

ANALISIS KUALITAS BAHAN BAKAR MINYAK HASIL PIROLISIS BERDASARKAN VARIASI BAHAN LIMBAH PLASTIK

Bayu Joko Santoso¹⁾, Achmad Ali Imran²⁾, Itha Aning Wahyunie³⁾, Chelsea Is Cahyo⁴⁾

^{1&2)}Jurusan Teknik Mesin Politeknik Angkatan Darat Kodiklatad

³⁾Universitas Merdeka Malang

⁴⁾Universitas PGRI Wiranegara Pasuruan

Josanbayu22@gmail.com

ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh jenis limbah plastik terhadap rendemen dan karakteristik bahan bakar minyak hasil proses pirolisis serta mengidentifikasi jenis plastik yang paling mendekati karakteristik bahan bakar Pertamina. Bahan baku yang digunakan meliputi High Density Polyethylene (HDPE), Low Density Polyethylene (LDPE), dan Polymethyl Methacrylate (PMMA). Proses pirolisis dilakukan pada kondisi anaerobik dengan variasi suhu operasi 150–400°C menggunakan reaktor batch skala laboratorium. Produk cair hasil pirolisis kemudian melalui proses upgrading dan diuji karakteristiknya meliputi Research Octane Number (RON), Cetane Number (CN), densitas, viskositas, flash point, kadar air, dan kadar sulfur sesuai standar ASTM. Hasil penelitian menunjukkan bahwa PMMA menghasilkan rendemen minyak tertinggi sebesar 85%, diikuti HDPE sebesar 70% dan LDPE sebesar 65%. Dari sisi karakteristik, HDPE dan LDPE menunjukkan sifat dominan gasoline-range dengan nilai RON tinggi (>94,4 dan >97,8), sedangkan PMMA menunjukkan karakteristik diesel-range dengan CN >49,4. Proses upgrading terbukti mampu menurunkan kadar sulfur pada seluruh sampel di atas 85%, yang menunjukkan peningkatan kualitas bahan bakar. Berdasarkan analisis komparatif, HDPE dan LDPE paling mendekati karakteristik bensin Pertamina, sedangkan PMMA paling mendekati karakteristik solar. Namun demikian, masih diperlukan proses upgrading lanjutan untuk meningkatkan stabilitas dan kesesuaian terhadap standar BBM komersial.

Keyword : *pirolisis, limbah plastik, BBM alternatif, HDPE LDPE PMMA, upgrading bahan bakar*

1. PENDAHULUAN

Peningkatan penggunaan plastik pada sektor rumah tangga, industri, otomotif, dan elektronik menyebabkan jumlah limbah plastik terus meningkat setiap tahun. Plastik banyak digunakan karena memiliki sifat ringan, kuat, tahan korosi, mudah dibentuk, dan biaya produksi yang relatif murah. Namun, sebagian besar plastik bersifat non-biodegradable sehingga sulit terurai secara alami dan dapat mencemari lingkungan dalam jangka waktu yang sangat lama. Akumulasi limbah plastik menjadi salah satu permasalahan lingkungan yang serius karena dapat mencemari tanah, air, dan ekosistem perairan.

Metode pengolahan limbah plastik seperti landfill dan pembakaran terbuka masih memiliki berbagai kelemahan. Penimbunan limbah memerlukan area yang luas dan berpotensi mencemari tanah serta air tanah, sedangkan pembakaran terbuka menghasilkan emisi gas berbahaya seperti CO, SO₂, dan NO_x. Oleh karena itu, diperlukan teknologi pengolahan limbah yang mampu mengurangi volume sampah sekaligus menghasilkan nilai tambah berupa energi alternatif.

Salah satu teknologi yang berkembang adalah proses pirolisis. Pirolisis merupakan proses dekomposisi termal material organik pada temperatur tinggi tanpa oksigen

(anaerob). Pada proses ini, rantai panjang polimer mengalami thermal cracking sehingga menghasilkan produk berupa minyak pirolisis, gas non-kondensabel, dan residu padat (char). Minyak pirolisis menjadi produk yang paling potensial karena mengandung senyawa hidrokarbon yang menyerupai bahan bakar fosil.

Karakteristik minyak pirolisis dipengaruhi oleh jenis plastik yang digunakan. Plastik jenis High Density Polyethylene (HDPE) dan Low Density Polyethylene (LDPE) umumnya menghasilkan fraksi hidrokarbon ringan yang mendekati bensin, sedangkan *Polymethyl Methacrylate* (PMMA) cenderung menghasilkan fraksi hidrokarbon yang lebih berat dan mendekati bahan bakar diesel. Selain jenis plastik, kualitas minyak pirolisis juga dipengaruhi oleh proses upgrading yang bertujuan meningkatkan kemurnian dan kualitas bahan bakar.

Kualitas bahan bakar hasil pirolisis dapat dianalisis berdasarkan parameter Research Octane Number (RON), cetane number, densitas, viskositas, flash point, kadar air, dan kadar sulfur. Parameter tersebut menentukan performa pembakaran, kestabilan bahan bakar, serta kesesuaiannya terhadap standar bahan bakar komersial. Nilai RON berhubungan dengan kemampuan anti-knocking pada mesin bensin, sedangkan cetane number menunjukkan kemampuan penyalaan spontan pada mesin diesel.

Penelitian mengenai pirolisis limbah plastik telah banyak dilakukan, namun sebagian besar masih berfokus pada satu jenis plastik tertentu dan belum membandingkan kualitas bahan bakar hasil pirolisis berdasarkan parameter standar BBM otomotif. Oleh karena itu, penelitian ini dilakukan untuk menganalisis pengaruh jenis limbah plastik HDPE, LDPE, dan PMMA terhadap rendemen dan kualitas bahan bakar hasil pirolisis sebelum dan sesudah proses upgrading. Selain itu, penelitian ini bertujuan mengidentifikasi

jenis limbah plastik yang menghasilkan bahan bakar paling mendekati karakteristik BBM Pertamina, baik untuk kategori bensin maupun solar.

2. TINJAUAN PUSTAKA

Penelitian mengenai pirolisis limbah plastik berkembang sebagai solusi pengolahan sampah sekaligus penghasil energi alternatif. Beberapa penelitian menunjukkan bahwa jenis plastik dan kondisi operasi pirolisis sangat memengaruhi rendemen serta kualitas minyak yang dihasilkan.

2.1. Penelitian Terdahulu

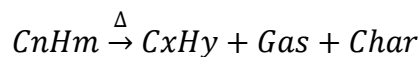
Paulina dan Suaradwipa (2024) meneliti viskositas minyak pirolisis HDPE, LDPE, dan PP dan memperoleh nilai yang mendekati bahan bakar komersial. Marwani dan Trifarizy (2024) menunjukkan bahwa temperatur pirolisis berpengaruh terhadap densitas, viskositas, dan nilai kalor minyak pirolisis HDPE-PP. Rizak dkk. (2022) melaporkan bahwa minyak pirolisis PP dan PE memiliki rendemen tinggi dengan RON mencapai 88,8, namun cetane number masih rendah sehingga memerlukan upgrading. Haidar dkk. (2023) menyatakan bahwa temperatur optimum pirolisis berada pada sekitar 400°C dengan peningkatan rendemen seiring kenaikan suhu. Selain itu, Yaqoob dkk. (2025) menjelaskan bahwa jenis plastik, temperatur, katalis, dan desain reaktor merupakan faktor utama yang menentukan kualitas minyak pirolisis.

Berdasarkan penelitian terdahulu, sebagian besar penelitian masih berfokus pada parameter tertentu seperti rendemen, densitas, atau viskositas. Oleh karena itu, penelitian ini dilakukan untuk menganalisis karakteristik minyak pirolisis HDPE, LDPE, dan PMMA secara lebih menyeluruh meliputi RON, cetane number,

densitas, viskositas, flash point, kadar air, dan sulfur serta membandingkannya dengan BBM Pertamina.

2.2. Pirolisis Limbah Plastik

Pirolisis merupakan proses dekomposisi termal material organik tanpa oksigen pada temperatur tinggi sehingga menghasilkan minyak pirolisis, gas, dan residu karbon (char). Reaksi umum pirolisis dapat dituliskan sebagai berikut:



Kualitas minyak pirolisis dipengaruhi oleh jenis plastik, temperatur, waktu tinggal, dan proses upgrading.

2.1.1. Rendemen Minyak

Rendemen menunjukkan persentase minyak yang dihasilkan dari massa awal plastik.

$$\eta = \frac{m_o}{m_b} \times 100\%$$

Keterangan:

- η = rendemen minyak (%)
- m_o = massa minyak pirolisis (gram)
- m_b = massa bahan baku plastik (gram)

Semakin tinggi rendemen minyak maka semakin besae efisiensi konversi limbah plastic menjadi bahan bakar cair (Yaqoob dkk., 2025)

2.2.2. Research Octane Number (RON)

RON menunjukkan kemampuan bahan bakar menahan knocking pada mesin bensin.

$$RON = \% iso - octane$$

Keterangan:

- RON = Rrsrerch Octane Number

- Iso-octane = bahan referensi dengannilai oktan 100
- n-heptane = bahan referensi dengan nilai oktan 0

Semakin tinggi nilai RON maka pembakaran semakin stabil pada rasio kompresi tinggi (Chang dkk., 2023).

2.2.3. Cetane Number (CN)

Cetane number menunjukkan kemampuan bahan bakar diesel mengalami penyaalaan spontan.

$$CN = a - b\rho$$

Keterangan:

- a, b = konstanta empiris
- ρ = densitas bahan bakar.

Semakin tinggi CN makan ignition delay semakin pendek (Faisal dkk., 2023).

2.2.4. Densitas dan Viskositas

Densitas memengaruhi nilai kalor dan atomisasi bahan bakar.

$$\rho = \frac{m}{V}$$

Keterangan:

- ρ = densitas (g/m³)
- m = massa bahan bakar
- V = volume bahan bakar

Densitas memengaruhi:

- Nilai kalor volumetrik
- Atomisasi bahan bakar
- Rasio udara-bahan bakar

Semakin tinggi densitas maka fraksi hidrokarbon cenderung lebih berat. (Shah dkk.,2023)

Viskositas memengaruhi kualitas penyemprotan bahan bakar pada ijektor.

$$\tau = \mu \frac{du}{dy}$$

Keterangan:

- τ = tegangan geser
- μ = viskositas dinamis
- $\frac{du}{dy}$ = gradien kecepatan

Viskositas memengaruhi:

- Atomisasi bahan bakar
- Performa injektor
- Homogenitas pembakaran

Viskositas terlalu tinggi menyebabkan pembakaran tidak sempurna dan pembentukan deposit karbon (Faisal dkk., 2023)

2.2.5. Flah Point, Kadar Air, dan Silfur

Flash point menunjukkan temperature minimum bahan bakar mulai terbakar.

$$FP \propto \frac{M}{P_{vap}}$$

Keterangan:

- FP = flash point
- M = massa molekul
- P_{vap} = tekanan uap

Semakin rendah flash point maka bahan bakar semakin mudah menguap dan terbakar (Irfan dkk., 2023).

Kadar air dihitung dengan:

$$KA = \frac{m_a}{m_s} \times 100\%$$

Keterangan:

- KA = kadar air (%)
- m_a = massa air
- m_s = massa sampel

Kadar air tinggi menyebabkan:

- Penurunan nilai kalor
- Korosi sistem bahan bakar
- Gangguan pembakaran

(Al-Fatesh dkk., 2023).

Kadar sulfur dihitung menggunakan:

$$S = \frac{m_{sulfur}}{m_{sample}} \times 100\%$$

Keterangan:

- S = kadar sulfur (%)
- m_{sulfur} = massa sulfur
- m_{sample} = massa sample

Semakin rendah sulfur maka emisi gas buang semakin ramah lingkungan (Yaqoob dkk., 2025)

2.2.6. Upgrading dan Analisis Deviasi

Upgrading dilakukan untuk meningkatkan kualitas minyak pirolisis melalui distilasi, filtrasi, atau adsorpsi sehingga karakteristiknya mendekati BBM Pertamina. Analisis kedekatan terhadap BBM Pertamina dihitung menggunakan deviasi absolut:

$$D = |X_{uji} - X_{standar}|$$

Keterangan:

- D = nilai deviasi
- X_{uji} = nilai hasil pengujian
- $X_{standar}$ = nilai standar acuan
- $||$ = nilai absolut

dan Perhitungan MAD sebagai berikut:

$$MAD = \frac{\sum D}{n}$$

Keterangan:

- MAD = Mean Absolute Deviation
- $\sum D$ = jumlah seluruh deviasi
- n = jumlah parameter pengujian

MAD digunakan untuk menentukan jenis minyak pirolisis yang paling mendekati BBM Konvensional (Shan dkk., 2023).

3. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan metode eksperimen laboratorium dengan pendekatan kuantitatif untuk menganalisis pengaruh jenis limbah plastik HDPE, LDPE, dan PMMA terhadap kualitas bahan bakar hasil pirolisis. Proses pirolisis dilakukan menggunakan reaktor batch pada kondisi tanpa oksigen dengan temperatur 150–400°C dan waktu proses 45–60 menit. Produk yang dihasilkan berupa minyak pirolisis kemudian diuji karakteristiknya meliputi Research Octane Number (RON), Cetane Number (CN), densitas, viskositas, flash point, kadar air, dan kadar sulfur berdasarkan standar ASTM.

Data hasil pengujian dianalisis secara deskriptif dan dibandingkan dengan standar BBM Pertamina, ASTM, dan SNI untuk menentukan jenis plastik yang menghasilkan bahan bakar paling mendekati karakteristik bensin maupun solar komersial.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1. Rendemen Minyak Pirolisis

Hasil eksperimen menunjukkan perbedaan rendemen minyak pirolisis berdasarkan jenis plastik yang digunakan. Data rendemen ditunjukkan pada table 1.

Tabel 1. Rendemen Minyak Pirolisis

No	Jenis Plastik	Rendemen Minyak (%)	Gas (%)	Residu (%)
1.	HDPE	70	10	20
2.	LDPE	65	15	20
3.	PMM A	85	5	10

PMMA menghasilkan rendemen minyak tertinggi karena mengalami mekanisme *depolymerization* yang menghasilkan *methyl methacrylate* dalam jumlah besar.

4.2. Karakteristik BBM Hasil Pirolisis

Tabel 2. Karakteristik BBM Setelah Upgrading

No	Parameter	HDP E	LDP E	PMM A
1.	RON	>94,4	>97,8	-
2.	Cetane Number	-	-	>49,4
3.	Densitas (g/cm ³)	0,741	0,724	0,920
4.	Viskositas (cSt)	2,3	2,2	2,2
5.	Flash Point (°C)	32	26	18
6.	Kadar Air (mg/kg)	250	210	170
7.	Sulfur (%)	0,02	0,02	0,03

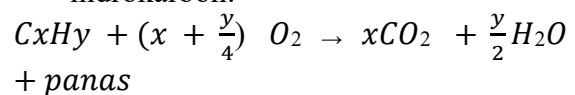
HDPE dan LDPE menunjukkan karakteristik dominan gasoline-range karena nilai RON tinggi serta densitas rendah yang menunjukkan dominasi hidrokarbon ringan (C5-C12). LDPE memiliki RON paling tinggi (>97,8) yang mengindikasikan kandungan iso-paraffin lebih dominan sehingga lebih tahan terhadap knocking.

Sebaliknya, PMMA menunjukkan karakteristik diesel-range dengan cetane number >49,4 dan densitas lebih tinggi (0,920 g/cm³), yang mengindikasikan dominasi hidrokarbon lebih berat. Namun nilai flash point yang rendah pada semua sampel menunjukkan volatilitas tinggi dan stabilitas penyimpanan yang masih terbatas.

HDPE dan LDPE memiliki karakteristik mendekati bensin Pertamina karena memiliki nilai RON tinggi dan densitas rendah. PMMA memiliki karakteristik mendekati solar karena nilai cetane number tinggi.

4.3. Analisis Reaksi Pembakaran

Analisis pembakaran sempurna hidrokarbon:



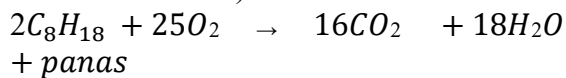
Keterangan:

- $CxHy$ = senyawa hidrokarbon
- O_2 = oksigen
- CO_2 = karbon dioksida
- H_2O = uap air

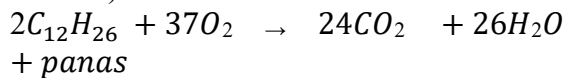
Tabel 3. Pendekatan Komposisi Hidrokarbon

No	Jenis Plastik	Karakter Dominan	Pendekatan Senyawa
1.	HDPE	Gasoline-range hydrocarbons	Oktana (C_8H_{18})
2.	LDPE	Gasoline-range hydrocarbons	Iso-Oktana (C_8H_{18})
3.	PMMA	Diesel-range hydrocarbons	Dodekana ($C_{12}H_{26}$)

Pembakaran iso-oktana (representasi HDPE dan LDPE):



Pembakaran dodekana (representasi PMMA):



Hasil ini menunjukkan bahwa HDPE dan LDPE lebih sesuai untuk sistem *spark ignition*, sedangkan PMMA lebih sesuai untuk *compression ignition*.

4.4. Analisis Penurunan Sulfur

Penurunan kadar sulfur dihitung menggunakan persamaan:

$$\% \text{ Penurunan} = \frac{S_{awal} - S_{akhir}}{S_{awal}} \times 100\%$$

Hasil perhitungan penurunan sulfur pada masing-masing sampel sebagai berikut:

1. HDPE

$$\frac{0.18 - 0.02}{0.18} \times 100\% = 88.89\%$$

Penurunan sulfur pada HDPE mencapai 88,89%, menunjukkan efektivitas

upgrading dalam mengurangi kandungan sulfur sehingga level rendah.

2. LDPE

$$\frac{0.17 - 0.02}{0.17} \times 100\% = 88.24\%$$

LDPE mengalami penurunan sulfur sebesar 88,24% yang menunjukkan performa upgrading yang relatif sama dengan HDPE.

3. PMMA

$$\frac{0.20 - 0.03}{0.20} \times 100\% = 85.00\%$$

PMMA menunjukkan penurunan sulfur sebesar 85,00%, sedikit lebih rendah dibandingkan HDPE dan LDPE karena karakteristik awal fraksi oksigenat dan hidrokarbon berat yang lebih dominan.

Seluruh sampel menunjukkan penurunan kadar sulfur yang signifikan (>85%), yang mengindikasikan bahwa proses upgrading efektif dalam meningkatkan kualitas lingkungan dan menurunkan potensi emisi SOx pada hasil pembakaran.

5. KESIMPULAN DAN SARAN

5.1. Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian dan pembahasan, dapat disimpulkan bahwa jenis limbah plastik berpengaruh signifikan terhadap rendemen dan karakteristik bahan bakar minyak hasil pirolisis. PMMA menghasilkan rendemen minyak tertinggi sebesar 85%, diikuti HDPE sebesar 70% dan LDPE sebesar 65%. Perbedaan ini dipengaruhi oleh mekanisme degradasi termal masing-masing plastik, di mana PMMA mengalami dominasi depolymerization yang menghasilkan fraksi volatil, sedangkan HDPE dan LDPE lebih dominan mengalami random chain scission yang menghasilkan distribusi produk cair, gas, dan residu yang lebih seimbang.

Dari aspek karakteristik bahan bakar, HDPE dan LDPE menunjukkan sifat

dominan gasoline-range dengan nilai RON tinggi (>94,4 dan >97,8), densitas rendah, serta viskositas yang mendukung karakteristik bensin. LDPE menunjukkan performa terbaik pada kategori bensin karena memiliki nilai RON tertinggi yang mengindikasikan ketahanan knocking lebih baik. Sebaliknya, PMMA menunjukkan karakteristik diesel-range dengan cetane number >49,4 dan densitas lebih tinggi (0,920 g/cm³), sehingga lebih mendekati karakteristik solar. Meskipun demikian, seluruh sampel masih memiliki nilai flash point yang relatif rendah sehingga menunjukkan volatilitas tinggi dan keterbatasan dalam aspek keamanan penyimpanan.

Analisis pembakaran menunjukkan bahwa HDPE dan LDPE lebih sesuai digunakan pada sistem spark ignition dengan pendekatan pembakaran iso-oktana, sedangkan PMMA lebih sesuai untuk sistem compression ignition dengan pendekatan dodekana. Proses upgrading juga terbukti efektif menurunkan kadar sulfur dengan efisiensi di atas 85%, yaitu HDPE sebesar 88,89%, LDPE sebesar 88,24%, dan PMMA sebesar 85,00%, yang menunjukkan peningkatan kualitas lingkungan dan penurunan potensi emisi SO_x. Secara keseluruhan, HDPE dan LDPE paling mendekati karakteristik bensin Pertamina, sedangkan PMMA paling mendekati karakteristik solar Pertamina, namun masih diperlukan proses upgrading lanjutan untuk mencapai standar BBM komersial secara penuh.

5.2. Saran

Penelitian selanjutnya disarankan untuk melakukan proses upgrading lanjutan seperti *catalytic cracking* atau *hydrotreating* guna meningkatkan nilai *flash point* dan *stabilitas* bahan bakar agar lebih sesuai dengan standar BBM komersial. Selain itu, perlu dilakukan optimasi parameter pirolisis seperti temperatur, laju pemanasan, dan waktu tinggal untuk meningkatkan selektivitas

produk cair serta mengurangi pembentukan gas dan residu. Pengujian lanjutan terhadap emisi pembakaran pada mesin nyata juga diperlukan untuk mengevaluasi performa aktual bahan bakar hasil pirolisis sebelum diaplikasikan secara luas.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] J. R. Jambeck et al., "Plastic waste inputs from land into the ocean," *Science*, vol. 347, no. 6223, pp. 768–771, 2015.
- [2] S. Y. Miandad, M. A. Barakat, M. A. Rehan, and A. S. Nizami, "Current status and future prospects of plastic waste conversion into fuel," *Energy Conversion and Management*, vol. 150, pp. 163–172, 2021.
- [3] H. Yaqoob, H. M. Ali, and U. Khalid, "Pyrolysis of waste plastics for alternative fuel: A review of key factors," *Waste Management*, vol. 120, pp. 1–15, 2025.
- [4] A. Al-Salem, P. Lettieri, and J. Baeyens, "Recycling and recovery routes of plastic solid waste (PSW): A review," *Waste Management*, vol. 32, no. 9, pp. 1775–1796, 2022.
- [5] M. Siregar, R. D. Haryanto, and A. Putra, "Characterization of fuel oil from plastic waste pyrolysis," *Journal of Energy Conversion and Management*, vol. 255, pp. 115–123, 2024.
- [6] M. R. Rizak, K. Anam, and T. Towijaya, "Perbandingan bahan bakar minyak hasil pirolisis sampah plastik PP dan PE," *Jurnal Rekayasa Mesin*, vol. 17, no. 2, pp. 101–110, 2022.
- [7] P. L. Kefi and I. N. Suaradwipa, "Uji viskositas bahan bakar cair hasil pirolisis sampah plastik HDPE, LDPE, dan PP," *Jurnal Teknologi dan Rekayasa*, vol. 8, no. 1, pp. 45–52, 2024.
- [8] M. Marwani and M. D. Trifarizy, "The pyrolysis of HDPE and PP plastic waste blend," *International Journal of Renewable Energy Research*, vol. 14, no. 1, pp. 1–9, 2024.

- [9] M. A. Haidar, N. Faizeh, and B. Wahyudi, "Pengolahan sampah plastik menjadi bahan bakar minyak dengan proses pirolisis," *Jurnal Teknik Mesin Indonesia*, vol. 19, no. 3, pp. 88–96, 2023.
- [10] A. Aguado and D. P. Serrano, "Feedstock recycling of plastic wastes," *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, vol. 68–69, pp. 653–667, 1999.