitian

Adapun data hasil penelitian *catalytic cracking* Limbah Plastik HDPE dan PP menjadi Bahan Bakar Cair menggunakan Katalis Zeolit yang dilaksanakan di Laboratorium Teknik Energi Politeknik Negeri Sriwijaya. Penelitian dilakukan dengan memvariasikan rasio bahan baku dengan massa bahan baku sebesar 2 kg HDPE:PP (100:0; 30:70; 50:50; 70:30; dan 0:100) pada suhu operasi 450 °C dan jumlah katalis zeolit 10% (wt%). Parameter yang diamati meliputi persentase *yield* bahan bakar cair serta karakteristik produk yang terdiri atas densitas, viskositas, nilai kalor, dan titik nyala dapat dilihat pada **Tabel 4. 1** dan **4. 2**.

Tabel 4. 1 Data Hasil *Catalytic Cracking* Limbah Plastik HDPE dan PP

Bahan Baku	Rasio HDPE : PP	Suhu (°C)	Volume Bahan Bakar Cair (mL)	Yield Bahan Bakar Cair (%)
HDPE dan PP	100:0	450	65	3,14
	30:70		120	5,47
	50:50		185	8,69
	70:30		187	9,01
	0:100		30	1,43

Tabel 4. 2 Data Hasil Analisis Karakteristik Bahan Bakar Cair Hasil *Catalytic Cracking* Limbah Plastik HDPE dan PP

Bahan Baku	Rasio HDPE:PP	Suhu (°C)	Densitas (kg/m ³)	Viskositas (mm ² /s)	Nilai Kalor (MJ/Kg)	Titik Nyala (°C)
HDPE dan PP	100:0	450	966	3,99	32,66	38
	30:70		912	3,86	30,28	31
	50:50		940	3,51	30,61	37
	70:30		964	3,50	31,88	34
	0:100		956	3,01	31,53	32

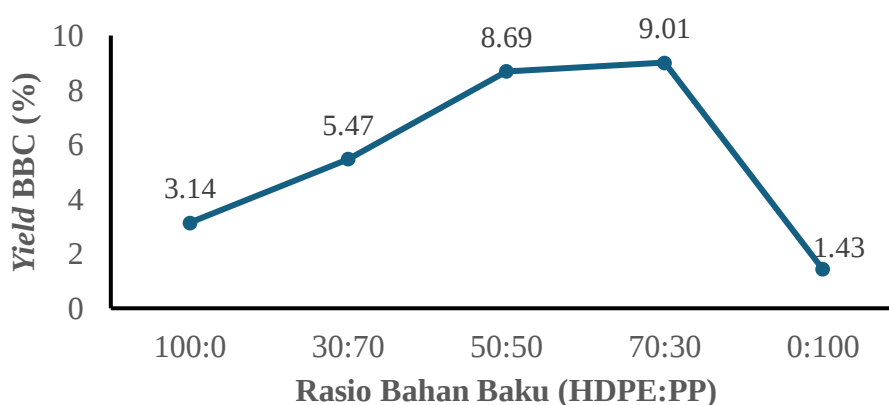
4.2 Pembahasan

Pembahasan hasil penelitian difokuskan pada analisis pengaruh variasi rasio bahan baku HDPE:PP terhadap *yield* bahan bakar cair empat karakteristik utama bahan bakar cair yang dihasilkan, yaitu densitas, viskositas, nilai kalor, dan titik nyala. Seluruh percobaan dilaksanakan pada suhu *catalytic cracking* 450 °C dengan katalis zeolit alam 10% (wt%).

4.2.1 Pengaruh Rasio Bahan Baku HDPE:PP terhadap *Yield* Bahan Bakar Cair dari Hasil *Catalytic Cracking*

Yield bahan bakar cair merupakan salah satu parameter utama yang digunakan untuk mengetahui keberhasilan proses *catalytic cracking* plastik, dijelaskan sebagai persentase massa produk cair yang berhasil diperoleh terhadap massa awal bahan baku yang digunakan. Parameter ini mencerminkan efisiensi konversi polimer padat menjadi hidrokarbon cair yang dapat dimanfaatkan sebagai bahan bakar. Besarnya *yield* dipengaruhi oleh berbagai faktor, antara lain jenis dan komposisi plastik, suhu operasi, waktu reaksi, ukuran partikel bahan baku, serta jenis dan jumlah katalis yang digunakan. Dalam penelitian *catalytic cracking*, hubungan antara sifat kimia bahan baku dengan aktivitas katalitik zeolit menjadi penentu utama distribusi produk yang terbentuk (Damayanti *et al.*, 2023).

Hasil penelitian mengenai pengaruh rasio bahan baku HDPE:PP terhadap *yield* bahan bakar cair pada suhu 450 °C dengan penambahan katalis zeolit alam 10% disajikan pada **Gambar 4. 1**.



Gambar 4. 1 Grafik Pengaruh Rasio Bahan Baku terhadap *Yield* Bahan Bakar Cair Hasil *Catalytic Cracking*

Berdasarkan **Gambar 4. 1**, diperoleh bahwa *yield* bahan bakar cair mengalami perubahan seiring variasi rasio HDPE:PP yang digunakan *Yield* terendah diperoleh pada rasio 0:100 (100% PP) yaitu sebesar 1,43%, sedangkan *yield* tertinggi diperoleh pada rasio 70:30 yaitu sebesar 9,01%. Rasio 50:50 menghasilkan *yield* sebesar 8,69%, rasio 30:70 sebesar 5,47%, dan rasio 100:0 (100% HDPE) sebesar 3,14%. Hal ini menunjukkan bahwa *yield* tertinggi tidak dicapai pada plastik tunggal melainkan pada campuran tertentu.

Peningkatan *yield* pada kisaran rasio 30:70 hingga 70:30 berkaitan erat dengan mekanisme antara radikal bebas yang terbentuk dari depolimerisasi masing-masing polimer. PP yang lebih mudah terdepolimerisasi menghasilkan radikal bebas awal yang dapat memicu pemutusan rantai HDPE pada suhu lebih rendah dari yang dibutuhkan HDPE secara mandiri. Sebaliknya, rantai karbon panjang HDPE menghasilkan fraksi hidrokarbon menengah (C_8 – C_{16}) yang lebih mudah terkondensasi menjadi produk cair dibandingkan fraksi ringan yang dihasilkan oleh *catalytic cracking* PP murni. Kombinasi ini menghasilkan distribusi hidrokarbon yang lebih seimbang antara fraksi ringan dan menengah, sehingga meningkatkan *yield* cair secara keseluruhan (Marwani & Trifarizy, 2024).

Yield tertinggi pada rasio 70:30 (HDPE 70%, PP 30%) menunjukkan bahwa komposisi tersebut merupakan kondisi paling optimum dalam penelitian ini. Dimana HDPE menyediakan jumlah rantai hidrokarbon yang cukup besar untuk dikonversi menjadi fraksi cair, sedangkan keberadaan PP dalam jumlah 30% membantu mempercepat proses perengkahan molekul melalui pembentukan radikal yang lebih reaktif, sehingga menghasilkan lebih banyak senyawa hidrokarbon yang dapat terkondensasi. Hasil ini selaras dengan penelitian (Erawati *et al.*, 2018) yang menunjukkan bahwa komposisi dengan perbandingan HDPE yang tinggi menghasilkan *yield* cair tertinggi, karena perbandingan bahan yang tepat dapat meningkatkan pembentukan produk cair yang diperkuat dengan bantuan katalis yang mempercepat proses depolimerisasi plastik.

Rendahnya *yield* pada rasio 100:0 (3,14%) yang lebih rendah dibandingkan rasio 70:30 maupun 50:50 menunjukkan bahwa HDPE murni tanpa adanya PP memerlukan energi yang lebih besar untuk memulai depolimerisasi akibat struktur rantai linearnya yang panjang dan kristalinitas tinggi. Pada suhu 450 °C, sebagian rantai HDPE belum sepenuhnya terdepolimerisasi dalam waktu reaksi 60 menit sehingga berakhir sebagai residu atau produk dengan titik didih tinggi yang tidak terkondensasi. Hal ini sesuai dengan penelitian (Hendrawati *et al.*, 2023) yang menunjukkan bahwa pirolisis HDPE tanpa katalis hanya menghasilkan *yield* cair sebesar 12,02%, dan baru meningkat secara signifikan menjadi 65,60% setelah penambahan katalis zeolit alam Lampung sebesar 3% (b/b). Kondisi ini menegaskan bahwa meskipun katalis zeolit berperan meningkatkan konversi

HDPE, keberadaan PP dalam campuran memberikan efek tambahan yang semakin meningkatkan *yield* cair.

Sebaliknya, rendahnya *yield* pada rasio 0:100 (PP murni, 1,43%) menunjukkan bahwa penggunaan PP tunggal justru menghasilkan produk cair paling sedikit. Kondisi ini dapat dijelaskan melalui sifat produk yang dihasilkan. Menurut (Damayanti *et al.*, 2023), PP cenderung menghasilkan fraksi hidrokarbon ringan C₅–C₁₂ yang menyerupai bensin dan memiliki volatilitas tinggi. Pada suhu operasi 450 °C, sebagian besar produk perengkahan PP berupa fraksi sangat ringan (C₃–C₆) yang berada dalam fase gas pada suhu kondensasi dan tidak terkoleksi sebagai produk cair. (Sa'diyah & Juliastuti, 2019) menjelaskan bahwa pirolisis PP murni dengan katalis zeolit alam pada suhu 450 °C menghasilkan produk cair yang didominasi oleh senyawa aromatik (61,64%), mengindikasikan bahwa PP pada suhu tinggi mengalami rekombinasi membentuk senyawa aromatik yang lebih berat sehingga sebagian besar tidak terkondensasi menjadi fase cair.

Selain komposisi bahan baku, penggunaan katalis zeolit alam 10% (wt%) juga berperan krusial dalam pembentukan *yield* bahan bakar cair. Katalis zeolit memiliki luas permukaan yang besar dan situs asam *Brønsted* serta *Lewis* yang mampu mengaktifkan pemutusan ikatan C–C dan C–H pada rantai polimer melalui mekanisme karbokation. Situs asam ini memfasilitasi pemutusan ikatan rantai karbon panjang secara selektif, menghasilkan fragmen hidrokarbon dengan distribusi karbon yang lebih terkontrol dibandingkan *thermal cracking* tanpa katalis. (Tahdid *et al.*, 2022) menunjukkan bahwa penggunaan katalis zeolit dengan rasio optimal menghasilkan rendemen bahan bakar cair tertinggi, karena penambahan katalis mempengaruhi distribusi rantai karbon ke arah produk yang lebih ringan dan dapat terkondensasi.

Perlu diketahui bahwa nilai *yield* yang diperoleh dalam penelitian ini (1,43–9,01%) relatif lebih rendah dibandingkan *yield* yang dilaporkan pada penelitian-penelitian terdahulu. Perbedaan ini diduga disebabkan oleh beberapa faktor teknis, antara lain: (1) ketidaksempurnaan sistem kondensasi yang menyebabkan sebagian produk cair tidak terkoleksi dan lolos bersama aliran gas; (2) kemungkinan adanya kebocoran pada reaktor yang menyebabkan produk uap tidak seluruhnya

terkumpul; (3) perbedaan skala operasi dan kapasitas reaktor dengan penelitian referensi; serta (4) perbedaan jenis dan aktivasi katalis zeolit yang digunakan.

Secara keseluruhan, hasil penelitian menunjukkan bahwa variasi rasio HDPE:PP memberikan pengaruh nyata terhadap *yield* bahan bakar cair yang dihasilkan dari proses *catalytic cracking* dengan katalis zeolit. Rasio 70:30 menghasilkan *yield* tertinggi sebesar 9,01% yang mencerminkan kondisi optimal sinergi antara HDPE dan PP, sedangkan rasio 0:100 menghasilkan *yield* terendah sebesar 1,43% akibat pembentukan fraksi gas yang tidak terkondensasi dari *catalytic cracking* PP.

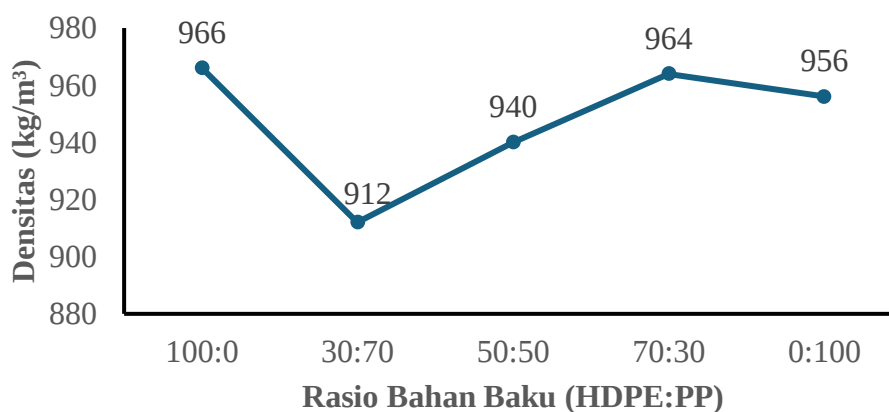
4.2.2 Pengaruh Rasio Bahan Baku terhadap Karakteristik Bahan Bakar Cair dari Hasil *Catalytic Cracking*

Karakteristik bahan bakar cair merupakan indikator utama yang menentukan kelayakan produk pirolisis sebagai bahan bakar alternatif pengganti bahan bakar fosil. Pada proses *catalytic cracking* limbah plastik HDPE dan PP, perbedaan sifat fisik dan kimia kedua jenis plastik tersebut berpengaruh terhadap kualitas produk bahan bakar cair yang dihasilkan. HDPE dengan struktur rantai karbon linear yang panjang cenderung menghasilkan fraksi hidrokarbon berat (C_{13} – C_{20}), sedangkan PP dengan gugus metil pada rantai karbonnya lebih mudah mengalami perengkahan menjadi fraksi hidrokarbon ringan (C_5 – C_{12}). Interaksi antara kedua jenis plastik tersebut dalam proses *catalytic cracking* berpotensi menghasilkan distribusi produk hidrokarbon yang lebih selektif dan bervariasi, yang pada akhirnya mempengaruhi karakteristik fisikokimia bahan bakar cair yang diperoleh (Hendrawati *et al.*, 2023). Karakteristik yang dianalisis dalam penelitian ini meliputi densitas, viskositas, nilai kalor, dan titik nyala, yang seluruhnya dibandingkan dengan standar bahan bakar komersial yang berlaku.

1. Densitas

Densitas merupakan salah satu parameter fisik yang menentukan kualitas bahan bakar cair, didefinisikan sebagai massa per satuan volume yang dinyatakan dalam g/mL atau kg/m³. Parameter ini berkaitan erat dengan kandungan energi per satuan volume dan karakteristik atomisasi bahan bakar pada sistem pembakaran.

Semakin tinggi densitas suatu bahan bakar, umumnya semakin besar kandungan fraksi hidrokarbon berat yang terdapat di dalamnya. Densitas minyak pirolisis yang terlalu tinggi dapat mengindikasikan dominasi senyawa hidrokarbon berat yang berpotensi menurunkan efisiensi atomisasi, sementara densitas yang terlalu rendah menunjukkan dominasi fraksi ringan yang mudah menguap (Damayanti *et al.*, 2023). Standar Dirjen Migas Nomor 0177-K/10/DJM.T.2018 menetapkan rentang densitas bahan bakar bensin antara 0,715–0,770 g/cm³ (715–770 kg/m³), sedangkan solar berada pada rentang 0,820–0,850 g/cm³ (820–850 kg/m³).



Gambar 4. 2 Grafik Pengaruh Rasio Bahan Baku terhadap Densitas Bahan Bakar Cair Hasil *Catalytic Cracking*

Berdasarkan **Gambar 4. 2**, densitas tertinggi diperoleh pada rasio HDPE:PP 100:0 sebesar (966 kg/m³), sedangkan densitas terendah diperoleh pada rasio 30:70 sebesar (912 kg/m³). Secara umum, peningkatan proporsi HDPE dalam campuran cenderung meningkatkan densitas bahan bakar cair yang dihasilkan, sementara peningkatan proporsi PP berpengaruh sebaliknya.

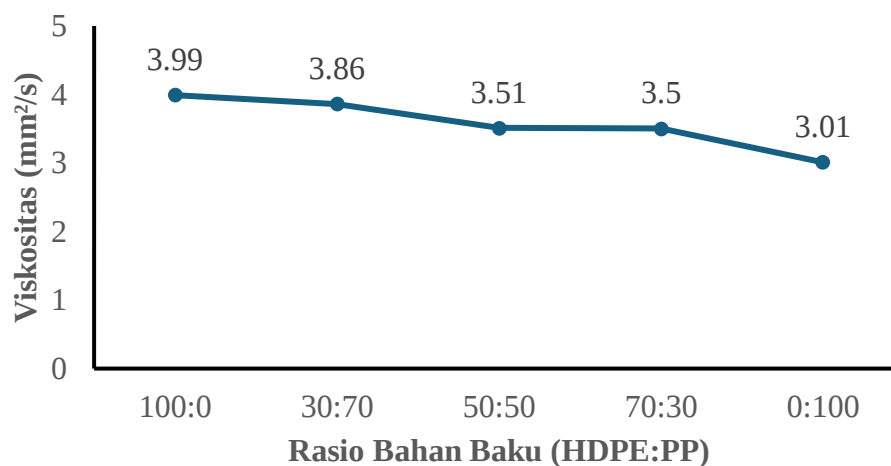
Tingginya densitas pada rasio dengan kandungan HDPE yang lebih besar dapat dijelaskan melalui karakteristik depolimerisasi HDPE. Struktur rantai karbon linear HDPE yang panjang menghasilkan lebih banyak fraksi hidrokarbon berat dengan rentang karbon C₁₃–C₂₀ yang memiliki massa molekul relatif lebih tinggi. Fraksi-fraksi berat ini berkontribusi pada peningkatan densitas produk cair. Hal ini sejalan dengan hasil penelitian (Hendrawati *et al.*, 2023) yang menunjukkan bahwa produk pirolisis HDPE dengan katalis zeolit alam Lampung didominasi oleh fraksi C₁₃–C₁₆ sebesar 40,39%, sehingga menghasilkan densitas 0,8779 g/mL yang mendekati spesifikasi solar.

Sebaliknya, peningkatan jumlah PP dalam campuran menghasilkan lebih banyak fraksi hidrokarbon ringan (C_5 – C_{12}), yang memiliki massa molekul lebih rendah dan berpengaruh pada penurunan densitas produk. (Heriyanto *et al.*, 2024) menjelaskan bahwa komposisi dengan proporsi HDPE lebih tinggi menghasilkan densitas yang lebih besar dibandingkan komposisi dengan proporsi PP yang lebih tinggi, yang dimana selaras dengan sifat dasar HDPE (densitas $0,94 \text{ g/cm}^3$) yang memang lebih tinggi dibandingkan PP (densitas $0,90 \text{ g/cm}^3$).

Nilai densitas yang diperoleh pada penelitian ini ($0,912$ – $0,966 \text{ g/mL}$) berada di atas rentang standar bensin komersial (715 – 770 kg/m^3) namun di bawah standar solar (820 – 850 kg/m^3) untuk beberapa rasio, menunjukkan bahwa produk bahan bakar cair hasil *catalytic cracking* pada penelitian ini memiliki karakteristik densitas yang berada di antara bensin dan solar. Kondisi ini berkaitan dengan distribusi hidrokarbon yang dihasilkan dari proses *catalytic cracking* dengan katalis zeolit alam pada suhu $450 \text{ }^\circ\text{C}$ yang menghasilkan campuran fraksi ringan dan menengah.

2. Viskositas

Viskositas adalah ukuran kekentalan aliran suatu fluida yang mencerminkan gaya gesekan internal antarmolekul dalam cairan. Dalam bahan bakar cair, viskositas menjadi parameter kritis yang mempengaruhi kemampuan atomisasi dan pembakaran bahan bakar pada mesin. Bahan bakar dengan viskositas terlalu tinggi akan sulit teratomisasi secara sempurna di dalam ruang bakar, sehingga menurunkan efisiensi pembakaran dan berpotensi meningkatkan emisi gas buang. Sebaliknya, viskositas yang terlalu rendah dapat mengurangi kemampuan bahan bakar dalam melumasi komponen sistem injeksi bahan bakar. Standar SNI dan ASTM untuk viskositas kinematik bensin berada pada rentang sekitar $0,37$ – $0,44 \text{ mm}^2/\text{s}$ pada $40 \text{ }^\circ\text{C}$, sementara solar berada pada rentang $2,0$ – $5,0 \text{ mm}^2/\text{s}$ pada $40 \text{ }^\circ\text{C}$. (Damayanti *et al.*, 2023) melaporkan bahwa viskositas minyak pirolisis plastik umumnya berada pada kisaran $0,65$ – $2,14 \text{ mm}^2/\text{s}$ tergantung jenis plastik dan kondisi proses.



Gambar 4. 3 Grafik Pengaruh Rasio Bahan Baku Terhadap Viskositas Bahan Bakar Cair Hasil *Catalytic Cracking*

Berdasarkan hasil penelitian, viskositas tertinggi diperoleh pada rasio HDPE:PP 100:0 sebesar 3,99 mm²/s, sedangkan viskositas terendah diperoleh pada rasio 0:100 sebesar 3,01 mm²/s. Grafik yang terlihat menunjukkan bahwa peningkatan kandungan HDPE dalam campuran menyebabkan viskositas bahan bakar cair semakin tinggi, sedangkan peningkatan kandungan PP menghasilkan bahan bakar dengan viskositas lebih rendah.

Peningkatan viskositas seiring meningkatnya kandungan HDPE berkaitan langsung dengan karakteristik depolimerisasi HDPE yang menghasilkan fraksi hidrokarbon rantai panjang. Semakin panjang rantai karbon yang terbentuk, semakin besar gaya van der Waals antarmolekul, sehingga meningkatkan resistensi aliran (viskositas) cairan. Kondisi ini dikonfirmasi oleh (Damayanti *et al.*, 2023) yang menyatakan bahwa minyak pirolisis PP memiliki viskositas lebih rendah dibandingkan produk pirolisis HDPE karena PP menghasilkan lebih banyak senyawa hidrokarbon ringan yang memiliki interaksi antarmolekul yang lebih lemah.

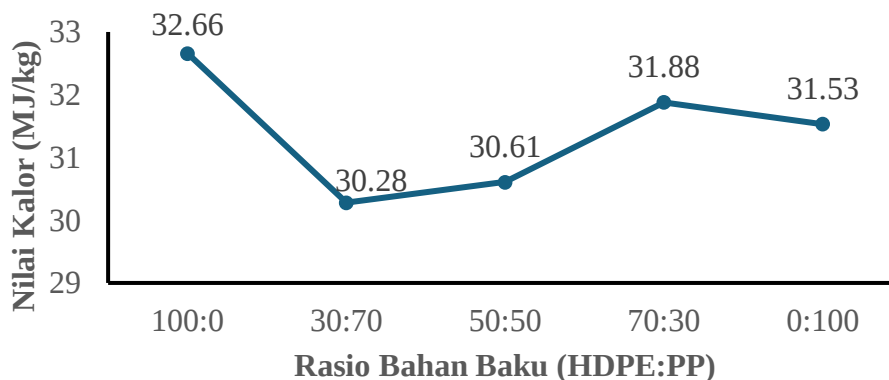
Sebaliknya, peningkatan proporsi PP dalam campuran menyebabkan lebih banyaknya perengkahan rantai polimer menjadi fraksi pendek yang lebih encer. Hal ini selaras dengan penelitian (Heriyanto *et al.*, 2024) yang mendapatkan viskositas tertinggi pada komposisi HDPE 70% sebesar 0,789 cP dan viskositas terendah pada komposisi HDPE 30% sebesar 0,689 cP, menunjukkan bahwa kandungan HDPE yang lebih tinggi secara konsisten menghasilkan viskositas yang lebih tinggi.

Demikian pula, (Marwani & Trifarizy 2024) menunjukkan viskositas campuran HDPE:PP (50:50) berkisar antara 1,611–2,401 cP pada variasi suhu 200–450 °C, yang menunjukkan bahwa viskositas produk sangat dipengaruhi oleh kondisi operasi dan komposisi bahan baku.

Nilai viskositas yang diperoleh dalam penelitian ini (2,88–3,85 cP) berada dalam rentang yang relatif lebih tinggi dibandingkan penelitian (Damayanti *et al.*, 2023) maupun (Heriyanto *et al.*, 2024). Perbedaan ini kemungkinan disebabkan oleh perbedaan kondisi operasi, jenis reaktor, dan efisiensi sistem kondensasi yang digunakan. Meskipun demikian, nilai viskositas yang diperoleh masih berada dalam rentang viskositas solar komersial (2,0–5,0 cP), yang menunjukkan kemiripan karakteristik produk dengan bahan bakar *diesel*, terutama pada rasio dengan dominan PP yang menghasilkan viskositas mendekati batas bawah rentang tersebut

3. Nilai Kalor

Nilai kalor (*heating value*) merupakan jumlah energi panas yang dibebaskan per satuan massa bahan bakar ketika dibakar secara sempurna. Parameter ini menjadi tolok ukur utama kandungan energi suatu bahan bakar dan menentukan efisiensi konversi energi dalam aplikasi pembakaran. Nilai kalor yang tinggi menandakan kandungan senyawa hidrokarbon jenuh dengan rantai karbon panjang yang lebih dominan, sedangkan nilai kalor rendah umumnya dikaitkan dengan kehadiran senyawa *oxygenated* atau hidrokarbon rantai pendek. Nilai kalor bensin komersial umumnya berada pada kisaran 44–47 MJ/kg (sekitar 10.500–11.200 kal/g), sedangkan solar memiliki nilai kalor sekitar 42–46 MJ/kg. (Damayanti *et al.*, 2023) mengungkapkan bahwa nilai kalor minyak pirolisis HDPE berkisar 44,09–45,28 MJ/kg dan PP berkisar 26,77–46,20 MJ/kg tergantung jenis katalis yang digunakan.



Gambar 4. 4 Grafik Pengaruh Rasio Bahan Baku Terhadap Nilai Kalor Bahan Bakar Cair Hasil *Catalytic Cracking*

Berdasarkan **Gambar 4. 4**, nilai kalor tertinggi diperoleh pada rasio HDPE:PP 100:0 sebesar 32,66 MJ/kg, sedangkan nilai kalor terendah diperoleh pada rasio 30:70 sebesar 30,28 MJ/kg. Secara umum, peningkatan kandungan HDPE dalam campuran cenderung meningkatkan nilai kalor produk, sementara peningkatan kandungan PP menghasilkan nilai kalor yang lebih rendah.

Tingginya nilai kalor pada rasio dengan kandungan HDPE yang lebih besar berkaitan dengan karakteristik produk pirolisis HDPE yang kaya akan senyawa hidrokarbon jenuh rantai panjang. Senyawa-senyawa ini mengandung rasio H/C yang tinggi dan tidak memiliki gugus fungsional yang dapat mengurangi kandungan energi per satuan massa. (Damayanti *et al.*, 2023) menunjukkan bahwa minyak pirolisis HDPE memiliki nilai kalor sekitar 44,09–45,28 MJ/kg yang mendekati karakteristik bahan bakar bensin maupun solar, mencerminkan kandungan energi yang tinggi dari fraksi hidrokarbon rantai panjang yang dihasilkan dari depolimerisasi HDPE.

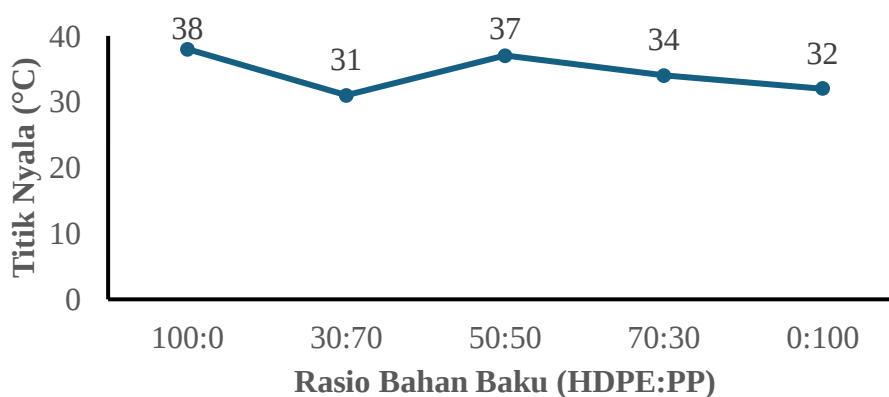
Sebaliknya, peningkatan jumlah rasio PP menghasilkan lebih banyak fraksi ringan (C_5 – C_{12}) yang meskipun mudah terbakar, namun memiliki kandungan energi total per satuan massa yang relatif lebih rendah dibandingkan fraksi hidrokarbon berat. Kondisi ini menyebabkan nilai kalor mengalami penurunan pada rasio dengan kandungan PP yang lebih tinggi. Hal ini sesuai dengan penelitian (Heriyanto *et al.*, 2024) yang menunjukkan bahwa nilai kalor tertinggi sebesar 10.978,8 cal/g justru diperoleh pada komposisi seimbang HDPE 50%:PP 50%.

Nilai kalor yang diperoleh dalam penelitian ini (7.234–7.801 cal/g atau $\approx 30,3$ – $32,7$ MJ/kg) berada di bawah nilai kalor yang dilaporkan oleh (Damayanti

et al., 2023) untuk pirolisis HDPE murni. Perbedaan ini dapat dikaitkan dengan beberapa faktor, antara lain adanya kandungan senyawa *oxygenated* atau aromatik yang lebih tinggi dalam produk akibat interaksi bahan baku campuran dan kondisi proses *catalytic cracking* dengan zeolit alam, serta perbedaan kondisi kondensasi yang mempengaruhi fraksi produk yang terkoleksi. Meski demikian, nilai kalor yang dihasilkan masih cukup signifikan sebagai sumber energi alternatif, mengingat nilai kalor minyak tanah (*kerosene*) juga berada pada kisaran 43 MJ/kg yang relatif sebanding jika dikonversi.

4. Titik Nyala

Titik nyala (*flash point*) merupakan suhu minimum di mana uap bahan bakar yang berada di atas permukaan cairan dapat menyala sesaat apabila diberi sumber api dari luar, tanpa menyebabkan pembakaran yang berkelanjutan. Parameter ini sangat penting dalam konteks keselamatan penyimpanan, penanganan, dan penggunaan bahan bakar. Bahan bakar dengan titik nyala rendah diklasifikasikan sebagai bahan mudah terbakar dan memerlukan penanganan yang lebih hati-hati. Standar titik nyala bensin umumnya berada di bawah 21 °C, minyak tanah antara 38–72 °C, dan solar di atas 52 °C. (Erawati *et al.*, 2018) menunjukkan bahwa minyak pirolisis campuran HDPE dan PP memiliki titik nyala yang cenderung mendekati karakteristik bensin komersial. (Indrayani, 2021) juga menjelaskan bahwa minyak pirolisis HDPE pada suhu optimum 450 °C memiliki titik nyala sebesar 4 °C, yang dikategorikan sebagai bensin karena titik nyala bensin adalah < 21 °C.



Gambar 4. 5 Grafik Pengaruh Rasio Bahan Baku Terhadap Titik Nyala Bahan Bakar Cair Hasil *Catalytic Cracking*

Berdasarkan hasil penelitian, nilai titik nyala berkisar antara 31–38 °C pada semua variasi rasio. Titik nyala tertinggi diperoleh pada rasio HDPE:PP 100:0 sebesar 38 °C, sedangkan titik nyala terendah diperoleh pada rasio 30:70 sebesar 31 °C. Pola ini menunjukkan bahwa peningkatan kandungan HDPE cenderung meningkatkan titik nyala produk, sementara peningkatan kandungan PP menurunkan titik nyala bahan bakar cair.

Tingginya titik nyala pada rasio dengan kandungan HDPE yang lebih besar berkaitan dengan dominasi fraksi hidrokarbon berat (*kerosene–diesel*, C₁₃–C₂₀) yang dihasilkan dari depolimerisasi HDPE. Senyawa-senyawa dengan rantai karbon lebih panjang memiliki tekanan uap yang lebih rendah, sehingga membutuhkan suhu yang lebih tinggi untuk menghasilkan uap yang cukup guna membentuk campuran yang mudah menyala. Hal ini sesuai dengan karakteristik HDPE yang menghasilkan fraksi C₁₃–C₁₆ (40,39%) dan C₁₇–C₂₀ (24,69%) dalam jumlah yang cukup dominan sebagaimana dilaporkan oleh (Hendrawati *et al.*, 2023).

Sebaliknya, peningkatan rasio PP menghasilkan lebih banyak hidrokarbon ringan (C₅–C₁₂) yang memiliki volatilitas lebih tinggi. Senyawa-senyawa ini lebih mudah menguap pada suhu rendah, sehingga membentuk campuran uap di atas permukaan cairan yang siap menyala pada suhu yang lebih rendah. Kondisi ini menyebabkan titik nyala produk pada rasio dengan kandungan PP yang lebih tinggi menjadi lebih rendah. Hal ini sejalan dengan penelitian (Erawati *et al.*, 2018) bahwa produk pirolisis campuran PP dan HDPE memiliki karakteristik titik nyala yang mendekati bensin. (Nuryosuwito *et al.*, 2020) juga menunjukkan bahwa minyak pirolisis HDPE memiliki titik nyala berkisar 32–35 °C, yang sejalan dengan hasil pada rasio 70:30 dan 100:0 dalam penelitian ini.

Nilai titik nyala yang diperoleh dalam penelitian ini (31–38 °C) berada di atas standar titik nyala bensin (< 21 °C), namun masih di bawah standar minyak tanah (38–72 °C) dan solar (> 52 °C). Hal ini menunjukkan bahwa produk bahan bakar cair hasil *catalytic cracking* pada penelitian ini memiliki karakteristik titik nyala yang berada di antara bensin dan minyak tanah, yang mencerminkan komposisi campuran fraksi hidrokarbon ringan dan menengah.

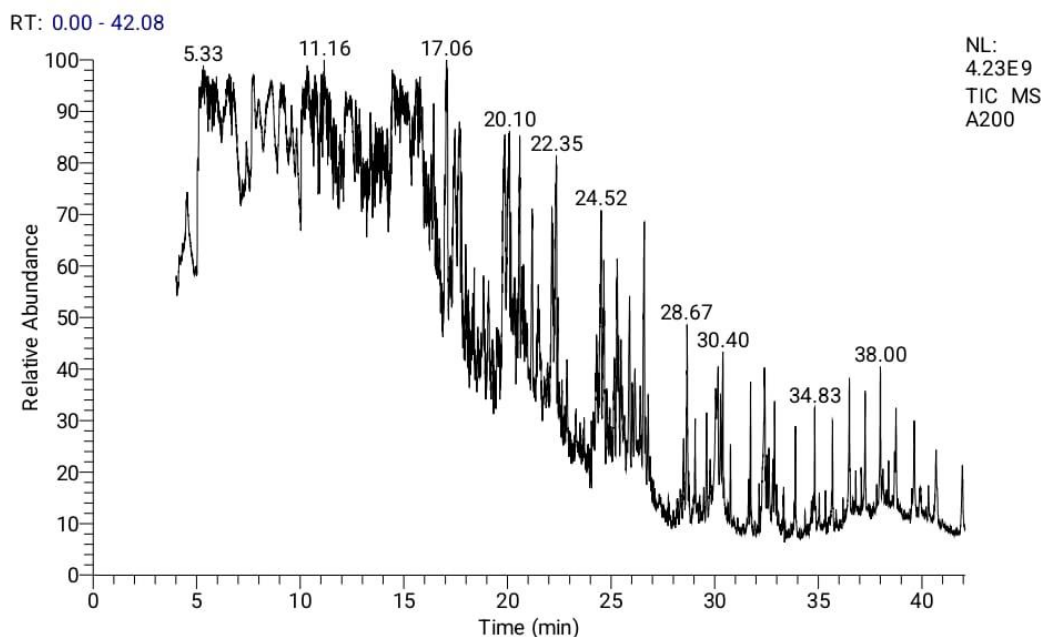
4.2.3 Analisis Karakteristik Produk Bahan Bakar Cair Menggunakan GC-MS

Analisis *Gas Chromatography–Mass Spectrometry* (GC-MS) dilakukan untuk mengidentifikasi komposisi senyawa penyusun bahan bakar cair hasil *catalytic cracking* limbah plastik HDPE dan PP menggunakan katalis zeolit. Analisis ini bertujuan untuk mengetahui distribusi fraksi hidrokarbon yang terbentuk berdasarkan waktu retensi (*retention time*) serta mengidentifikasi senyawa dominan penyusun produk bahan bakar cair. Menurut (Hendrawati *et al.* 2023), analisis GC-MS merupakan metode yang efektif untuk mengidentifikasi komposisi hidrokarbon hasil pirolisis maupun *catalytic cracking* plastik berdasarkan pemisahan senyawa dan pencocokan spektrum massa menggunakan pustaka *National Institute of Standards and Technology* (NIST).

Berbeda dengan pengujian densitas, viskositas, nilai kalor, dan titik nyala yang dilakukan pada seluruh variasi rasio HDPE:PP, analisis GC-MS pada penelitian ini hanya dilakukan pada satu sampel terpilih, yaitu produk bahan bakar cair dari rasio HDPE:PP 70:30. Pemilihan sampel ini didasarkan pada hasil yang telah dibahas pada Subbab 4.2.1, di mana rasio 70:30 menghasilkan persentase *yield* bahan bakar cair tertinggi di antara seluruh variasi rasio yang diuji, yaitu sebesar 9,01%, jauh melampaui rasio 100:0 (3,14%), 30:70 (5,47%), dan 0:100 (1,43%), serta sedikit lebih tinggi dibandingkan rasio 50:50 (8,69%). Perolehan *yield* tertinggi ini menunjukkan bahwa komposisi 70:30 merupakan kondisi paling optimum antara HDPE dan PP dengan bantuan katalis zeolit alam, sehingga produk yang dihasilkan pada rasio ini dianggap paling representatif untuk mewakili karakteristik kimiawi terbaik yang dapat dicapai dalam penelitian ini. Oleh karena itu, analisis GC-MS difokuskan pada sampel rasio 70:30 guna memperoleh gambaran komposisi kimia yang paling relevan dengan kondisi proses optimum.

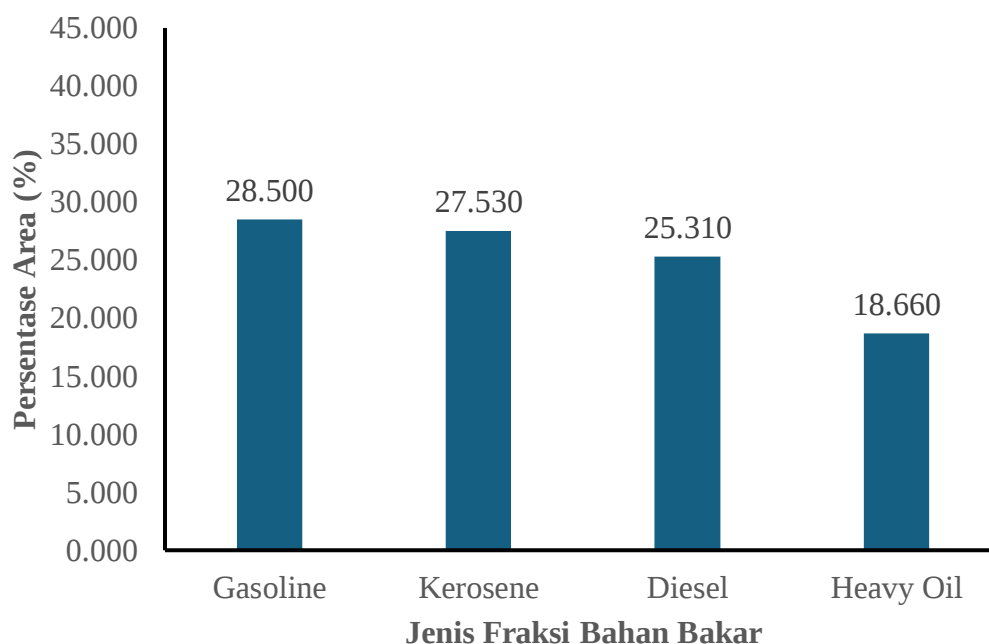
Hasil analisis GC-MS ditampilkan dalam bentuk kromatogram yang menunjukkan sejumlah puncak (*peak*) pada waktu retensi (*Retention Time/RT*) tertentu. Identifikasi senyawa dilakukan dengan mencocokkan spektrum massa setiap puncak terhadap basis data NIST (*National Institute of Standards and Technology*), sehingga diperoleh nama senyawa, waktu retensi (RT), persentase luas area (% *Area*), serta jumlah atom karbon (C) dari setiap senyawa yang terdeteksi. Berdasarkan jumlah atom karbonnya, senyawa-senyawa tersebut dikelompokkan

ke dalam fraksi bahan bakar komersial, yaitu *Gasoline* (C_5 – C_{12}), *Kerosene* (C_{13} – C_{16}), *Solar/Diesel* (C_{14} – C_{20}), dan *Heavy Oil* ($>C_{21}$). Semakin besar proporsi fraksi *Gasoline*, *Kerosene*, dan *Solar* yang dihasilkan, semakin baik kualitas bahan bakar cair yang diperoleh, karena fraksi-fraksi tersebut merupakan komponen utama penyusun bahan bakar minyak komersial. Hasil klasifikasi senyawa hidrokarbon pada produk bahan bakar cair rasio 70:30 disajikan pada **Gambar 4. 6**.



Gambar 4. 6 Kromatogram GC-MS Produk Bahan Bakar Cair Hasil *Catalytic Cracking* Limbah Plastik HDPE dan PP

Pada **Gambar 4. 6** terlihat bahwa kromatogram menunjukkan banyak puncak yang tersebar pada rentang waktu retensi 4,00–42,08 menit, menandakan bahwa produk hasil *catalytic cracking* merupakan campuran berbagai senyawa hidrokarbon dengan rentang massa molekul yang luas. Menurut (Khatha *et al.* 2020), semakin banyak puncak yang muncul pada kromatogram GC-MS menunjukkan semakin kompleks komposisi hidrokarbon yang terbentuk akibat proses degradasi termal rantai polimer. Puncak-puncak utama muncul pada waktu retensi sekitar 5,33; 11,16; 17,06; 20,10; 22,35; 24,52; 28,67; 30,40; 34,83; dan 38,00 menit. Banyaknya puncak yang terbentuk menunjukkan bahwa proses perengkahan rantai polimer HDPE dan PP berlangsung secara kompleks sehingga menghasilkan hidrokarbon dengan jumlah atom karbon yang bervariasi.



Gambar 4. 7 Persentase Fraksi Hidrokarbon Produk Bahan Bakar Cair Rasio HDPE:PP 70:30 Berdasarkan Analisis GC-MS

Berdasarkan **Gambar 4. 7**, hasil identifikasi menggunakan pustaka NIST, produk bahan bakar cair mengandung senyawa hidrokarbon mulai dari C_{10} hingga lebih dari C_{21} . Senyawa yang muncul pada waktu retensi awal didominasi oleh hidrokarbon ringan, seperti *cis-p-mentha-1(7),8-dien-2-ol*, *Cyclohexanone*, *2-ethyl-2-propyl-*, *Propane*, *2-(2-isopropylidene-3-methylcyclopropyl)-*, *trans-*, serta beberapa turunan hidrokarbon siklik lainnya. Senyawa-senyawa tersebut termasuk ke dalam rentang fraksi *gasoline* (C_5 – C_{12}) yang terbentuk akibat pemutusan rantai polimer menjadi molekul dengan massa molekul lebih rendah. Menurut (Hendrawati *et al.* 2023), fraksi C_5 – C_{12} merupakan produk utama hasil perengkahan plastik yang memiliki karakteristik mendekati bensin.

Seiring meningkatnya waktu retensi, senyawa yang teridentifikasi bergeser menuju hidrokarbon dengan jumlah atom karbon lebih tinggi, yaitu fraksi *kerosene* (C_{13} – C_{16}) dan *diesel* (C_{17} – C_{20}). (Khatha *et al.* 2020) menjelaskan bahwa senyawa pada rentang C_{12} – C_{20} umumnya termasuk ke dalam fraksi minyak tanah hingga solar karena memiliki titik didih yang lebih tinggi dibandingkan fraksi bensin. Hal tersebut menunjukkan bahwa proses *catalytic cracking* tidak hanya menghasilkan fraksi ringan tetapi juga menghasilkan fraksi menengah yang berpotensi dimanfaatkan sebagai bahan bakar *diesel*.

Pada waktu retensi di atas 30 menit masih teridentifikasi keberadaan senyawa hidrokarbon berat (C_{21+}). Keberadaan fraksi berat ini menunjukkan bahwa sebagian rantai hidrokarbon belum mengalami perengkahan secara sempurna. Menurut (Tahdid *et al.* 2022), pembentukan hidrokarbon berat dapat disebabkan oleh masih berlangsungnya reaksi polimerisasi ulang (*recombination*) maupun keterbatasan kontak antara molekul hidrokarbon dengan situs aktif katalis sehingga sebagian molekul tetap berada pada fraksi berat.

Hasil rekapitulasi komposisi hidrokarbon menunjukkan bahwa produk bahan bakar cair terdiri atas fraksi *gasoline* (C_5 – C_{12}) sebesar 28,50% area, *kerosene* (C_{13} – C_{16}) sebesar 27,53% area, *diesel* (C_{17} – C_{20}) sebesar 25,31% area, serta *heavy oil* (C_{21+}) sebesar 18,66% area. Dominannya fraksi *gasoline* menunjukkan bahwa katalis zeolit mampu meningkatkan selektivitas pembentukan hidrokarbon ringan melalui proses perengkahan rantai polimer. Hasil tersebut sejalan dengan penelitian (Hendrawati *et al.* 2023) yang melaporkan bahwa penggunaan katalis zeolit menghasilkan fraksi C_5 – C_{12} sebagai komponen dominan pada produk cair hasil *catalytic cracking* PP maupun HDPE.

Distribusi hidrokarbon yang diperoleh juga menunjukkan bahwa total fraksi C_5 – C_{20} mencapai sekitar 81,34% area, sedangkan fraksi hidrokarbon berat (C_{21+}) hanya sekitar 18,66% area. Menurut (Erawati *et al.* 2018), dominasi fraksi hidrokarbon pada rentang C_5 – C_{20} menunjukkan bahwa produk hasil *catalytic cracking* memiliki karakteristik yang mendekati bahan bakar komersial karena sebagian besar tersusun atas fraksi bensin, minyak tanah, dan solar.

Secara keseluruhan, hasil analisis GC-MS menunjukkan bahwa proses *catalytic cracking* limbah plastik HDPE dan PP menggunakan katalis zeolit berhasil menghasilkan produk cair yang didominasi oleh hidrokarbon pada rentang C_5 – C_{20} , sedangkan fraksi berat (C_{21+}) terbentuk dalam jumlah yang relatif kecil. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa katalis zeolit berperan dalam meningkatkan selektivitas pembentukan hidrokarbon ringan sehingga produk yang dihasilkan berpotensi dikembangkan sebagai bahan bakar alternatif setelah dilakukan proses pemurnian (*upgrading*) lebih lanjut (Sa'diyah & Juliastuti, 2015; Tahdid *et al.*, 2022).