

Studi Eksperimental Nilai Kalor, Viskositas, dan Densitas Bahan Bakar Cair dari hasil Pirolisis Plastik LDPE dan PP

Hendika Abidin¹, Althesa Androva², Muhamad Safi'i³, Hisyam Ma'mun⁴

^{1,2,3,4}Teknik Mesin, Fakultas Teknik dan Informatika, Universitas PGRI Semarang, Indonesia

Jl. Sidodadi Timur, Jalan Dokter Cipto No.24, Karang Tempel, Semarang Timur, Kota Semarang, Central Java 50232.

Email: ¹hendikaabidin@gmail.com, ²androthesa@gmail.com, ³muhamadsafii@upgris.ac.id, ⁴hisyam@upgris.ac.id

Email Penulis Korespondensi: ¹muhamadsafii@upgris.ac.id

Info Artikel	Abstrak
Kata Kunci: Pirolisis LDPE PP Nilai Kalor Sifat Fisik dan Termal	Limbah plastik sulit terurai sehingga diperlukan teknologi pengolahan yang efektif, salah satunya melalui pirolisis untuk menghasilkan bahan bakar cair sebagai alternatif pemanfaatan limbah plastik. Penelitian ini bertujuan menganalisis dan membandingkan karakteristik bahan bakar cair hasil pirolisis plastik LDPE dan PP berdasarkan nilai kalor, densitas, dan viskositas sebagai parameter utama, serta panas spesifik dan konduktivitas termal sebagai parameter pendukung. Penelitian menggunakan reaktor <i>batch</i> berkapasitas 1 kg tanpa katalis dengan masing-masing 500 g LDPE dan PP serta pemanas LPG. Pirolisis dilakukan pada temperatur operasi 300 °C selama 150 menit setelah temperatur mencapai <i>set-point</i>, dengan tekanan operasi 0,3–0,4 Bar gauge. Hasil pengamatan kamera termal menunjukkan peningkatan temperatur permukaan reaktor dari 119,9 °C, 204,2 °C hingga 300,9 °C. Bahan bakar cair LDPE menghasilkan nilai kalor 38,62 MJ/kg, densitas 0,7167 g/ml, viskositas 0,90 mm²/s, panas spesifik 8,200 kJ/kg·K, dan konduktivitas termal 2,558 W/m·K, sedangkan bahan bakar cair PP menghasilkan nilai kalor 40,62 MJ/kg, densitas 0,7333 g/ml, viskositas 0,91 mm²/s, panas spesifik 9,220 kJ/kg·K, dan konduktivitas termal 2,875 W/m·K. Hasil perbandingan menunjukkan bahwa bahan bakar cair PP memiliki nilai kalor, densitas, viskositas, panas spesifik, dan konduktivitas termal yang lebih tinggi dibandingkan bahan bakar cair LDPE pada kondisi operasi yang sama. Hasil penelitian memberikan informasi mengenai perbedaan karakteristik fisik dan termal bshan bakar cair hasil pirolisis LDPE dan PP serta dapat menjadi data awal dalam pengembangan pemanfaatan limbah plastik sebagai bahan bakar alternatif.
	Abstract
Keywords: Pyrolysis LDPE PP Calorific Value Physical Thermal	Plastic waste is difficult to decompose, necessitating effective waste treatment technologies, one of which is pyrolysis to produce liquid fuel as an alternative approach for utilizing plastic waste. This study aimed to analyze and compare the characteristics of liquid fuel produced from the pyrolysis of LDPE and PP plastics based on calorific value, density, and viscosity as the main parameters, with specific heat and thermal conductivity as supporting parameters. The study employed a 1 kg-capacity batch reactor without a catalyst, using 500 g of LDPE and 500 g of PP separately, with LPG as the heating source. Pyrolysis was conducted at an operating temperature of 300 °C for 150 minutes after reaching the set point, with an operating pressure of 0.3–0.4 bar gauge. Thermal camera observations showed an increase in the reactor surface temperature from 119.9 °C to 204.2 °C and 300.9 °C. The LDPE-derived liquid fuel exhibited a calorific value of 38.62 MJ/kg, density of 0.7167 g/ml, viscosity of 0.90 mm²/s, specific heat of 8.200 kJ/kg·K, and thermal conductivity of 2.558 W/m·K, whereas the PP-derived liquid fuel exhibited a calorific value of 40.62 MJ/kg, density of 0.7333 g/ml, viscosity of 0.91 mm²/s, specific heat of 9.220 kJ/kg·K, and thermal conductivity of 2.875 W/m·K. The comparison results showed that the PP-derived liquid fuel had higher calorific value, density, viscosity, specific heat, and thermal conductivity than the LDPE-derived liquid fuel under the same operating conditions. These findings provide information on the differences in the physical and thermal characteristics of liquid fuels produced from LDPE and PP pyrolysis and may serve as preliminary data for developing plastic waste utilization as an alternative fuel.

JuKSIT is licensed under a Creative Commons Attribution-Share Alike 4.0 International License



1. PENDAHULUAN

Jumlah sampah plastik terus meningkat karena meningkatnya penggunaan plastik. Sampah plastik dapat mencemari lingkungan karena sulit terurai secara alami, oleh karena itu diperlukan teknik pengolahan yang efisien untuk mengurangi dampaknya [1]. Salah satu teknologi yang dapat diterapkan adalah pirolisis, yaitu dekomposisi termal material dalam lingkungan tanpa oksigen untuk menghasilkan gas, arang, dan minyak pirolisis, yang dapat digunakan sebagai pengganti bahan bakar cair [2], [3]. Karena dapat menghasilkan minyak dalam jumlah yang relatif besar, jenis plastik polietilen densitas rendah (LDPE) dan polipropilen (PP) memiliki potensi besar sebagai bahan baku untuk memproduksi bahan bakar cair melalui proses pirolisis [4]. Perbedaan sifat minyak pirolisis, seperti densitas, viskositas, dan komposisi hidrokarbon, disebabkan oleh perbedaan struktur kimia LDPE dan PP. Parameter fisik dan energi minyak pirolisis, seperti densitas, viskositas, dan nilai kalornya, dapat digunakan untuk menilai kualitasnya sebagai bahan bakar alternatif [5], [6], [7]. Oleh karena itu, nilai kalor, densitas, dan viskositas dapat digunakan sebagai parameter utama untuk mengevaluasi karakteristik bahan bakar cair hasil pirolisis [8].

Karakteristik minyak pirolisis dipengaruhi oleh berbagai faktor proses, terutama jenis plastik, temperatur, katalis, komposisi bahan baku, waktu tinggal, dan kondisi operasi, [9], [10], [11]. Penggunaan katalis merupakan salah satu pendekatan yang banyak diterapkan untuk meningkatkan konversi dan mengarahkan distribusi produk. Sebagai contoh, *catalytic thermal cracking* LDPE dan PP menggunakan katalis FCC pada temperatur 400 °C menghasilkan *yield* minyak masing-masing sebesar 23,09 wt.% dan 30,29 wt.% serta menghasilkan karakteristik *fuel* yang lebih mendekati bahan bakar komersial [12]. Penelitian lain juga membandingkan *thermal pyrolysis* dan *catalytic pyrolysis* LDPE dan PP dengan parameter nilai kalor, viskositas, dan densitas [13]. Pendekatan katalitik tersebut menunjukkan bahwa keberadaan katalis dapat menjadi faktor penting dalam karakteristik produk, tetapi hasilnya tidak dapat secara langsung digunakan untuk menggambarkan karakteristik minyak yang diperoleh melalui pirolisis tanpa katalis. Dengan demikian, penelitian tanpa katalis tetap diperlukan untuk memperoleh informasi karakteristik produk yang dihasilkan berdasarkan jenis plastik pada kondisi proses yang terkontrol. Selain katalis, temperatur merupakan faktor penting dalam menentukan pembentukan dan karakteristik produk pirolisis. Penelitian terhadap LDPE pada 350 °C menghasilkan minyak dengan densitas 0,730–0,750 g/mL dan dominasi hidrokarbon C7–C12, sedangkan minyak hasil pirolisis PP dilaporkan memiliki densitas 0,7941–0,8083 g/mL dan viskositas 1,332 mm²/s [14], [15]. Pada temperatur sekitar 500 °C, LDPE dan PP dilaporkan dapat menghasilkan *yield* minyak masing-masing sekitar 80–88 wt.% dan 69–89 wt.% [16]. Penelitian pada rentang 525–650 °C menunjukkan kondisi optimum sekitar 550–575 °C untuk menghasilkan minyak dengan karakteristik yang lebih sesuai sebagai bahan bakar alternatif [17]. Sebaliknya, penelitian pada rentang 250–350 °C terhadap PP menunjukkan *yield* minyak tertinggi sebesar 68 wt.% pada 350 °C selama 30 menit [18].

Hasil tersebut menunjukkan bahwa temperatur sangat terdapat perbedaan karakteristik bahan bakar cair hasil pirolisis LDPE dan PP berdasarkan parameter yang diuji, sehingga perbedaan temperatur antarpencapaian termasuk di antara elemen-elemen yang dapat berkontribusi pada variasi hasil karakterisasi. Perbedaan jenis plastik juga menunjukkan kecenderungan terhadap perbedaan karakteristik produk. Perbandingan LDPE dan PP pada reaktor skala laboratorium menunjukkan bahwa PP menghasilkan rendemen 79,57 wt.%, lebih tinggi dibandingkan LDPE sebesar 74,06 wt.% [19]. Penelitian lain secara langsung melaporkan nilai kalor LDPE sebesar 39,5 MJ/kg, densitas 0,79 g/mL, dan viskositas 5,56 mm²/s, sedangkan PP menghasilkan nilai kalor 40,8 MJ/kg, densitas 0,85 g/mL, dan viskositas 5,02 mm²/s [20]. Namun, penelitian tersebut dilakukan pada kondisi proses tertentu yang berbeda dengan penelitian lain, sehingga perbedaan nilai karakteristik tidak dapat sepenuhnya dipisahkan antara pengaruh jenis plastik dan pengaruh kondisi operasi. Penelitian mengenai *co-pyrolysis* LDPE dan PP juga menunjukkan nilai kalor 44,18–48,68 MJ/kg, densitas 0,784–0,815 g/mL, dan viskositas 1,31–1,80 mm²/s pada rasio campuran 2:3 [21]. Hasil tersebut menunjukkan bahwa komposisi bahan baku juga dapat mengubah karakteristik produk, sehingga hasil *co-pyrolysis* tidak dapat disamakan secara langsung dengan hasil pirolisis masing-masing jenis plastik secara terpisah. Studi tanpa katalis memberikan konteks yang lebih dekat dengan penelitian ini, tetapi masih menunjukkan variasi kondisi dan fokus karakterisasi. Pirolisis campuran LDPE, HDPE, PP, dan PS tanpa katalis menghasilkan *yield* minyak 60–85 wt.% dengan nilai kalor 41–46 MJ/kg [22]. Pada limbah plastik rumah tangga tanpa katalis, LDPE menghasilkan *yield* minyak 83,4 wt.% pada 400 °C, sedangkan minyak PP memiliki densitas 0,7708 g/mL, viskositas 1,26 mm²/s, dan nilai kalor 35,09 MJ/kg [23]. Penelitian lain mengembangkan mesin pirolisis untuk PP dan LDPE dan memperoleh rendemen masing-masing 16,07 wt.% dan 13,33 wt.%, tetapi belum mengkaji nilai kalor, viskositas, dan densitas minyak secara bersamaan [24]. Sementara itu, penelitian pada HDPE dan LDPE pada 300–700 °C menunjukkan bahwa *yield* cair tertinggi diperoleh pada 300 °C, masing-masing sebesar 88,54 wt.% untuk HDPE dan 78,39 wt.% untuk LDPE [25]. Temuan-temuan tersebut memperlihatkan bahwa penelitian tanpa katalis telah dilakukan, tetapi fokusnya masih beragam, mulai dari *yield*, distribusi produk, hingga karakteristik bahan bakar tertentu.

Berdasarkan penelitian terdahulu, perbandingan karakteristik LDPE dan PP memang telah dilakukan [19], [20], tetapi hasil yang diperoleh berasal dari kondisi operasi, temperatur, komposisi bahan baku, atau konfigurasi proses yang berbeda. Penelitian pada temperatur rendah hingga menengah menunjukkan bahwa 300–350 °C juga dapat menghasilkan

produk cair dari LDPE dan PP [14], [23], [25], [18], sedangkan sebagian penelitian lain menggunakan temperatur sekitar 400–650 °C dan/atau katalis [12], [16], [17], [13]. Perbedaan temperatur, penggunaan katalis, dan kondisi proses tersebut menyebabkan hasil karakteristik minyak antarpelelitian tidak dapat dibandingkan secara langsung untuk mengidentifikasi perbedaan yang berkaitan dengan jenis plastik. Selain itu, sebagian penelitian lebih berfokus pada *yield* dan distribusi produk [19], [16], [22], [26], [24], [18], sementara penelitian lain mengevaluasi nilai kalor, densitas, dan viskositas [8], [20], [21], [23]. Informasi mengenai panas spesifik dan konduktivitas termal bahan bakar cair hasil pirolisis masih belum banyak dilaporkan dalam studi yang menjadi pembanding, sedangkan pengamatan temperatur permukaan reaktor menggunakan kamera termal dapat memberikan informasi tambahan mengenai kondisi termal selama proses.

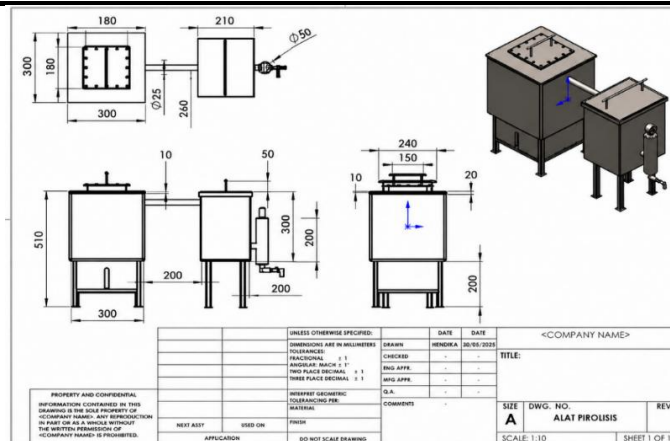
Dengan mempertimbangkan keadaan tersebut, pernyataan bahwa perbandingan LDPE dan PP merupakan ide yang sepenuhnya baru bukanlah suatu celah penelitian dalam karya ini, melainkan pada keterbatasan data empiris yang diperoleh dari kedua jenis plastik secara terpisah pada kondisi operasi yang dikendalikan sama, khususnya pada temperatur 300 °C tanpa katalis. Penelitian ini menggunakan kondisi operasi yang sama untuk LDPE dan PP, yaitu massa bahan baku masing-masing 500 g, temperatur operasi 300 °C, waktu proses 150 menit setelah temperatur mencapai *set-point*, serta tekanan operasi 0,3–0,4 bar gauge. Nilai kalor, densitas, dan viskositas digunakan sebagai parameter utama untuk membandingkan karakteristik bahan bakar cair, sedangkan panas spesifik dan konduktivitas termal digunakan sebagai parameter pendukung. Temperatur permukaan reaktor juga diamati menggunakan kamera termal untuk memberikan informasi tambahan mengenai kondisi termal selama proses.

Dengan demikian, kontribusi penelitian ini bersifat empiris dan kontekstual, yaitu menyediakan dataset eksperimental mengenai perbedaan karakteristik bahan bakar cair yang dihasilkan dari pirolisis LDPE dan PP tidak menggunakan katalis pada kondisi operasi 300 °C yang dikendalikan sama. Dataset eksperimental tersebut mencakup nilai kalor, densitas, viskositas, panas spesifik, dan konduktivitas termal serta informasi temperatur permukaan reaktor. Pendekatan ini memungkinkan karakteristik kedua jenis bahan bakar cair dibandingkan dengan meminimalkan variasi yang berasal dari temperatur, massa bahan baku, dan kondisi operasi. Penelitian ini bertujuan menganalisis dan membandingkan karakteristik bahan bakar cair hasil pirolisis LDPE dan PP berdasarkan nilai kalor, densitas, dan viskositas sebagai parameter utama, serta panas spesifik dan konduktivitas termal sebagai parameter pendukung. Keterbatasan penelitian ini adalah penggunaan satu kondisi temperatur dan tekanan operasi, sehingga pengaruh variasi kondisi operasi terhadap karakteristik bahan bakar cair belum dapat dievaluasi. Diharapkan bahwa temuan studi ini akan memberikan data empiris yang dapat dibandingkan untuk investigasi di masa mendatang mengenai penggunaan limbah plastik sebagai bahan bakar alternatif menggunakan teknologi pirolisis.

2. METODOLOGI PENELITIAN

2.1. Model Fisik

Reaktor dan kondensor adalah dua komponen utama dari model fisik perangkat pirolisis yang dihubungkan menggunakan pipa penyalur uap. Rancangan alat dibuat menggunakan *SolidWorks* dan terdiri atas tampak atas, tampak depan, tampak samping, serta gambar isometrik. Reaktor berfungsi sebagai tempat pemanasan dan penguraian termal plastik, sedangkan kondensor digunakan untuk mendinginkan uap hasil pirolisis hingga terbentuk bahan bakar cair. Berdasarkan gambar rancangan, reaktor memiliki ukuran utama 300 × 300 mm dengan bukaan bagian dalam sebesar 180 × 180 mm. Tinggi keseluruhan reaktor hingga bagian kaki penyangga sekitar 510 mm, sedangkan tinggi badan reaktor sekitar 300 mm. Reaktor dilengkapi penutup pada bagian atas untuk menjaga ruang pemanasan tetap tertutup selama proses berlangsung. Pada bagian samping reaktor terdapat saluran keluaran uap dengan diameter sekitar Ø25 mm yang berfungsi mengalirkan uap hasil pirolisis menuju kondensor. Unit kondensor ditempatkan terpisah dari reaktor dengan jarak sekitar 200 mm dan dihubungkan melalui saluran uap. Berdasarkan gambar 1. Kondensor memiliki lebar sekitar 260 x 210 mm, sedangkan bagian tutup reaktor memiliki ukuran 180 x 180 mm. Kondensor juga dilengkapi kaki penyangga untuk menjaga kestabilan alat selama pengoperasian. Pada bagian kondensor terdapat saluran keluaran yang digunakan untuk mengalirkan hasil kondensasi berupa bahan bakar cair.



Gambar 1. Desain Pirolisis.

2.2. Material

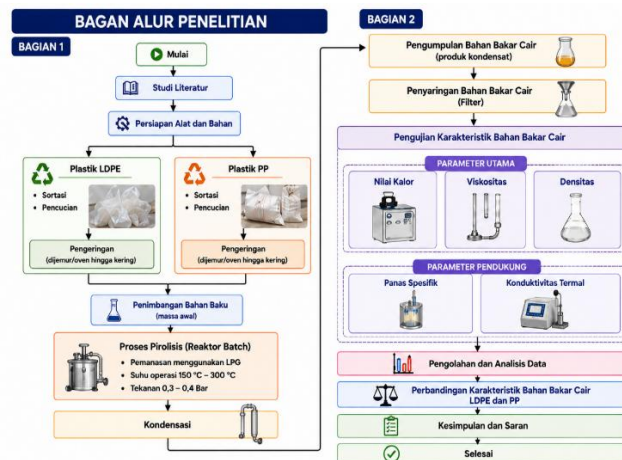
Penelitian ini menggunakan reaktor pirolisis tipe *batch* berkapasitas 1 kg yang dibuat menggunakan plat besi dan ketebalan mencapai 2 mm. Sifat termofisik material reaktor yang digunakan sebagai acuan dalam analisis meliputi densitas sebesar $7,87 \text{ g/cm}^3$, panas spesifik sebesar $0,486 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$, dan konduktivitas termal sebesar $43,1 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ [27]. Pada gambar 2. Bahan baku yang digunakan terdiri atas dua jenis limbah plastik, yaitu *Low-Density Polyethylene* (LDPE) yang berasal dari kantong plastik dan plastik kemasan serta *Polypropylene* (PP) yang berasal dari karung anyaman. LDPE memiliki densitas sekitar $0,921 \text{ g/ml}$, kapasitas panas spesifik $0,209 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$, dan konduktivitas termal $0,37 \text{ W/m} \cdot \text{K}$. Sementara itu, PP memiliki densitas $0,903 \text{ g/cm}^3$, konduktivitas termal sekitar $0,22 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ dan kapasitas panas spesifik sekitar $0,167 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$ pada temperatur ruang [28]. Kedua jenis plastik dipilih karena memiliki kandungan hidrokarbon yang tinggi dan banyak ditemukan dalam limbah domestik. Sebelum proses pirolisis, plastik dipilah, dibersihkan dari kotoran, dikeringkan, sesuai kebutuhan. Penelitian menggunakan dua variasi bahan baku, yaitu LDPE dan PP, dengan kondisi operasi yang dikendalikan meliputi jenis reaktor, sistem pemanasan, sistem kondensasi, dan prosedur pengujian. Menghasilkan bahan bakar cair yang selanjutnya dikarakterisasi melalui nilai kalor, densitas, dan viskositas sebagai parameter utama, sedangkan panas spesifik dan konduktivitas termal digunakan sebagai parameter pendukung dalam analisis karakteristik termal.



Gambar 2. Plastik PP dan LPDE

2.3. Prosedur Penelitian

Persiapan instrumen dan bahan merupakan langkah pertama dalam proses penelitian multi-tahap, proses pirolisis plastik LDPE dan PP, pengumpulan bahan bakar cair, hingga pengujian karakteristik yang meliputi nilai kalor, viskositas, dan densitas sebagai parameter utama, yang didukung oleh karakterisasi termal melalui pengamatan distribusi temperatur pada permukaan reaktor serta analisis panas spesifik dan konduktivitas termal sebagai parameter pendukung. Tahapan penelitian secara keseluruhan ditunjukkan pada gambar 3.



Gambar 3. Bagan Alur Penelitian

Pirolisis LDPE dan PP pada suhu 150–300 °C, pengumpulan dan penyaringan bahan bakar cair, serta persiapan instrumen dan material semuanya digambarkan dalam diagram alir penelitian. Bahan bakar tersebut kemudian diperiksa untuk panas spesifik dan konduktivitas termal sebagai karakteristik tambahan di samping kriteria utama densitas, viskositas, dan nilai kalor. Untuk memastikan dampak jenis plastik LDPE dan PP terhadap sifat bahan bakar cair yang dihasilkan melalui pirolisis, data yang dikumpulkan diperiksa dan dibandingkan.

2.4. Skema Eksperimen

Gambar 4 menunjukkan rangkaian pirolisis plastik LDPE dan PP secara pirolisis termal diproses tanpa menggunakan katalis. Bahan baku plastik dimasukkan dalam kondisi utuh (tidak dicacah) ke dalam reaktor pirolisis, kemudian reaktor ditutup rapat menggunakan tutup reaktor untuk mencegah masuknya oksigen selama proses berlangsung. Reaktor dipanaskan pada ruang pembakaran secara bertahap hingga mencapai temperatur operasi (set-point) 300 °C. Waktu proses ditetapkan selama 150 menit setelah temperatur reaktor mencapai set-point 300 °C. Nilai tekanan operasi pengukur tekanan berada antara 0,3 dan 0,4 bar. Material tersebut mengalami penguraian termal saat dipanaskan, melepaskan gas atau uap hidrokarbon. Setelah pirolisis, uap tersebut mengalir ke kondensor melalui pipa pasokan uap/gas. Pada kondensor, uap hidrokarbon didinginkan menggunakan media pendingin sehingga sebagian uap mengalami kondensasi menjadi bahan bakar cair. Cairan hasil kondensasi selanjutnya ditampung pada tangki penyimpanan, dialirkan melalui kran output dan disimpan sebagai minyak pirolisis untuk dilakukan pengujian karakteristik. Sementara itu, gas yang tidak mengalami kondensasi keluar melalui saluran gas.

Dengan demikian, ketiga pengulangan pada masing-masing jenis plastik bersifat identik dan digunakan untuk meningkatkan keterulangan serta keandalan hasil pengukuran. Waktu tinggal ditetapkan selama 150 menit, dihitung sejak temperatur reaktor mencapai 300 °C hingga proses dihentikan. Setelah waktu proses tercapai, suplai pemanasan dihentikan dan reaktor dibiarkan mengalami pendinginan sebelum dibuka. Laju pemanasan dilakukan secara bertahap hingga mencapai temperatur set-point 300 °C. Berdasarkan skema eksperimen tersebut, selama proses berlangsung, pressure gauge digunakan untuk memantau tekanan pada tangki penampungan sehingga kondisi operasi dapat diamati dan dikendalikan. Suhu reaktor, suhu kondensor, waktu pirolisis, volume atau massa bahan bakar cair yang dihasilkan, dan sifat-sifat bahan bakar seperti densitas, viskositas, dan nilai kalor merupakan parameter utama yang diamati, dengan panas spesifik dan konduktivitas termal sebagai parameter pendukung. Informasi tersebut digunakan untuk membandingkan kualitas bahan bakar cair yang dihasilkan dari pirolisis plastik LDPE dan PP dan untuk memastikan bagaimana jenis plastik memengaruhi sifat-sifat bahan bakar

parameter utama, serta panas spesifik dan konduktivitas termal sebagai parameter pendukung. Nilai kalor diukur menggunakan *Joule Calorimeter*, viskositas menggunakan *Ostwald viscometer*, dan densitas ditentukan menggunakan gelas ukur dan timbangan digital berdasarkan perbandingan massa dan volume. Setiap pengujian dilakukan sebanyak tiga kali pengulangan, kemudian dirata-ratakan. Data yang diperoleh selanjutnya dibandingkan antara bahan bakar cair hasil pirolisis LDPE dan PP untuk mengetahui perbedaan karakteristiknya.

Menyajikan data hasil pengujian dalam bentuk nilai rata-rata (mean) $\pm$ simpangan baku (standard deviation/SD) sebagai statistik deskriptif untuk menunjukkan nilai tengah dan variasi hasil pengulangan. Nilai SD sebesar 0,00 menunjukkan tidak adanya variasi antar hasil pengulangan pada resolusi pengukuran yang digunakan, bukan berarti ketidakpastian alat ukur bernilai nol. Analisis statistik inferensial tidak dilakukan karena penelitian ini berfokus pada perbandingan deskriptif karakteristik bahan bakar cair LDPE dan PP pada satu kondisi operasi utama dengan tiga pengulangan eksperimen independen. Oleh karena itu, perbedaan nilai yang diperoleh digunakan untuk menggambarkan kecenderungan hasil pengujian dan tidak digunakan untuk menyatakan adanya perbedaan yang signifikan secara statistik.



Gambar 5 (a). Kamera Termal (b). Joule Calorimeter, (c). Gelas Ukur, (d). Viskometer Ostwald

Temperatur reaktor diukur menggunakan termokopel tipe K Model TM-902C dengan rentang pengukuran (–50)–1300 °C dan resolusi 0,1 °C. Tekanan operasi dipantau menggunakan *pressure gauge* dengan rentang pengukuran 0–6 bar (0–80 psi) dan skala terkecil 0,1 bar. Temperatur permukaan reaktor diamati menggunakan kamera termal HTI HT-175 dengan resolusi 32 × 32 piksel, rentang pengukuran (–20)–300 °C, dan akurasi ± 2 °C atau $\pm 2\%$ pembacaan. Massa bahan baku dan sampel diukur menggunakan timbangan digital berkapasitas maksimum 10.000 g dengan resolusi 1 g, sedangkan volume bahan bakar cair ditentukan menggunakan gelas ukur berkapasitas 100 ml dengan skala terkecil 1 ml. Nilai kalor diukur menggunakan *Joule Calorimeter*, sedangkan viskositas diukur menggunakan *Ostwald viscometer* dan densitas ditentukan berdasarkan perbandingan massa dan volume. Pengujian viskositas dan densitas dilakukan pada suhu ruang. Panas spesifik ditentukan berdasarkan prinsip kalorimetri dengan menghitung energi panas yang diberikan, massa sampel, dan perubahan temperatur, sedangkan konduktivitas termal dihitung menggunakan persamaan yang telah ditetapkan. Sebelum pengujian, instrumen diperiksa untuk memastikan kondisi dan pembacaan alat berfungsi dengan baik. Verifikasi timbangan dilakukan menggunakan massa acuan, sedangkan konstanta Ostwald viscometer ditentukan menggunakan air sebagai cairan pembanding pada suhu ruang. Termokopel, *pressure gauge*, kamera termal, dan instrumen lainnya digunakan sesuai spesifikasi dan prosedur pengoperasian masing-masing alat.

2.6. Reduksi Data

Panas, viskositas, dan densitas merupakan faktor utama yang digunakan dalam analisis kuantitatif data penelitian; panas spesifik dan konduktivitas termal berfungsi sebagai parameter pendukung. Sifat-sifat bahan bakar cair yang terbuat dari polimer LDPE dan PP kemudian dibandingkan dengan menghitung bahan bakar cair yang dihasilkan dari pirolisis untuk setiap parameter.

a. Nilai Kalor

Jumlah energi yang dihasilkan selama pembakaran bahan bakar ditunjukkan oleh nilai kalornya. Nilai kalor yang lebih tinggi menunjukkan potensi energi yang lebih tinggi. Parameter ini digunakan untuk menghitung potensi energi bahan bakar cair yang dihasilkan dari pirolisis LDPE dan PP. Dengan mengacu pada prinsip [29]

$$NC = \frac{C_{sistem}(T_2 - T_1)}{m_{fuel}} \quad (1)$$

Nilai kalor yang diperoleh digunakan sebagai dasar untuk membandingkan kandungan energi bahan bakar cair hasil pirolisis plastik LDPE dan PP.

b. Nilai Viskositas

Nilai viskositas bahan bakar cair ditentukan melalui pengujian menggunakan viskometer Ostwald. Pengukuran dilakukan berdasarkan waktu yang diperlukan sampel untuk mengalir melewati pipa viskometer Ostwald yang telah dikalibrasi di bawah pengaruh gaya gravitasi. Apabila menggunakan viskometer digital, nilai viskositas ditampilkan langsung oleh alat sehingga tidak memerlukan perhitungan manual. Persamaan viskositas kinematik [30]

$$\nu = C \times t \quad (2)$$

c. Nilai Densitas

Densitas merupakan perbandingan antara massa dan volume bahan bakar cair yang dihasilkan.

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (3)$$

d. Panas Spesifik

Panas spesifik merupakan salah satu parameter yang digunakan untuk mengetahui kemampuan suatu bahan dalam menyerap energi panas. Pengujian panas spesifik pada bahan bakar cair hasil pirolisis dilakukan untuk mengetahui karakteristik termal dari masing-masing jenis plastik yang digunakan. Dituliskan rumus dibawah ini berdasarkan [31].

$$Cp = \frac{Q}{m\Delta T} \quad (4)$$

e. Konduktivitas Termal

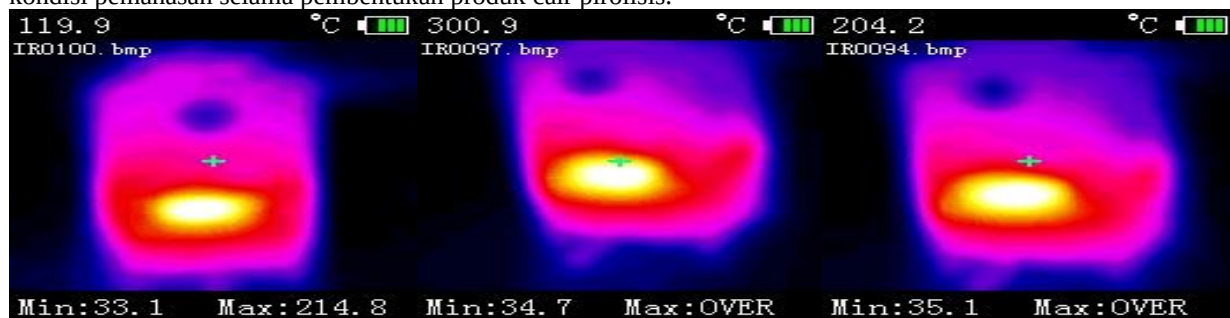
Konduktivitas termal dilakukan untuk mengolah hasil pengukuran temperatur dan parameter pengujian menjadi nilai konduktivitas termal setiap sampel. Hasil reduksi data selanjutnya digunakan untuk membandingkan kemampuan penghantaran panas bahan bakar hasil pirolisis LDPE dan PP. Berdasarkan persamaan [32].

$$k = \frac{Q \text{ fuel } L}{A\Delta Tt} \quad (5)$$

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Karakteristik Termal Reaktor

Pengamatan temperatur permukaan reaktor dengan kamera thermal digunakan untuk mengetahui distribusi panas selama pirolisis. Peningkatan temperatur menunjukkan perpindahan panas dari sumber pemanas ke dinding reaktor dan bahan baku plastik, sehingga LDPE dan PP terdekomposisi termal menjadi uap hidrokarbon. Uap ini kemudian dikondensasi menjadi bahan bakar cair. Data temperatur thermal ini menjadi informasi pendukung untuk menjelaskan kondisi pemanasan selama pembentukan produk cair pirolisis.



Gambar 6 (a). Pengamatan pertama.

(b). Pengamatan kedua.

(c). Pengamatan ketiga.

Hasil pengukuran pada gambar 6 a. Menggunakan kamera termal pada pengamatan pertama menunjukkan bahwa distribusi temperatur pada permukaan tangki reaktor belum merata. Pada citra termal, temperatur titik pengamatan tercatat sebesar 119,9 °C dengan temperatur minimum 33,1 °C dan maksimum 214,8 °C. Area dengan temperatur tertinggi terlihat pada bagian bawah hingga tengah reaktor yang ditunjukkan oleh warna kuning hingga putih, sedangkan bagian atas reaktor memiliki temperatur yang lebih rendah dengan dominasi warna biru hingga ungu. Perbedaan temperatur tersebut menunjukkan adanya perubahan temperatur pada dinding reaktor akibat distribusi panas dari sumber pemanasan. Kondisi

termal ini penting diperhatikan karena distribusi panas pada reaktor berpengaruh terhadap proses pemanasan dan pembentukan produk cair selama proses pirolisis.

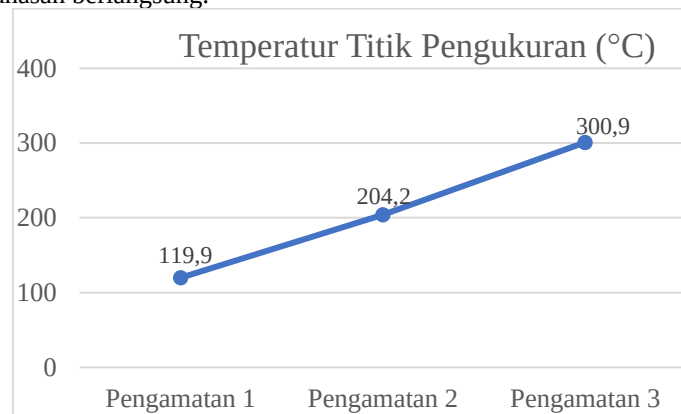
Hasil pengamatan pada gambar b. Menggunakan kamera termal pada pengamatan kedua menunjukkan bahwa temperatur permukaan tangki reaktor pada titik pengukuran mencapai 204,2 °C, dengan temperatur minimum sebesar 35,1 °C. Nilai temperatur maksimum tercatat > 300°C karena melebihi rentang pengukuran kamera. Distribusi temperatur menunjukkan bahwa area bawah hingga tengah reaktor memiliki temperatur paling tinggi yang ditandai dengan warna kuning hingga putih, sedangkan bagian atas reaktor memiliki temperatur relatif lebih rendah dengan warna ungu hingga biru. Kondisi tersebut menunjukkan adanya gradien temperatur pada permukaan tangki akibat distribusi panas dari sumber pemanasan. Peningkatan temperatur pada area pemanasan menunjukkan bahwa panas telah ditransfer melalui dinding reaktor dan menghasilkan distribusi temperatur yang tidak seragam pada permukaan tangki.

Berdasarkan hasil pengamatan pada gambar c. Menggunakan kamera termal pada pengamatan ketiga, temperatur pada titik pengukuran permukaan tangki reaktor mencapai 300,9 °C dengan temperatur minimum sebesar 34,7 °C. Temperatur maksimum pada bidang pengamatan menunjukkan >300°C, yang mengindikasikan bahwa sebagian area permukaan memiliki temperatur yang melebihi batas pengukuran kamera. Distribusi temperatur memperlihatkan konsentrasi panas pada bagian tengah hingga bawah reaktor yang ditandai dengan warna kuning hingga putih, sedangkan bagian atas memiliki temperatur relatif lebih rendah dengan warna ungu hingga biru. Peningkatan temperatur dibandingkan pengamatan sebelumnya menunjukkan proses pemanasan yang berlangsung secara bertahap. Perbedaan temperatur antara bagian bawah, tengah, dan atas menunjukkan adanya gradien temperatur pada dinding reaktor akibat distribusi panas dari sumber pemanasan yang belum sepenuhnya merata.

Tabel 2. Pengamatan kamera termal.

Tahap Pengamatan	Waktu (menit)	Suhu Titik Pengukuran (°C)	Temperatur Minimal (°C)	Temperatur Maksimal (°C)
Pengamatan 1	5	119,9	33,1	214,8
Pengamatan 2	15	204,2	35,1	>300
Pengamatan 3	30	300,9	34,7	>300

Berdasarkan tabel 2. Menunjukkan hasil pengamatan kamera termal pada permukaan reaktor selama tiga tahap pengamatan menit ke 5, ke 15, dan ke 30. Suhu titik pengukuran meningkat secara konsisten dari 119,9 °C pada menit ke 5, menjadi 204,2 °C pada menit ke 15, dan mencapai 300,9 °C pada menit ke 30. Temperatur minimum relatif stabil di kisaran 33,1–35,1 °C, sedangkan temperatur maksimum melonjak hingga melebihi 300 °C pada pengamatan kedua dan ketiga. Hal ini menunjukkan adanya gradien temperatur pada permukaan reaktor akibat distribusi panas yang belum merata selama proses pemanasan berlangsung.



Gambar 7. Perubahan temperatur titik pengukuran pada permukaan reaktor.

Berdasarkan gambar 7. Grafik di atas menunjukkan hubungan antara temperatur titik pengukuran dengan waktu pengamatan, di mana Pengamatan 1, 2, dan 3 masing-masing mewakili waktu 5, 15, dan 30 menit. Terlihat bahwa temperatur titik pengukuran meningkat seiring bertambahnya waktu pemanasan, yaitu dari 119,9 °C pada menit ke 5, meningkat menjadi 204,2 °C pada menit ke 15, dan mencapai 300,9 °C pada menit ke 30. Kenaikan yang cenderung stabil ini mengindikasikan bahwa proses pemanasan pada reaktor berlangsung secara bertahap dan konsisten, tanpa lonjakan atau penurunan suhu yang signifikan, sehingga menunjukkan efektivitas distribusi panas pada permukaan reaktor selama proses pirolisis berlangsung.

3.2 Karakteristik Produk bahan bakar Cair Hasil Pirolisis PP dan LDPE

Produk kondensasi uap hidrokarbon yang terbentuk selama dekomposisi termal polimer PP dan LDPE adalah bahan bakar cair yang dihasilkan melalui pirolisis. Sifat produk cair akhir dapat dipengaruhi oleh variasi struktur kimia dari kedua jenis polimer tersebut. Tiga faktor utama digunakan dalam penelitian ini untuk menguji sifat bahan bakar cair: densitas, viskositas, dan nilai kalor. Setiap jenis bahan bakar cair diuji tiga kali, dan nilai karakteristik untuk PP dan LDPE dihitung dengan merata-ratakan hasil pengujian.



Gambar 8. Bahan bakar cair LDPE dan PP.

Tabel 3. Karakteristik bahan bakar cair.

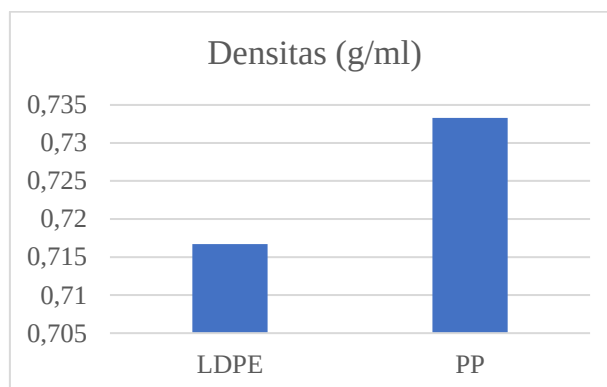
Jenis Plastik	Densitas (g/ml)	Viskositas (mm ² /s)	Kalor (MJ/kg)
LDPE	0,7167	0,90	38,62
PP	0,7333	0,91	40,62

a. Nilai Densitas Hasil Pirolisis LDPE dan PP

Berdasarkan tabel 4. Hasil pengukuran densitas bahan bakar cair hasil pirolisis LDPE pada tiga pengulangan masing-masing sebesar 0,7167 g/ml, dengan rata-rata $0,7167 \pm 0,0000$ g/ml. Sementara itu, densitas PP masing-masing sebesar 0,7333 g/ml, dengan rata-rata $0,7333 \pm 0,0000$ g/ml. Dengan demikian, densitas PP lebih tinggi 0,0166 g/ml dibandingkan LDPE. Nilai SD 0,0000 menunjukkan tidak terdapat variasi antar-pengulangan pada resolusi alat yang digunakan. Pengujian dilakukan pada suhu ruang menggunakan metode perbandingan massa dan volume. Perbedaan densitas yang diamati menunjukkan bahwa produk PP memiliki massa per satuan volume lebih besar dibandingkan LDPE. Perbedaan ini diduga berkaitan dengan karakteristik produk hasil pirolisis masing-masing plastik, namun komposisi dan struktur hidrokarbon tidak dapat dipastikan karena penelitian ini tidak melakukan analisis komposisi seperti GC-MS.

Tabel 4. Nilai Densitas LDPE dan PP

Nama	Pengulangan (n)	Volume (ml)	Massa (g)	Densitas (g/ml)	Mean±SD
LDPE	1	60	43	0,7167	0,7167±0,000
LDPE	2	60	43	0,7167	
LDPE	3	60	43	0,7167	
PP	1	60	44	0,7333	0,7333±0,000
PP	2	60	44	0,7333	
PP	3	60	44	0,7333	



Gambar 9. Perbandingan densitas bahan bakar cair hasil pirolisis LDPE dan PP

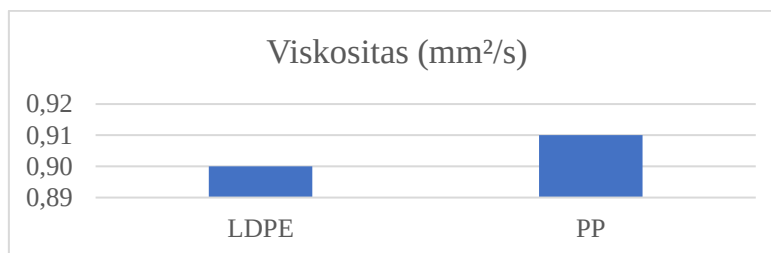
Pada gambar 9. Densitas bahan bakar cair hasil pirolisis LDPE sebesar 0,7167 g/ml, sedangkan bahan bakar cair hasil pirolisis PP sebesar 0,7333 g/ml. Hasil tersebut menunjukkan bahwa densitas PP lebih tinggi sebesar 0,0166 g/ml dibandingkan LDPE. Perbedaan nilai tersebut menunjukkan bahwa bahan bakar cair PP memiliki massa per satuan volume yang lebih besar dibandingkan LDPE pada kondisi pengujian. Karena penelitian ini tidak menggunakan analisis statistik inferensial, perbedaan tersebut hanya dinyatakan sebagai perbedaan nilai yang diamati dan tidak digunakan untuk menyimpulkan perbedaan yang signifikan secara statistik.

b. Nilai Viskositas Hasil Pirolisis LDPE dan PP

Berdasarkan tabel 5. Viskositas bahan bakar cair hasil pirolisis LDPE pada tiga pengulangan masing-masing sebesar 0,90; 0,90; dan 0,90 mm²/s, dengan nilai rata-rata $0,90 \pm 0,00$ mm²/s. Sementara itu, viskositas bahan bakar cair hasil pirolisis PP masing-masing sebesar 0,92; 0,91; dan 0,91 mm²/s, dengan nilai rata-rata $0,91 \pm 0,01$ mm²/s. Pengujian dilakukan pada suhu ruang menggunakan *Ostwald viscometer*. Berdasarkan nilai rata-rata, viskositas PP sedikit lebih tinggi dibandingkan LDPE dengan selisih 0,01 mm²/s. Nilai SD menunjukkan bahwa variasi hasil pengukuran antarulangan relatif kecil, terutama pada LDPE yang menghasilkan nilai sama pada ketelitian pengukuran yang digunakan. Perbedaan viskositas yang diamati menunjukkan bahwa kedua bahan bakar memiliki karakteristik aliran yang relatif serupa pada kondisi pengujian. Perbedaan tersebut dapat diduga berkaitan dengan perbedaan karakteristik hidrokarbon yang terbentuk selama proses pirolisis, tetapi mekanisme tersebut tidak dapat dipastikan karena penelitian ini tidak melakukan analisis komposisi kimia seperti GC-MS. Oleh karena itu, hasil penelitian ini dibatasi pada perbedaan nilai viskositas yang terukur antara bahan bakar cair hasil pirolisis LDPE dan PP.

Tabel 5. Nilai Viskositas LDPE dan PP

Nama	Pengulangan (n)	Waktu alir sampel, t (s)	Densitas sampel ρ (g/cm ³)	Konstanta C (mm ² /s ²)	Viskositas kinematik (mm ² /s)	Mean $\pm$ SD
LDPE	1	8,49	0,71	0,1068	0,90	0,90 $\pm$ 0,00
LDPE	2	8,49	0,71	0,1068	0,90	
LDPE	3	8,49	0,71	0,1068	0,90	
PP	1	8,65	0,73	0,1068	0,91	0,91 $\pm$ 0,01
PP	2	8,65	0,73	0,1068	0,91	
PP	3	8,65	0,73	0,1068	0,91	



Gambar 10. Perbandingan viskositas bahan bakar cair hasil pirolisis LDPE dan PP

Pada gambar 10. Viskositas kinematik bahan bakar cair hasil pirolisis LDPE sebesar 0,90 mm²/s, sedangkan bahan bakar cair hasil pirolisis PP sebesar 0,91 mm²/s. Hasil tersebut menunjukkan bahwa viskositas kinematik PP lebih tinggi sebesar 0,01 mm²/s dibandingkan LDPE. Perbedaan nilai yang relatif kecil menunjukkan bahwa kedua bahan bakar cair memiliki karakteristik aliran yang relatif berdekatan pada kondisi pengujian. Karena penelitian ini tidak menggunakan analisis statistik inferensial, perbedaan tersebut hanya dinyatakan sebagai perbedaan nilai yang diamati dan tidak digunakan untuk menyimpulkan perbedaan yang signifikan secara statistik.

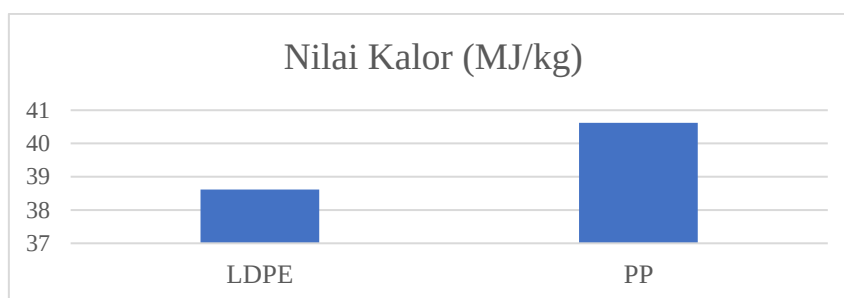
c. Nilai Kalor Hasil Pirolisis PP dan LDPE

Berdasarkan Tabel 6. Nilai kalor bahan bakar cair hasil pirolisis LDPE pada pengulangan 1, 2, dan 3 masing-masing sebesar 41,40; 37,08; dan 37,38 MJ/kg, dengan nilai rata-rata $38,62 \pm 2,41$ MJ/kg. Sementara itu, nilai kalor bahan bakar cair hasil pirolisis PP masing-masing sebesar 41,46; 40,32; dan 40,08 MJ/kg, dengan rata-rata $40,62 \pm 0,74$ MJ/kg. Secara deskriptif, nilai kalor PP lebih tinggi sebesar 2,00 MJ/kg dibandingkan LDPE. Variasi hasil pengujian terlihat lebih besar pada LDPE yang ditunjukkan oleh nilai simpangan baku yang lebih tinggi. Perbedaan nilai kalor yang diamati

dapat berkaitan dengan karakteristik bahan dan produk hidrokarbon yang terbentuk selama proses pirolisis. Namun, karena penelitian ini tidak melakukan analisis komposisi kimia seperti GC-MS, hubungan tersebut dipandang sebagai dugaan berdasarkan literatur dan tidak dapat dibuktikan secara langsung dari hasil penelitian ini. Ketiga data pada masing-masing jenis plastik merupakan hasil dari tiga pengulangan eksperimen independen pada kondisi operasi yang sama.

Tabel 6. Nilai Kalor LDPE dan PP.

Nama	Pengulangan (n)	Massa air (g)	Massa (g)	T ₁ (°C)	T ₂ (°C)	ΔT (°C)	Nilai kalor(J/kg)	Nilai kalor(MJ/kg)
LDPE	1	105	2	29,8	98,8	69,0	41.400.000	41,40
LDPE	2	105	2	30,5	92,3	61,8	37.080.000	37,08
LDPE	3	105	2	30,7	93,0	62,3	37.380.000	37,38
PP	1	105	2	29,2	98,3	69,1	41.460.000	41,46
PP	2	105	2	30,1	97,6	67,5	40.320.000	40,32
PP	3	105	2	29,4	96,2	66,8	40.080.000	40,08
Mean±SD								
LDPE								38,62 ±2,41
Mean±SD								
PP								40,62±0,74



Gambar 11. Perbandingan kalor bahan bakar cair hasil pirolisis LDPE dan PP

Pada gambar 11. Menunjukkan perbandingan nilai kalor rata-rata bahan bakar cair hasil pirolisis LDPE dan PP. Bahan bakar cair hasil pirolisis LDPE memiliki nilai kalor sebesar 38,62 MJ/kg, sedangkan PP sebesar 40,62 MJ/kg. Dengan demikian, nilai kalor bahan bakar cair PP lebih tinggi sebesar 2,00 MJ/kg dibandingkan LDPE. Hasil tersebut menunjukkan adanya perbedaan nilai kalor yang diamati antara bahan bakar cair hasil pirolisis LDPE dan PP, dengan PP menghasilkan nilai kalor rata-rata yang lebih tinggi. Perbedaan ini menunjukkan bahwa produk hasil pirolisis dari kedua jenis plastik memiliki karakteristik kandungan energi yang berbeda pada kondisi pengujian yang dilakukan.

d. Nilai Panas Spesifik LDPE dan PP

Pengujian panas spesifik dilakukan untuk mengetahui karakteristik termal bahan bakar cair hasil pirolisis LDPE dan PP dalam menyerap panas. Hasil pengujian digunakan untuk membandingkan panas spesifik kedua jenis bahan bakar pada kondisi pengujian yang sama.

Tabel 7. Nilai Panas Spesifik.

Nama	Pengulangan (n)	Massa (kg)	T ₁ (°C)	T ₂ (°C)	ΔT (K)	Q _{listrik} (J)	C _{eff} (J/K)	Q _{fuel} (J)	C _p (kJ/kg·K)
LDPE	1	0,018	29,8	66,3	36,5	23.760	503,33	5.388,45	8,200
LDPE	2	0,018	29,8	66,3	36,5	23.760	503,33	5.388,45	8,200
LDPE	3	0,018	29,8	66,3	36,5	23.760	503,33	5.388,45	8,200
PP	1	0,018	29,6	65,1	35,5	23.760	503,33	5.388,45	9,220
PP	2	0,018	29,6	65,1	35,5	23.760	503,33	5.388,45	9,220
PP	3	0,018	29,6	65,1	35,5	23.760	503,33	5.388,45	9,220
Mean±SD									8,200±0,000
LDPE									

Mean±SD
PP

9,220±0,000

Berdasarkan hasil tabel 7. nilai panas spesifik (*specific heat capacity*, C_p) bahan bakar cair hasil pirolisis LDPE dan PP masing-masing sebesar 8,200 dan 9,220 kJ/kg·K. Ketiga pengulangan dilakukan pada *batch* terpisah dengan kondisi operasi yang sama dan menghasilkan nilai C_p yang sama pada tingkat presisi yang digunakan. Oleh karena itu, nilai rata-rata dan simpangan baku masing-masing sebesar $8,200 \pm 0,000$ kJ/kg·K untuk LDPE dan $9,220 \pm 0,000$ kJ/kg·K untuk PP. Nilai C_p PP lebih tinggi 1,020 kJ/kg·K dibandingkan LDPE. Nilai SD sebesar 0,000 menunjukkan bahwa hasil perhitungan pada ketiga pengulangan sama pada tingkat presisi yang dilaporkan. C_p diperoleh melalui perhitungan berdasarkan energi panas, massa sampel, dan perubahan temperatur, sehingga digunakan sebagai parameter pendukung karakteristik termal bahan bakar cair. Perbedaan C_p yang diamati antara produk pirolisis LDPE dan PP dapat diduga berkaitan dengan perbedaan karakteristik produk yang dihasilkan dari masing-masing bahan baku. Namun, penelitian ini tidak melakukan analisis komposisi kimia seperti GC-MS, sehingga hubungan antara nilai C_p dan struktur atau komposisi hidrokarbon belum dapat dipastikan secara langsung. Dengan demikian, hasil penelitian menunjukkan perbedaan nilai C_p yang diamati antara bahan bakar cair hasil pirolisis LDPE dan PP.

e. Nilai Konduktivitas Termal

Tabel 8. Nilai Konduktivitas Termal.

Nama	Massa (kg)	T ₁ (°C)	T ₂ (°C)	ΔT (K)	Q fuel (J)	L (m)	A (m ²)	k (W/m·K)
LDPE	1	29,8	66,3	36,5	5.388,45	0,04	0,003848	2,558
LDPE	2	29,8	66,3	36,5	5.388,45	0,04	0,003848	2,558
LDPE	3	29,8	66,3	36,5	5.388,45	0,04	0,003848	2,558
PP	1	29,6	65,1	35,5	5.891,78	0,04	0,003848	2,875
PP	2	29,6	65,1	35,5	5.891,78	0,04	0,003848	2,875
PP	3	29,6	65,1	35,5	5.891,78	0,04	0,003848	2,875
Mean ± SD								2,558±0,000
LDPE								
Mean ± SD								2,875±0,000
PP								

Berdasarkan tabel 8. Hasil estimasi, konduktivitas termal (*thermal conductivity*, k) bahan bakar cair hasil pirolisis LDPE dan PP masing-masing sebesar 2,558 dan 2,875 W/m·K. Nilai k dihitung berdasarkan pendekatan perpindahan panas dengan menggunakan parameter energi panas bahan bakar cair, panjang lintasan perpindahan panas, luas penampang, waktu pengamatan, dan perubahan temperatur. Ketiga pengulangan dilakukan pada *batch* terpisah dengan kondisi operasi yang sama. Hasil perhitungan k pada ketiga pengulangan menunjukkan nilai yang sama pada tingkat presisi yang dilaporkan, sehingga diperoleh nilai $2,558 \pm 0,000$ W/m·K untuk LDPE dan $2,875 \pm 0,000$ W/m·K untuk PP. Kesamaan hasil disebabkan oleh penggunaan parameter perhitungan yang sama dan pembulatan berdasarkan resolusi data pengukuran. Karena k diperoleh melalui estimasi/perhitungan dan bukan pengukuran langsung menggunakan instrumen uji konduktivitas termal, parameter ini digunakan sebagai parameter pendukung karakteristik termal bahan bakar cair.

Penelitian ini memiliki beberapa keterbatasan, yaitu penggunaan satu kondisi operasi utama dan tiga pengulangan, sehingga variasi karakteristik bahan bakar cair pada kondisi operasi yang berbeda belum dapat diketahui secara lebih luas. Penelitian juga belum melakukan karakterisasi komposisi kimia menggunakan GC-MS dan pengujian performa pembakaran atau mesin. Selain itu, panas spesifik dan konduktivitas termal diperoleh melalui estimasi sehingga digunakan sebagai parameter pendukung. Karena tidak dilakukan analisis statistik inferensial, perbedaan antara produk pirolisis LDPE dan PP hanya dinyatakan sebagai perbedaan yang diamati dan belum dapat dinyatakan sebagai perbedaan yang signifikan secara statistik.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian, bahan bakar cair hasil pirolisis LDPE dan PP menunjukkan perbedaan karakteristik yang diamati pada parameter yang diuji. Bahan bakar cair PP memiliki nilai kalor rata-rata 40,62 MJ/kg, lebih tinggi 2,00 MJ/kg dibandingkan LDPE sebesar 38,62 MJ/kg. Densitas PP sebesar 0,7333 g/ml, lebih tinggi 0,0166 g/ml dibandingkan LDPE sebesar 0,7167 g/ml, sedangkan viskositas kinematik PP sebesar 0,91 mm²/s dan LDPE sebesar 0,90 mm²/s.

Parameter pendukung juga menunjukkan nilai PP lebih tinggi, yaitu panas spesifik sebesar 9,220 kJ/kg·K dibandingkan LDPE 8,200 kJ/kg·K, serta konduktivitas termal sebesar 2,875 W/m·K dibandingkan LDPE 2,558 W/m·K. Karena penelitian ini tidak menggunakan analisis statistik inferensial, perbedaan tersebut tidak dapat dinyatakan sebagai perbedaan yang signifikan secara statistik. Selain itu, panas spesifik dan konduktivitas termal diperoleh melalui estimasi sehingga digunakan sebagai parameter pendukung. Dengan demikian, penelitian ini menunjukkan perbedaan karakteristik bahan bakar cair hasil pirolisis LDPE dan PP berdasarkan parameter yang diuji, tetapi belum dapat menentukan jenis plastik yang lebih unggul secara keseluruhan. Pirolisis LDPE dan PP berpotensi menjadi alternatif pemanfaatan limbah plastik menjadi bahan bakar cair, namun diperlukan karakterisasi komposisi kimia dan pengujian kinerja pembakaran atau mesin untuk menilai kelayakan penggunaannya lebih lanjut.

UCAPAN TERIMA KASIH

Laboratorium Teknik Mesin Universitas Persatuan Guru Republik Indonesia Semarang, Jl. Pawiyatan Luhur III No.1, Bendan Duwur, Kecamatan Gajahmungkur, Kota Semarang.

REFERENCES

- [1] E. M. M. Arifin, Putranty Widha Nugraheni, "Pirolisis Limbah Plastik Jenis Low Density Polyethylene (LDPE) dan Polypropylene (PP) Menggunakan Katalis Zeolit Alam," *J. Teknol. Lignungan Lahan Basah*, vol. 11, no. 3, pp. 773–779, 2023, doi: 10.26418/jtlb.v11i3.69221.
- [2] Y. B. Novarini, Sigit Kurniawan, Rusdianasari, "Kajian Karakteristik dan Energi pada Pirolisis Limbah Plastik Low Density Polyethylene (LDPE)," *J. Tek. Kim. dan Lingkung.*, vol. 5, no. April, p. (1) 61-70, 2021, doi: <http://dx.doi.org/10.33795/jtkl.v5i1.190>.
- [3] A. F. Anene, S. B. Fredriksen, K. A. Sætre, and L. Tokheim, "Experimental Study of Thermal and Catalytic Pyrolysis of Plastic Waste Components," *Sustainability*, vol. 10, no. 11, p. 3979, Oct. 2018, doi: 10.3390/su10113979.
- [4] H. Anisya Putri Islami, Sutrisno, "Pirolisis Sampah Plastik Jenis Polipropilena (PP) menjadi Bahan Bakar," vol. 3, no. 2, pp. 1–6, 2020, doi: 10.17977/um0260v3i22019p001.
- [5] R. U. H Khair, B Listiany, "Pyrolysis of polypropylene plastic waste : An analysis of oil quantity , density , viscosity , and calorific value Pyrolysis of polypropylene plastic waste : An analysis of oil quantity , density , viscosity , and calorific value," *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci. Pap.*, vol. 1268, 2023, doi: 10.1088/1755-1315/1268/1/012056.
- [6] P. L. Kefi, I. N. Suarnadwipa, and I. W. B. Adnyana, "Uji Viskositas Bahan Bakar Cair Hasil Proses Pirolisis," *J. Ilm. Tek. DESAIN Mek.*, vol. 13, no. 3, pp. 192–197, 2024.
- [7] S. Papari, H. Bamdad, and F. Berruti, "Pyrolytic conversion of plastic waste to value-added products and fuels: A review," *Materials (Basel)*, vol. 14, no. 10, 2021, doi: 10.3390/ma14102586.
- [8] J. Uebe, Z. Kryzevicius, R. Majauskiene, M. Dulevicius, L. Kosychova, and A. Zukauskaitė, "Use of polypropylene pyrolysis oil in alternative fuel production," *Waste Manag. Res. J. a Sustain. Circ. Econ.*, vol. 40, no. 8, pp. 1220–1230, Aug. 2022, doi: 10.1177/0734242X211068243.
- [9] W. U. Eze, R. Umunakwe, H. C. Obasi, M. I. Ugboja, C. C. Uche, and I. C. Madufor, "Plastics waste management: A review of pyrolysis technology," *Clean Technol. Recycl.*, vol. 1, no. 1, pp. 50–69, 2021, doi: 10.3934/ctr.2021003.
- [10] L. Plastik, L. O. W. Density, P. Ldpe, and D. A. N. Polypropylene, "10.70476/jft.v7i2.8," vol. 7, no. 2, pp. 124–130, 2026.
- [11] T. Kan, V. Strezov, and T. J. Evans, "Lignocellulosic biomass pyrolysis: A review of product properties and effects of pyrolysis parameters," 2016, *Elsevier*. doi: 10.1016/j.rser.2015.12.185.
- [12] R. Cantika *et al.*, "Pengolahan Limbah Plastik Jenis Polypropylene (PP) dan Low Density Polyethylene (LDPE) Menjadi Bahan Bakar Cair Melalui Proses Catalytic Thermal Cracking Menggunakan Katalis FCC," *J. Pendidik. dan Teknol. Indones.*, vol. 2, no. 10, pp. 437–445, 2022, doi: 10.52436/1.jpti.235.
- [13] F. Faisal, M. G. Rasul, M. I. Jahirul, and A. A. Chowdhury, "Waste plastics pyrolytic oil is a source of diesel fuel: A recent review on diesel engine performance, emissions, and combustion characteristics," 2023, *The Authors*. doi: 10.1016/j.scitotenv.2023.163756.
- [14] F. Sulaiman, H. Prayitno, R. Ramadhani, and K. Anam, "The Effect of Temperature on the Pyrolysis PP and LDPE Plastic Waste : Implications for Pyrolysis Fuel Oil Characteristics," *J. Trans. Syst. Eng.*, vol. 2, no. 3, pp. 306–315, 2024, doi: 10.15157/jtse.2024.2.3.306-315.
- [15] D. G. H. Adoe, D. Y. Satria, and A. Sanusi, "Karakterisasi Minyak Hasil Pirolisis Berbahan Dasar Limbah Plastik Jenis Polypropylene (PP)," *LONTAR J. Tek. Mesin Undana*, vol. 10, no. 02, pp. 15–22, 2023, doi: 10.35508/ljtmu.v10i02.13435.

- [16] M. Laghezza, S. Fiore, and F. Berruti, "A review on the pyrolytic conversion of plastic waste into fuels and chemicals," 2024, *Elsevier B.V.* doi: 10.1016/j.jaap.2024.106479.
- [17] B. Hegedüs, T. Dinh, G. Nagy, G. Muránszky, and Z. Dobó, "Temperature-Dependent investigation of pyrolysis products from PP and LDPE for Gasoline-Like fuel applications," *Waste Manag.*, vol. 210, no. November 2025, 2026, doi: 10.1016/j.wasman.2025.115262.
- [18] R. I. Mainil, J. J. Panjaitan, A. K. Mainil, H. Putra, and A. Aziz, "Oil Production from Polypropylene Plastic via Pyrolysis," in *AIP Conference Proceedings*, 2025. doi: 10.1063/5.0243224.
- [19] P. G. I. Uthpalani, D. S. M. De Silva, V. P. A. Weerasinghe, J. K. Premachandra, and T. V. Sarathchandra, "Pyrolysis of waste LDPE and waste PP plastics into fuel oil in a low-cost, lab-scale pyrolyzing unit," *J. Sci. Univ. Kelaniya*, vol. 16, no. 1, pp. 47–55, 2023, doi: 10.4038/josuk.v16i1.8079.
- [20] S. H. Gebre, M. G. Sendeku, and M. Bahri, "Recent Trends in the Pyrolysis of Non-Degradable Waste Plastics," 2021. doi: 10.1002/open.202100184.
- [21] B. Alawa and S. Chakma, "Synergism and production of hydrocarbon-rich fuel from mixed-feedstock through co-pyrolysis of LDPE and PP: An assessment of fuel properties, engine performance, and gas emission," *J. Anal. Appl. Pyrolysis*, vol. 168, no. October 2022, p. 105736, 2022, doi: 10.1016/j.jaap.2022.105736.
- [22] C. F. Anuligwe, D. C. Obiajunwa, N. I. Vincent, N. E. Chinyere, and O. A. Rebecca, "Pyrolysis of Mixed Plastic Waste (LDPE, HDPE, PP, and PS): A Critical Review of Fuel Oil Yield, Quality, and Process Performance," *Int. J. Innov. Sci. Res. Technol.*, vol. 11, no. 1, p. 1846, 2026, doi: 10.38124/ijisrt/26jan662.
- [23] W. Andalia, I. Pratiwi, B. D. Afrah, I. Akbar, and M. I. Ammarullah, "Optimized pyrolysis of household plastic waste in Indonesia for oil production: Hydrocarbon profiling, fuel alternative, and potential biomedical application," *Results Chem.*, vol. 15, no. December 2024, p. 102247, 2025, doi: 10.1016/j.rechem.2025.102247.
- [24] V. N. J. Page, "Sains dan Ilmu Terapan," 2024. [Online]. Available: <https://utilityprojectsolution.org/ejournal/index.php/JuKSIT%0APenerbit>
- [25] M. Sogancioglu, E. Yel, and G. Ahmetli, "Pyrolysis of waste high density polyethylene (HDPE) and low density polyethylene (LDPE) plastics and production of epoxy composites with their pyrolysis chars," *J. Clean. Prod.*, vol. 165, pp. 369–381, Nov. 2017, doi: 10.1016/j.jclepro.2017.07.157.
- [26] S. D. Anuar Sharuddin, F. Abnisa, W. M. A. Wan Daud, and M. K. Aroua, "A review on pyrolysis of plastic wastes," 2016, *Elsevier Ltd.* doi: 10.1016/j.enconman.2016.02.037.
- [27] M. Toparli, S. Sahin, E. Ozkaya, and S. Sasaki, "Residual thermal stress analysis in cylindrical steel bars using finite element method and artificial neural networks," *Comput. Struct.*, vol. 80, no. 23, pp. 1763–1770, 2002, doi: 10.1016/S0045-7949(02)00215-8.
- [28] B. Abbasgholi-NA, S. R. Nokhbeh, O. A. Aldaghri, K. H. Ibnaouf, N. Madkhali, and H. Cabrera, "Thermal Diffusivity and Conductivity of Polyolefins by Thermal Lens Technique," *Polymers (Basel)*, vol. 14, no. 13, p. 2707, Jul. 2022, doi: 10.3390/polym14132707.
- [29] M. Assaye, B. Tamirat, and B. Fekadu, "Ethanol concentration and calorific value of some local distilled Ethiopian alcohol (Areki): an energy potential assessment," *Cogent Eng.*, vol. 8, no. 1, 2021, doi: 10.1080/23311916.2021.1979444.
- [30] N. Ilminnafik, D. H. T. Prasetyo, Welayaturromadhona, A. M. Kartini, B. Palupi, and Suyitno, "Optimization of biodiesel synthesis process from nyamplung (*calophyllum inophyllum*) oil using thermal air sparging method," *Mech. Eng. Soc. Ind.*, vol. 6, no. 1, pp. 211–229, 2026, doi: 10.31603/mesi.15335.
- [31] M. Hothar and L. Wadsö, "Accurate heat capacity determination of solids and liquids using a heat conduction calorimeter," *J. Therm. Anal. Calorim.*, vol. 149, no. 5, pp. 2179–2188, 2024, doi: 10.1007/s10973-023-12824-8.
- [32] G. Vera-Reveles *et al.*, "Analysis of the thermoelectrical performance of samples made of Coir Agricultural Wastes combined with MWCNT," *Sci. Rep.*, vol. 12, no. 1, pp. 1–8, 2022, doi: 10.1038/s41598-022-20801-8.