



Analisis Pengaruh Temperatur terhadap Yield dan Karakteristik Bio-Oil Hasil Pirolisis Plastik HDPE dan Serbuk Kayu Pinus Menggunakan Katalis Bentonit

Alfarizky Pradirga, Dwi Lestari, Irawan Rusnadi, Lety Trisnaliani, Rima Daniar

Jurusan Teknik Kimia, Politeknik Negeri Sriwijaya

irawanrusnadi@polsri.ac.id, rizkyfariz158@gmail.com, dwiilestari2473@gmail.com, lety.trisnaliani@polsri.ac.id,
rimadanian@polsri.ac.id

Abstrak

Penumpukan sampah plastik dan limbah biomassa yang belum dimanfaatkan secara optimal merupakan permasalahan lingkungan yang memerlukan solusi berkelanjutan. Penelitian ini bertujuan menganalisis pengaruh temperatur operasi terhadap yield dan karakteristik bio-oil hasil pirolisis campuran plastik High Density Polyethylene (HDPE) dan serbuk kayu pinus dengan rasio 2:1 menggunakan katalis bentonit. Proses pirolisis dilakukan pada reaktor fixed bed dengan variasi temperatur 250°C, 300°C, 350°C, 400°C, dan 450°C, massa bahan baku 2 kg, katalis bentonit 10% dari massa bahan baku, serta waktu operasi 120 menit. Karakteristik bio-oil yang dianalisis meliputi densitas, viskositas, nilai kalor, titik nyala, serta komposisi senyawa menggunakan Gas Chromatography-Mass Spectrometry (GC-MS). Hasil penelitian menunjukkan bahwa peningkatan temperatur operasi meningkatkan yield bio-oil dari 10,04% pada 250°C menjadi 13,02% pada 450°C. Densitas bio-oil menurun dari 0,7970 g/ml menjadi 0,7405 g/ml, sedangkan nilai kalor meningkat dari 8.083 cal/g menjadi 8.942 cal/g seiring kenaikan temperatur. Viskositas berfluktuasi pada rentang 3,01–6,77 cP dan titik nyala berada pada rentang 33,1–38,2°C. Kondisi operasi optimum diperoleh pada temperatur 450°C dengan yield 13,02%, densitas 0,7405 g/ml, viskositas 3,53 cP, nilai kalor 8.942 cal/g, dan titik nyala 33,1°C. Analisis GC-MS menunjukkan bio-oil didominasi oleh fraksi bensin (42,23%) dan fraksi solar (38,49%), diikuti fraksi kerosin (13,18%) dan fraksi pelumas (6,12%). Hasil ini menunjukkan bahwa campuran plastik HDPE dan serbuk kayu pinus berpotensi dikembangkan sebagai bahan baku bahan bakar cair alternatif, meskipun masih memerlukan proses upgrading lanjutan agar sesuai standar bahan bakar komersial.

Kata kunci : Pirolisis, HDPE, Biomassa, Katalis Bentonit, Bio-Oil, Temperatur Operasi

1. Pendahuluan

Kebutuhan energi yang terus meningkat seiring pertumbuhan populasi dan industri memperburuk kondisi penipisan sumber daya bahan bakar fosil serta menurunkan kualitas udara akibat polusi. Di sisi lain, masyarakat juga dihadapkan pada peningkatan volume sampah organik maupun anorganik, termasuk limbah biomassa kayu dan limbah plastik jenis High Density Polyethylene (HDPE) (Zalfa et al., 2023). Pengelolaan sampah menjadi masalah global yang berdampak luas karena laju pertumbuhan teknologi pengolahan yang relatif lambat dibandingkan laju timbunan sampah, sementara produk sampingannya berpotensi membahayakan lingkungan dan kesehatan manusia.

Biomassa kayu, termasuk serbuk kayu pinus hasil samping industri penggergajian, merupakan limbah yang melimpah namun sering kali tidak bernilai, dibuang, atau dibakar sehingga menimbulkan pencemaran udara dan tanah (Sudiryanto, et.al., 2022). Kandungan selulosa, hemiselulosa, dan lignin pada serbuk kayu menjadikannya berpotensi sebagai bahan baku produksi bio-oil. Di sisi lain, HDPE merupakan salah satu jenis plastik termoplastik yang paling banyak digunakan karena berasal dari polimerisasi etilena dengan struktur rantai yang relatif lurus, sehingga memiliki densitas dan kekuatan mekanik yang tinggi namun sulit terdegradasi secara alami (Rizal et al. 2023).

Salah satu alternatif pemanfaatan kedua jenis limbah tersebut adalah melalui proses pirolisis, yaitu dekomposisi termal bahan organik tanpa kehadiran oksigen yang menghasilkan produk cair (bio-oil), padat (char), dan gas (Majid, Ismail, and Swandono 2021). Beberapa penelitian terdahulu menunjukkan bahwa kuantitas dan kualitas bio-oil dipengaruhi oleh perbandingan komposisi bahan baku plastik dan biomassa, serta oleh jenis katalis yang

digunakan. Penggunaan katalis sintetis seperti zeolit telah banyak diteliti, sementara penelitian dengan katalis alami yang lebih mudah diperoleh, seperti bentonit, masih terbatas. (Firmansyah et al. 2025)

Kebaruan penelitian ini terletak pada penggunaan campuran limbah plastik HDPE dan serbuk kayu pinus dengan rasio 2:1 serta katalis bentonit, disertai analisis pengaruh variasi temperatur operasi terhadap yield dan karakteristik bio-oil yang dihasilkan. Berdasarkan uraian tersebut, penelitian ini bertujuan untuk: (1) memperoleh kondisi operasi optimum berdasarkan variasi temperatur pirolisis untuk menghasilkan yield bio-oil maksimal; (2) mengetahui pengaruh temperatur terhadap karakteristik bio-oil meliputi densitas, viskositas, nilai kalor, dan titik nyala; serta (3) menganalisis komposisi senyawa bio-oil melalui pengujian GC-MS.

2. Metode Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan di Laboratorium Teknik Energi, Politeknik Negeri Sriwijaya, Palembang. Bahan baku yang digunakan adalah sampah plastik jenis HDPE dan serbuk kayu pinus dengan rasio campuran 2:1, katalis bentonit sebanyak 10% dari massa bahan baku, dan aquadest. Proses pirolisis dilakukan menggunakan reaktor fixed bed yang dilengkapi dengan thermocouple, thermocouple reader, kondensor, dan separator.

Bahan baku terlebih dahulu dipreparasi melalui pengecilan ukuran serbuk kayu pinus hingga 7 mesh, pengeringan, dan penimbangan sesuai variasi massa yang telah ditentukan. Total massa bahan baku yang digunakan pada setiap percobaan adalah 2 kg dengan rasio plastik HDPE dan biomassa (2:1) dengan penambahan katalis bentonit sebesar 10% dari massa bahan baku (200 gr). Proses pirolisis dijalankan pada lima variasi temperatur, yaitu 250°C, 300°C, 350°C, 400°C, dan 450°C, dengan waktu operasi tetap selama 120 menit untuk setiap perlakuan.

Uap hasil pirolisis dialirkan menuju kondensor untuk diembunkan menjadi produk cair, sedangkan sisa fase gas yang tidak terkondensasi ditampung terpisah menggunakan separator. Bio-oil yang diperoleh selanjutnya dianalisis karakteristiknya meliputi densitas, viskositas, nilai kalor, dan titik nyala mengacu pada standar ASTM D 7544-09. Selain itu, komposisi senyawa kimia bio-oil dianalisis menggunakan Gas Chromatography-Mass Spectrometry (GC-MS) untuk mengidentifikasi distribusi fraksi hidrokarbon berdasarkan jumlah atom karbon.

3. Hasil dan Pembahasan

Yield Bio-Oil pada Berbagai Temperatur Operasi

Data hasil pirolisis campuran plastik HDPE dan serbuk kayu pinus pada berbagai temperatur operasi disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Yield Bio-Oil pada Variasi Temperatur Operasi

No	Massa (kg)	Temp (°C)	Jumlah Katalis	Waktu (jam)	Produk		% Yield BBC		
					Bahan Bakar Cair		Residu	Gas	Bahan Bakar Cair (%)
					(ml)	(kg)	(kg)	(kg)	
1	2	250	10 %	2	252	0,2008	1,68	0,1192	10,04
2		300			310	0,2464	1,55	0,2036	12,32
3		350			324	0,2569	1,45	0,2931	12,84
4		400			332	0,2599	1,55	0,1901	12,99
5		450			352	0,2604	1,62	0,1196	13,02

Data menunjukkan bahwa yield bio-oil meningkat secara konsisten seiring kenaikan temperatur operasi, dari 10,04% pada 250°C menjadi 13,02% pada 450°C.

Karakteristik Fisik Bio-Oil

Hasil pengujian densitas, nilai kalor, viskositas, dan titik nyala bio-oil pada setiap variasi temperatur disajikan pada Tabel 2.

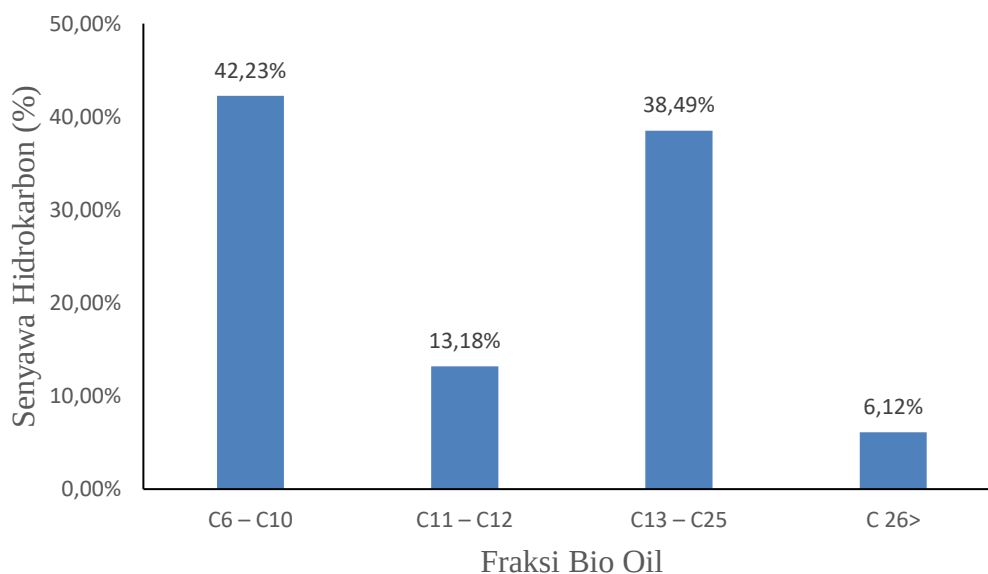
Tabel 2. Karakteristik Bio-Oil pada Variasi Temperatur Operasi

Temp Operasi (°C)	Densitas (gr/ml)	Nilai Kalor (cal/gr)	Viskositas (cP)	Titik Nyala (°C)
	Min 0,715	10775-10900	Min 2.0	Min 52
250	0,7970	8083	6.77	35.4
300	0,7955	8282	4.09	38.2
350	0,7932	8491	5.34	34.6
400	0,7839	8711	3.01	37.5
450	0,7405	8942	3.53	33.1

Densitas bio-oil menurun secara konsisten dari 0,7970 g/ml pada 250°C menjadi 0,7405 g/ml pada 450°C, sedangkan nilai kalor meningkat dari 8.083 cal/g menjadi 8.942 cal/g pada rentang temperatur yang sama. Viskositas menunjukkan pola fluktuatif dengan nilai terendah 3,01 cP pada 400°C dan nilai tertinggi 6,77 cP pada 250°C, sementara titik nyala berada pada rentang 33,1–38,2°C, dengan nilai tertinggi pada 300°C dan nilai terendah pada 400°C dan 450°C.

Komposisi Senyawa Bio-Oil (GC-MS)

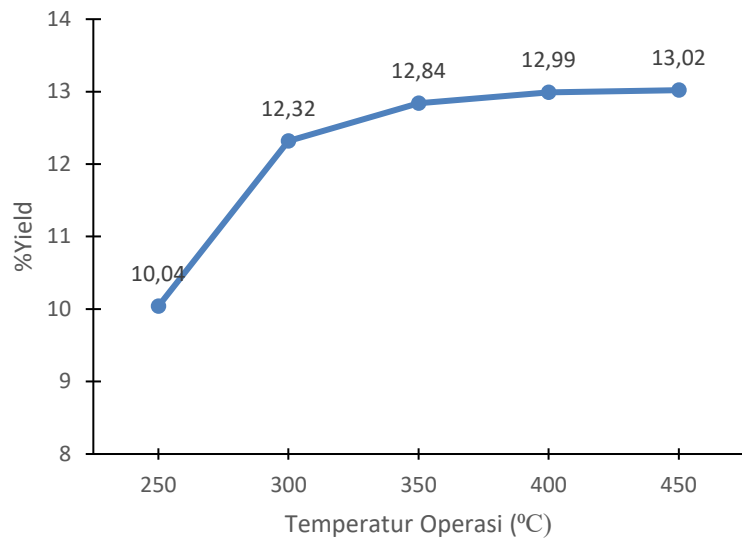
Analisis GC-MS pada bio-oil hasil pirolisis temperatur optimum 450°C menunjukkan komposisi fraksi hidrokarbon disajikan pada Gambar 1.



Gambar 1. Distribusi Fraksi Hidrokarbon Bio-Oil Berdasarkan GC-MS

Bio-oil yang dihasilkan didominasi oleh fraksi setara bensin (42,23%) dan fraksi setara solar (38,49%), sedangkan fraksi kerosin dan pelumas masing-masing hanya sebesar 13,18% dan 6,12%.

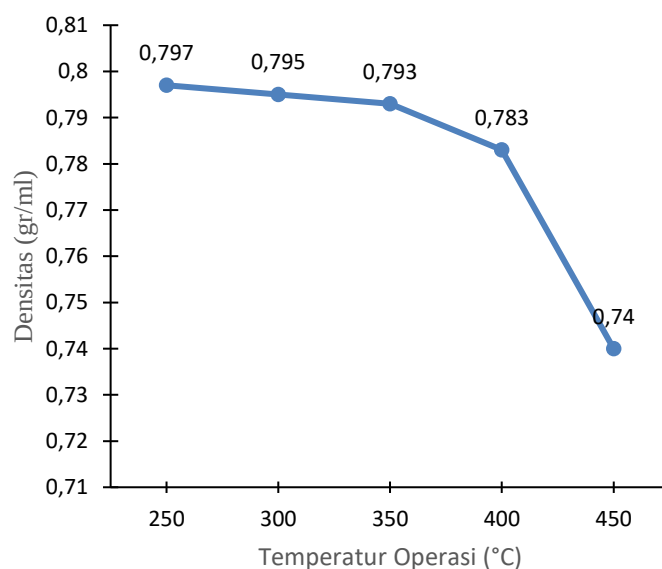
Pengaruh Temperatur terhadap Yield Bio-Oil



Gambar 2. Pengaruh Temperatur Operasi Terhadap % Yield Bahan Bakar Cair

Peningkatan temperatur operasi dari 250°C hingga 450°C secara konsisten meningkatkan yield bio-oil. Pada temperatur rendah, energi termal yang tersedia belum cukup untuk memutus rantai polimer HDPE dan komponen lignoselulosa kayu pinus secara sempurna, sehingga sebagian besar bahan baku masih tertinggal sebagai residu padat. Seiring kenaikan temperatur, proses cracking berlangsung lebih efisien sehingga lebih banyak senyawa volatil terbentuk dan mengembun menjadi produk cair. Yield tertinggi pada 450°C (13,02%) mengindikasikan bahwa temperatur ini merupakan kondisi paling efektif untuk mengonversi bahan baku menjadi bio-oil pada rentang yang diteliti, sejalan dengan prinsip bahwa kenaikan temperatur pirolisis meningkatkan derajat konversi bahan baku menjadi produk cair dan gas sementara residu padat cenderung menurun.

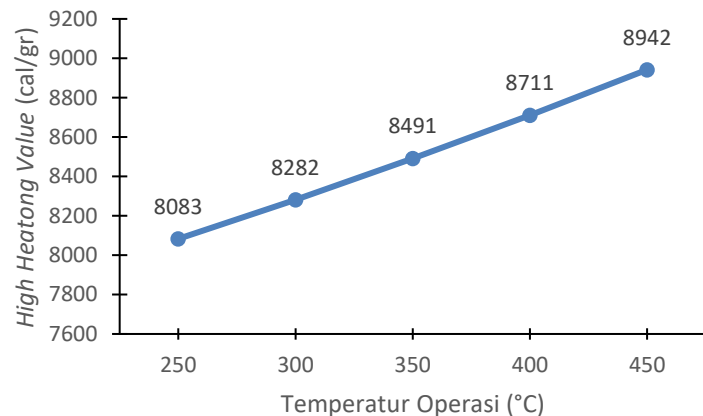
Pengaruh Temperatur terhadap Densitas



Gambar 3. Pengaruh Temperatur Operasi Terhadap Densitas Bio Oil

Penurunan densitas bio-oil seiring kenaikan temperatur berkaitan dengan mekanisme thermal cracking. Pada temperatur rendah (250–350°C), pemutusan rantai polimer belum berlangsung sempurna sehingga produk cair masih banyak mengandung fraksi hidrokarbon berat bermassa molekul tinggi. Pada temperatur yang lebih tinggi, khususnya 450°C, terjadi secondary cracking yang mendegradasi hidrokarbon rantai panjang menjadi fraksi ringan setara bensin dan kerosin, bahkan sebagian berubah menjadi gas non-kondensasi. Dominasi hidrokarbon ringan inilah yang menurunkan densitas bio-oil secara signifikan hingga mendekati nilai densitas minimum bensin menurut standar SNI (0,715 g/ml).

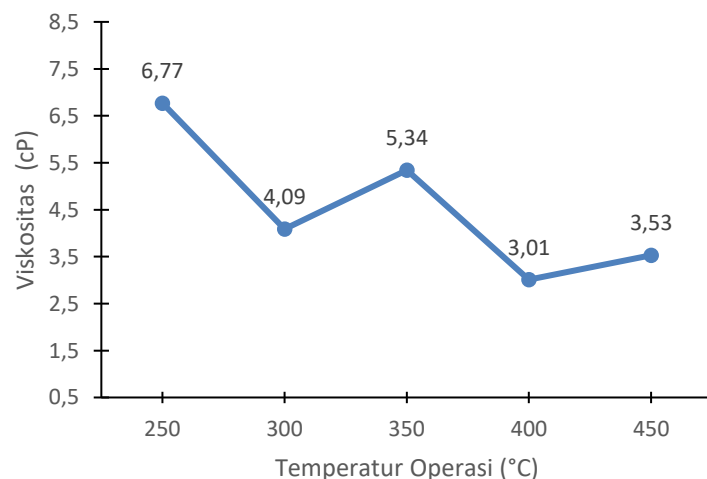
Pengaruh Temperatur terhadap Nilai Kalor



Gambar 4. Pengaruh Temperatur Operasi Terhadap Nilai Kalor (HHV) Bio Oil

Nilai kalor bio-oil meningkat secara bertahap seiring kenaikan temperatur, dari 8.083 cal/g pada 250°C menjadi 8.942 cal/g pada 450°C. Peningkatan ini terjadi karena temperatur yang lebih tinggi mendorong dekomposisi termal HDPE dan biomassa secara lebih menyeluruh, menghasilkan senyawa hidrokarbon dengan kandungan karbon yang lebih tinggi dan kandungan oksigen yang lebih rendah, sehingga meningkatkan nilai energi pembakaran bio-oil.

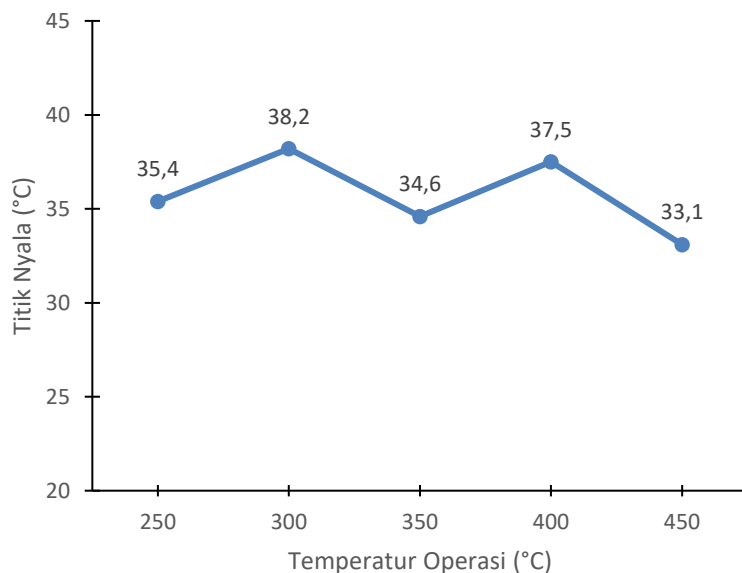
Pengaruh Temperatur terhadap Viskositas



Gambar 5. Pengaruh Temperatur Operasi Terhadap Viskositas Bio Oil

Viskositas bio-oil menunjukkan pola fluktuatif seiring kenaikan temperatur, menurun dari 6,77 cP pada 250°C hingga titik terendah 3,01 cP pada 400°C, sebelum sedikit meningkat menjadi 3,53 cP pada 450°C. Penurunan viskositas berkaitan dengan proses cracking yang memecah rantai hidrokarbon panjang menjadi molekul yang lebih pendek sehingga fluida menjadi lebih encer. Kenaikan viskositas pada 350°C dan 450°C diduga disebabkan oleh pembentukan senyawa aromatik berat atau reaksi sekunder berupa polimerisasi pada temperatur tinggi. Secara umum, viskositas bio-oil pada seluruh variasi temperatur tergolong rendah, yang mendukung efisiensi pembakaran karena memudahkan pembentukan campuran udara-bahan bakar yang lebih baik.

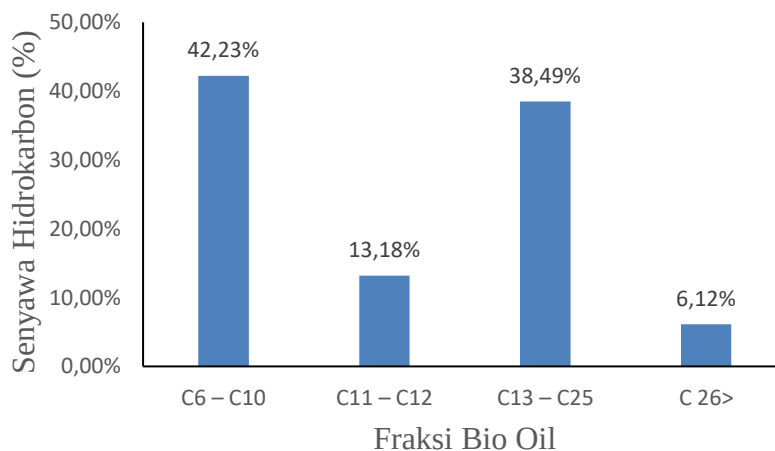
Pengaruh Temperatur terhadap Titik Nyala



Gambar 6. Pengaruh Temperatur Operasi Terhadap Titik Nyala Bio Oil

Titik nyala bio-oil cenderung menurun seiring kenaikan temperatur operasi, dari kisaran 35–38°C pada temperatur rendah menjadi 33,1°C pada 400°C dan 450°C. Hal ini disebabkan oleh terbentuknya lebih banyak fraksi hidrokarbon ringan yang bersifat lebih volatil pada temperatur pirolisis tinggi, sehingga bio-oil menjadi lebih mudah menguap dan menyala pada suhu yang lebih rendah.

Analisis Komposisi Senyawa (GC-MS)



Gambar 7. Grafik Hasil Analisa Gas Chromatography - Mass Spectrometry (GC-MS)

Analisis GC-MS terhadap bio-oil hasil pirolisis campuran plastik HDPE dan serbuk kayu pinus dengan katalis bentonit menunjukkan empat kelompok fraksi hidrokarbon berdasarkan jumlah atom karbon. Fraksi C6–C10 (setara bensin) mendominasi dengan 42,23%, diikuti fraksi C13–C25 (setara solar) sebesar 38,49%, fraksi C11–C12 (setara kerosin) sebesar 13,18%, dan fraksi C26+ (fraksi berat/pelumas) hanya 6,12%. Distribusi ini mengindikasikan bahwa proses pirolisis pada suhu optimum 450°C lebih dominan menghasilkan hidrokarbon rantai pendek hingga menengah dibandingkan rantai panjang.

Tingginya fraksi C6–C10 mencerminkan efektivitas proses cracking rantai polimer HDPE, yang didukung oleh struktur HDPE yang jenuh dan kaya hidrogen serta peran katalis bentonit dalam mempercepat pemutusan rantai karbon. Sementara itu, fraksi C11–C12 menunjukkan sebagian hasil dekomposisi HDPE dan lignoselulosa kayu pinus belum sepenuhnya terpecah menjadi hidrokarbon ringan. Fraksi C13–C25 yang cukup besar berasal dari kombinasi dekomposisi lignin biomassa dan hasil cracking HDPE, dan berkontribusi terhadap peningkatan nilai kalor bio-oil hingga 8.942 cal/g. Rendahnya fraksi C26+ menandakan suhu 450°C sudah cukup efektif memecah sebagian besar molekul hidrokarbon berat menjadi fraksi yang lebih ringan.

Distribusi fraksi hidrokarbon ini sejalan dengan sifat fisik bio-oil: densitas menurun dari 0,7970 g/mL (250°C) menjadi 0,7405 g/mL (450°C), nilai kalor meningkat dari 8.083 menjadi 8.942 cal/g, dan viskositas relatif rendah (3,53 mm²/s) yang menandakan bio-oil semakin encer dan mudah mengalir akibat proses cracking yang berjalan baik.

Secara keseluruhan, bio-oil hasil pirolisis ini didominasi oleh fraksi bensin dan solar, sehingga berpotensi sebagai bahan bakar alternatif, khususnya sebagai bahan baku fraksi bensin dan solar. Meski demikian, nilai kalor dan titik nyala bio-oil masih belum sepenuhnya memenuhi spesifikasi bahan bakar komersial, sehingga diperlukan proses upgrading lanjutan seperti distilasi fraksional, hydrotreating, atau catalytic upgrading agar sesuai standar bahan bakar nasional.

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian, dapat disimpulkan bahwa: pertama, kondisi operasi optimum diperoleh pada temperatur 450°C dengan yield bio-oil tertinggi sebesar 13,02%, yang menunjukkan bahwa peningkatan temperatur dari 250°C hingga 450°C meningkatkan konversi bahan baku menjadi produk cair akibat proses cracking yang berlangsung lebih sempurna. Kedua, temperatur pirolisis berpengaruh terhadap karakteristik bio-oil pada rasio campuran 2:1 plastik HDPE dan serbuk kayu pinus: densitas menurun dari 0,7970 g/ml menjadi 0,7405 g/ml, nilai kalor meningkat dari 8.083 cal/g menjadi 8.942 cal/g, viskositas berada pada rentang 3,01–6,77 cP, dan titik nyala pada rentang 33,1–38,2°C, dengan kualitas terbaik dicapai pada temperatur tinggi terutama dari aspek densitas dan nilai kalor. Ketiga, hasil GC-MS menunjukkan bio-oil didominasi oleh hidrokarbon fraksi bensin dan solar, mengindikasikan potensi campuran plastik HDPE dan serbuk kayu pinus sebagai bahan baku bahan bakar alternatif melalui proses pirolisis berkatalis bentonit, meskipun masih diperlukan tahap upgrading lanjutan agar sepenuhnya memenuhi standar bahan bakar komersial.

Reference

1. Bahng, M.-K., Mukarakate, C., Robichaud, D. J., & Nimlos, M. R. (2009). Current technologies for analysis of biomass thermochemical processing: A review. *Analytica Chimica Acta*, 651(2), 117–138. <https://doi.org/10.1016/j.aca.2009.08.016>
2. Effendy, S., Rusnadi, I., Amin, J. M., Aina, N., Rossa, B., & Waltin, M. (2021). Unjuk kerja proses pirolisis katalitik limbah ban bekas menjadi bahan bakar cair ditinjau dari jumlah katalis, variasi temperatur, dan waktu operasi. *Kinetika*, 12(1), 32–39.
3. Irvan, M. K. (2020). Viskositas bahan bakar cair hasil pirolisis.
4. Kurniawan, E., & Sari, I. (2019). Pirolisis kantong plastik bekas. *Jurnal Teknologi Kimia Unimal*, 1(1), 30–44.
5. Lestari, S. P., Aswan, A., Effendy, S., Febriana, I., Ramadhana S, S. E., Safitri, W., & Shaskia, B. A. (2020). Katalis zeolit dengan metode pirolisis: Liquid fuel production from beef tallow using the zeolite catalyst with pyrolysis method. *Jurnal Kinetika*, 11(2), 1–9.
6. Maafa, I. M. (2021). Pyrolysis of polystyrene waste: A review. *Polymers*.
7. Majid, M. N., Ismail, N. R., & Swandono, P. (2021). Pengaruh ukuran serbuk kayu jati dan suhu pemanasan terhadap volume dan nilai kalor tar pada proses pirolisis. *Jurnal Rekayasa Mesin*, 16(2), 1–6.
8. Marodiyah, I. (2023). Inovasi warga dalam mengelola sampah plastik. *Jurnal Pengabdian Masyarakat Universitas Muhammadiyah Sidoarjo*, 4(1), 39–43.
9. Mekanika, J. T. J., Mandala, W. W., Cahyono, M. S., & Sukarjo, H. B. (2021). Pengaruh suhu terhadap rendemen dan nilai kalor minyak hasil pirolisis sampah plastik. *Jurnal Mekanika Termal (JMST)*, 1(2), 49–52.
10. Mumawan, E., & Majedi, F. (2019). Karakteristik bio-oil hasil pirolisis limbah Brem. *Jurnal Teknik Mesin Otomotif*, 7(1), 23–28.
11. Naimah, S., Nuraeni, C., Rumondang, I., Nugroho, B., & Ermawati, R. (2022). Dekomposisi limbah plastik polypropylene dengan metode pirolisis. *Jurnal Riset Industri*, 13(3), 226–229.

12. Nazif, R., & Wicaksana, E. (2021). Pengaruh karbon aktif terhadap yield dan kualitas bahan bakar cair hasil pirolisis. *Jurnal Teknik Kimia USU*, 5(3), 49–55.
13. Rizal, W. A., Suryani, R., Wahono, S. K., Anwar, M., Amdani, R. Z., Suwanto, A., & Februanata, N. (2023). Pirolisis limbah biomassa serbuk gergaji kayu campuran: Parameter proses dan analisis produk asap cair. *Jurnal Riset Industri Hasil Hutan*, 14(2), 353–364.
14. Sahwan, F. L., Martono, D. H., & Wahyono, S. (2023). Sistem pengelolaan limbah plastik di Indonesia. *Jurnal Teknologi Lingkungan*, (1), 311–318.
15. Sinaga, S. V., Haryanto, A., & Triyono, S. (2020). Pengaruh suhu dan waktu reaksi pada pembuatan biodiesel dari minyak jelantah. *Jurnal Teknik Pertanian Lampung*, 3(1), 27–34.
16. Wahyudi Slamet, W. (2020). Pengaruh temperatur pemanasan terhadap karakteristik fisik minyak hasil pirolisis plastik HDPE.
17. Zalfa, D., Safitri, A., Wijayanto, D. S., & Saputra, T. W. (2023). Pirolisis biomassa limbah kayu mahoni dan plastik polypropylene. *Jurnal Teknik Kimia*, 12(1), 73–80.