

Analisis Pengaruh Variasi Suhu Pirolisis terhadap Rendemen, Nilai Kalor, dan Densitas Bahan Bakar Cair dari Limbah Plastik *Polypropylene* (PP)

Yudha Aditya Pratama¹, Asroful Abidin^{2*}, dan Mokh. Hairul Bahri³

¹Program Studi Teknik Mesin, Universitas Muhammadiyah Jember; email : adityuda460@gmail.com

²Program Studi Teknik Mesin, Universitas Muhammadiyah Jember; email : asrofulabidin@unmuhjember.ac.id

³Program Studi Teknik Mesin, Universitas Muhammadiyah Jember; email : mhairulbahri@unmuhjember.ac.id

***Penulis Korespondensi :** Asroful Abidin

Abstract: The increasing amount of polypropylene (PP) plastic waste has become an environmental challenge that requires effective management. One promising technology to address this issue is pyrolysis, a thermal decomposition process carried out in the absence of oxygen that converts plastic waste into valuable liquid fuel. This study aimed to analyze the effect of pyrolysis temperature on the yield, calorific value, and density of liquid fuel produced from polypropylene plastic waste. The pyrolysis process was conducted using a batch reactor with a feedstock mass of 1.25 kg for 60 minutes at temperatures of 300°C, 400°C, and 500°C. The calorific value was determined using a Bomb Calorimeter, while the density was measured using the pycnometer method. The results showed that pyrolysis temperature significantly influenced the characteristics of the liquid fuel produced. The highest calorific value was obtained at 300°C, reaching 38,022.85 J/g (9,087.68 cal/g), which decreased to 33,538.23 J/g (8,015.83 cal/g) at 400°C and further declined to the lowest value of 3,798.05 J/g (907.76 cal/g) at 500°C. Meanwhile, the density values obtained at 300°C, 400°C, and 500°C were 1.028 g/mL, 1.011 g/mL, and 1.031 g/mL, respectively. Based on these findings, a pyrolysis temperature of 300°C produced the highest-quality liquid fuel in terms of calorific value, whereas 400°C yielded a density that was closest to the characteristics of commercial liquid fuels.

Keywords: Pyrolysis, Polypropylene, Plastic Waste, Liquid Fuel, Calorific Value, Density.

Abstrak: Peningkatan jumlah limbah plastik polypropylene (PP) menjadi salah satu tantangan lingkungan yang memerlukan penanganan secara efektif. Salah satu teknologi yang berpotensi mengatasi permasalahan tersebut adalah pirolisis, yaitu proses dekomposisi termal tanpa kehadiran oksigen yang mampu mengubah limbah plastik menjadi bahan bakar cair bernilai guna. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh variasi suhu pirolisis terhadap rendemen, nilai kalor, dan densitas bahan bakar cair yang dihasilkan dari limbah plastik polypropylene. Proses pirolisis dilakukan menggunakan reaktor batch dengan massa bahan baku sebesar 1,25 kg selama 60 menit pada suhu 300°C, 400°C, dan 500°C. Nilai kalor dianalisis menggunakan Bomb Calorimeter, sedangkan densitas ditentukan dengan metode piknometer. Hasil penelitian menunjukkan bahwa variasi suhu pirolisis memberikan pengaruh terhadap karakteristik bahan bakar cair yang dihasilkan. Nilai kalor tertinggi diperoleh pada suhu 300°C, yaitu sebesar 38.022,85 J/gram (9.087,68 cal/gram), kemudian menurun menjadi 33.538,23 J/gram (8.015,83 cal/gram) pada suhu 400°C, dan mencapai nilai terendah sebesar 3.798,05 J/gram (907,76 cal/gram) pada suhu 500°C. Sementara itu, nilai densitas yang diperoleh berturut-turut sebesar 1,028 g/ml, 1,011 g/ml, dan 1,031 g/ml pada suhu 300°C, 400°C, dan 500°C. Berdasarkan hasil tersebut, suhu pirolisis 300°C menghasilkan bahan bakar cair dengan kualitas terbaik berdasarkan nilai kalor tertinggi, sedangkan suhu 400°C menghasilkan densitas yang paling mendekati karakteristik bahan bakar cair komersial.

Kata kunci: Pirolisis, Polypropylene, Sampah Plastik, Bahan Bakar Cair, Nilai Kalor, Densitas.

Diterima: June 25, 2026

Direvisi: June 30, 2026

Diterima: July 17, 2026

Diterbitkan: July 17, 2026

Versi sekarang: July 30, 2026



Hak cipta: © 2026 oleh penulis.
Diserahkan untuk kemungkinan publikasi akses terbuka berdasarkan syarat dan ketentuan lisensi Creative Commons Attribution (CC BY SA) (<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>)

1. Pendahuluan

Krisis sampah plastik telah menjadi salah satu permasalahan lingkungan yang semakin mendesak, baik di tingkat global maupun di Indonesia. Berdasarkan data dari Sistem Informasi Pengelolaan Sampah Nasional (SIPSN), jumlah timbunan sampah plastik di Indonesia masih tergolong tinggi dan terus mengalami peningkatan setiap

tahun. Kondisi tersebut telah melampaui kapasitas sistem daur ulang yang tersedia, sehingga diperlukan upaya pengelolaan yang lebih efektif [1]. Sifat plastik yang tidak mudah terurai secara alami (*non-biodegradable*) menyebabkan limbahnya terus menumpuk di Tempat Pembuangan Akhir (TPA). Penumpukan tersebut dapat memicu pencemaran tanah dan perairan, serta meningkatkan keberadaan mikroplastik yang berdampak negatif terhadap keseimbangan ekosistem dan kesehatan manusia. Oleh karena itu, diperlukan metode pengelolaan limbah yang tidak hanya efektif dalam mengurangi akumulasi sampah plastik, tetapi juga mampu mengubahnya menjadi produk yang memiliki nilai ekonomi [2].

Di antara berbagai jenis sampah plastik, **polypropylene (PP)** merupakan salah satu yang jumlahnya paling dominan karena banyak dimanfaatkan sebagai kemasan makanan, botol, tutup botol, wadah, serta berbagai peralatan rumah tangga. Apabila tidak dikelola secara tepat, akumulasi limbah PP dapat meningkatkan pencemaran dan memperberat beban lingkungan. Namun, di balik permasalahan tersebut, limbah PP memiliki potensi untuk dimanfaatkan kembali. Hal ini disebabkan oleh sifat kimianya sebagai polimer hidrokarbon, sehingga dapat dikonversi menjadi senyawa bernilai tambah, terutama bahan bakar cair, melalui proses termokimia yang memecah rantai polimer menjadi molekul yang lebih sederhana [3]. Sebagai salah satu metode konversi termokimia, pirolisis mampu menguraikan limbah plastik polypropylene (PP) melalui pemanasan pada kondisi minim oksigen sehingga menghasilkan tiga fraksi utama, yaitu minyak pirolisis (*pyrolysis oil*), gas pirolisis (*syngas*), dan residu padat (*char*), dengan karakteristik yang dipengaruhi oleh suhu proses. [24]. Pirolisis merupakan salah satu teknologi yang berpotensi mengubah sampah plastik menjadi produk bernilai tambah. Proses ini bekerja melalui dekomposisi termal dengan memanaskan material pada suhu tinggi, umumnya berkisar antara 300–800°C, dalam kondisi tanpa oksigen atau dengan suplai oksigen yang sangat terbatas. Melalui proses tersebut, sampah plastik dikonversi menjadi tiga produk utama, yaitu minyak pirolisis yang dapat dimanfaatkan sebagai bahan bakar cair, gas hasil pirolisis (*syngas*) yang berpotensi digunakan sebagai sumber energi, serta residu padat berupa *char* [4]. Keunggulan utama pirolisis adalah kemampuannya mereduksi volume sampah secara drastis sekaligus menghasilkan produk energi yang dapat dimanfaatkan, sehingga menawarkan solusi yang berkelanjutan dan berbasis ekonomi sirkular dari berbagai parameter operasi pirolisis, suhu merupakan faktor yang paling kritis dan berpengaruh dominan terhadap hasil proses, suhu pirolisis secara langsung mengendalikan mekanisme dan tingkat pemutusan rantai polimer (*cracking*)[5]. Ketersediaan energi yang berkelanjutan menjadi faktor kunci dalam menunjang pertumbuhan ekonomi, meningkatkan kualitas hidup, serta mendorong pembangunan industri dan transportasi modern [23]. Suhu yang terlalu rendah dapat mengakibatkan *cracking* tidak sempurna dan menghasilkan minyak dengan viskositas tinggi, sedangkan suhu yang terlalu tinggi dapat menyebabkan pembentukan gas berlebih sehingga mengurangi rendemen minyak cair yang diinginkan, oleh karena itu diperlukan penelitian sistematis untuk memahami pengaruh variasi suhu ini guna menemukan kondisi operasi yang optimal[6].

Berdasarkan tinjauan teknik proses, suhu pirolisis berfungsi sebagai variabel operasional kritis yang secara langsung mengendalikan kinetika reaksi, perpindahan panas dan massa, serta efisiensi konversi termokimia, optimasi parameter suhu menentukan selektivitas produk antara fase bio-oil, syngas, dan biochar melalui pengaturan laju dekomposisi komponen volatil dan derajat karbonisasi[7]. Pemetaan hubungan suhu-karakteristik produk ini menjadi dasar perancangan reaktor dan strategi kontrol proses untuk menghasilkan output dengan spesifikasi properti yang ditargetkan, seperti nilai kalorifik bio-oil, porositas biochar, atau komposisi syngas dengan implementasi skema kontrol suhu yang presisten dengan demikian merupakan prerequisite fundamental dalam scale-up sistem pirolisis menuju aplikasi industri yang ekonomis dan berkelanjutan[8]. Penelitian ini tidak hanya berfokus pada jumlah minyak hasil pirolisis yang diperoleh, tetapi juga pada karakteristik bahan bakar cair yang dihasilkan. Variasi suhu pirolisis diduga berpengaruh terhadap sifat fisika dan kimia minyak, seperti densitas, viskositas, nilai kalor, komposisi fraksi hidrokarbon, serta angka asam. Karakteristik tersebut menjadi parameter penting dalam menentukan kelayakan minyak pirolisis sebagai bahan bakar alternatif, misalnya sebagai bahan bakar substitusi sebagian (*partial substitution*) pada *furnace* maupun mesin diesel. Oleh karena itu, pemahaman mengenai pengaruh suhu pirolisis terhadap karakteristik minyak sangat diperlukan agar produk yang dihasilkan memenuhi standar kelayakan penggunaan [9].

Penelitian ini oleh Susanto [10] Penelitian yang dilakukan oleh BWB bertujuan untuk mengevaluasi karakteristik minyak hasil pirolisis dari limbah plastik sebagai kandidat bahan bakar alternatif. Proses pirolisis dilakukan menggunakan reaktor rancangan sendiri, yaitu Fastpol G-5, pada suhu 250–325 °C selama 8 jam. Minyak pirolisis yang dihasilkan selanjutnya melalui tahap pemurnian, esterifikasi, dan filtrasi sebelum dilakukan pengujian karakteristik. Bahan baku yang digunakan berupa campuran limbah plastik yang didominasi oleh polietilena (PE) dan polipropilena (PP). Karakteristik bahan bakar cair yang diperoleh, yang memiliki sifat menyerupai solar, kemudian dievaluasi berdasarkan standar mutu yang berlaku. Selain itu, analisis kromatografi gas dilakukan untuk memeriksa komposisi senyawa. Hasil penelitian menunjukkan bahwa plastik pirolisis yang dihasilkan oleh BWB secara umum memenuhi standar kualitas minyak solar 48, kecuali untuk parameter kepadatan dan warna. Angka setana dan kandungan sulfur masing-masing adalah 48,6 dan 890% m/m. Komposisi kimia bahan bakar menunjukkan bahwa ia mengandung 54,46% senyawa alifatik, 22,85% aromatik, dan 22,69% oksigenat. Komposisi kimia zat ini yang kompleks, yang terdiri dari senyawa aromatik, olefin, dan terutama hidrokarbon alifatik, membuatnya cocok untuk digunakan sebagai bahan bakar dalam berbagai aplikasi. Produksi minyak pirolisis BWB dari limbah plastik telah terbukti menjadi bahan bakar alternatif yang layak.

Pada penelitian lain yang dilakukan oleh Gonzalez [11] menyelidiki pengaruh laju pemanasan dan suhu pada pirolisis campuran acak limbah plastik (PP, LDPE, HDPE). Hasilnya menunjukkan bahwa konversi sempurna bahan baku tercapai dengan hasil cairan maksimum sebesar 69% berat, yang berarti dari setiap 1 kg limbah plastik dapat dihasilkan sekitar 0,85 liter minyak pirolisis. Penelitian ini lebih lanjut mengungkap

bahwa suhu yang lebih tinggi atau waktu tinggal yang lebih singkat (akibat laju pemanasan tinggi) justru mengurangi rendemen minyak pirolisis karena lebih banyak bahan yang terkonversi menjadi produk gas. Minyak pirolisis yang dihasilkan sendiri terdiri dari beragam senyawa hidrokarbon, sehingga diperlukan proses fraksinasi sebelum dapat diaplikasikan sebagai bahan bakar untuk mesin pembakaran dalam. Proses pemisahan ini berhasil menghasilkan 21,12% berat fraksi ringan (menyerupai bensin), 56,52% berat fraksi menengah (menyerupai solar), dan 22,36% berat fraksi berat (menyerupai solar berat). Analisis menunjukkan bahwa fraksi ringan memiliki indeks oktan dan nilai kalori yang setara dengan bensin konvensional, sementara fraksi menengah memiliki indeks setana dan nilai kalori yang telah memenuhi standar untuk solar. Pada akhirnya, penelitian ini membuktikan bahwa pirolisis merupakan alternatif yang sangat menjanjikan untuk memulihkan limbah plastik yang sudah tidak dapat didaur ulang secara mekanis tradisional, sekaligus mengubahnya menjadi produk bahan bakar yang bernilai.

Penelitian ini diharapkan dapat menjadi landasan ilmiah dalam pengembangan bahan bakar cair berkelanjutan yang dihasilkan melalui proses pirolisis plastik polipropilena (PP) di Indonesia. Data teknis yang diperoleh, seperti rendemen minyak pirolisis, densitas, nilai kalor, viskositas, dan komposisi kimia pada berbagai suhu operasi, diharapkan dapat menjadi acuan untuk mengoptimalkan proses pirolisis sekaligus meningkatkan pemanfaatan limbah plastik sebagai sumber energi alternatif yang lebih ramah lingkungan. Selain mendukung pengelolaan limbah plastik, hasil penelitian ini juga diharapkan dapat memberikan kontribusi terhadap upaya diversifikasi sumber energi di Indonesia.

2. Tinjauan Literatur

2.1 Plastik

Plastik merupakan material polimer sintetis yang tersusun atas rantai panjang monomer organik. Umumnya, plastik diproduksi dari bahan baku yang berasal dari hasil pengolahan minyak bumi dan gas alam. Struktur molekulnya memberikan berbagai sifat khas yang membedakan plastik dari material lainnya, sehingga banyak dimanfaatkan dalam beragam aplikasi dan kebutuhan sehari-hari [12].

2.2 Pirolisis

Pirolisis merupakan proses dekomposisi termokimia pada material organik melalui pemanasan pada suhu tinggi, umumnya berkisar antara 300–900°C, dalam kondisi tanpa oksigen atau dengan suplai oksigen yang sangat terbatas (atmosfer inert). Proses ini dikenal pula sebagai *thermal cracking* karena energi panas yang diberikan mampu memutus ikatan kimia pada molekul berukuran besar, seperti biopolimer pada biomassa maupun polimer pada plastik. Pemutusan ikatan tersebut menyebabkan bahan baku (*feedstock*) terurai menjadi tiga produk utama, yaitu residu padat berupa arang atau *biochar*, produk cair berupa *bio-oil* pada biomassa atau minyak pirolitik pada plastik, serta produk gas berupa gas sintetis (*syngas*) yang umumnya mengandung metana, hidrogen, karbon monoksida, dan berbagai senyawa gas lainnya [13].

2.3 Nilai Kalor

Nilai kalor atau nilai bakar merupakan parameter termodinamika yang menunjukkan jumlah energi panas yang dilepaskan melalui proses pembakaran sempurna suatu bahan bakar. Secara umum, nilai kalor menggambarkan besarnya energi yang dapat dihasilkan dari setiap satuan bahan bakar yang dibakar. Parameter ini menjadi salah satu indikator penting dalam menilai potensi energi suatu bahan bakar dan banyak

digunakan dalam berbagai bidang, seperti pembangkitan listrik, evaluasi efisiensi mesin kendaraan, serta perhitungan kebutuhan energi dalam tubuh manusia [14].

2.4 Densitas

Densitas merupakan salah satu sifat fisika penting pada bahan bakar cair hasil pirolisis *polypropylene* (PP) yang dipengaruhi oleh suhu proses. Secara umum, densitas menunjukkan massa suatu zat per satuan volume dan menjadi salah satu parameter yang berkaitan dengan kualitas serta nilai kalor bahan bakar. Densitas dihitung menggunakan persamaan ($\rho = \frac{m}{V}$), dengan (ρ) sebagai densitas (g/cm³ atau kg/m³), (m) sebagai massa sampel (g atau kg), dan (V) sebagai volume sampel (cm³ atau m³). Dalam pengujian di laboratorium, pengukuran densitas umumnya dilakukan menggunakan piknometer karena mampu memberikan hasil yang lebih akurat [13].

2.5 Rendemen

Rendemen bahan bakar cair hasil pirolisis merupakan salah satu parameter utama yang digunakan untuk mengevaluasi efisiensi proses. Nilai rendemen menunjukkan persentase massa produk cair yang dihasilkan dibandingkan dengan massa bahan baku kering yang dimasukkan ke dalam reaktor. Besarnya rendemen dapat bervariasi karena dipengaruhi oleh berbagai faktor, terutama kondisi operasi selama proses pirolisis serta karakteristik bahan baku yang digunakan [15].

3. Metode

Penelitian ini menggunakan metode eksperimen yang dilaksanakan secara terkontrol untuk menganalisis pengaruh perlakuan yang diberikan terhadap variabel yang diteliti.

3.1 Alat dan Bahan

Peralatan yang digunakan dalam penelitian ini meliputi:

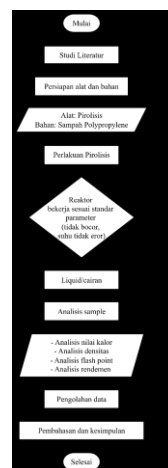
- a. Reaktor Pirolisis
- b. Gelas Beaker
- c. Sarung Tangan
- d. Timbangan Digital
- e. Timbangan Digital Mini Scale
- f. Pemantik Api
- g. Piknometer
- h. Stopwatch
- i. Kertas TBA
- j. Baut dan Mur
- k. Kompor

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini meliputi:

- a. Plastik Polypropylene

3.2 Diagram Alir

Berikut merupakan gambar diagram alir dalam rangkaian penelitian.



Gambar 3. 1 Diagram Alir

3.2 Variabel Penelitian

Penelitian ini terdapat beberapa variabel diantaranya adalah sebagai berikut:

a. Variabel Tetap (Fix Variable)

Variabel tetap yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Waktu yang digunakan adalah 60 menit.
2. Polypropylene sebanyak 1.250 kg.

b. Variabel Bebas (Independent Variable)

Variabel bebas yang digunakan dalam penelitian ini sebagai berikut:

1. Proses pirolisis dilakukan pada tiga variasi suhu, yaitu 300°C, 400°C, dan 500°C.

c. Variabel Terikat (Dependent Variable)

Variabel terikat yang digunakan dalam penelitian ini sebagai berikut:

1. Uji nilai kalor
2. Uji densitas
3. Uji Rendemen

3.4 Analisis Penelitian

Data hasil eksperimen pada penelitian ini dianalisis menggunakan metode deskriptif kuantitatif. Hasil pengukuran disajikan dalam bentuk tabel dan grafik dengan bantuan Microsoft Excel, kemudian diinterpretasikan secara naratif untuk menjelaskan pola dan kecenderungan data. Pendekatan ini memungkinkan hasil penelitian dianalisis secara sistematis sehingga dapat menjawab rumusan masalah yang telah ditetapkan.

4. Hasil dan Pembahasan

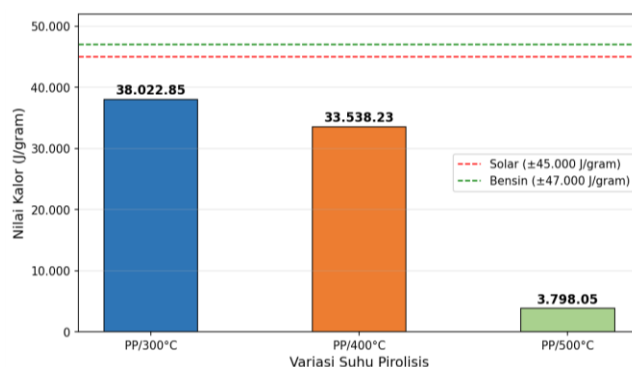
Nilai Kalor

Penelitian ini memanfaatkan limbah plastik jenis Polypropylene (PP) sebagai bahan baku dalam proses pirolisis menggunakan reaktor tipe *batch* berkapasitas 3 kg. Massa bahan baku pada setiap percobaan dijaga konstan sebesar 1,250 kg, sedangkan suhu operasi divariasikan pada 300°C, 400°C, dan 500°C dengan durasi pirolisis selama 60 menit. Minyak hasil pirolisis yang diperoleh kemudian diuji nilai kalornya menggunakan metode *bomb calorimetry* di Laboratorium Teknik Mesin Universitas Muhammadiyah Sidoarjo pada 5 Maret 2026. Data hasil pengujian untuk setiap variasi suhu operasi disajikan pada Tabel 4.1.

Tabel 4. 1 Nilai Kalor

No	Variasi Suhu Pirolisis	ΔT Sampel ($^{\circ}\text{C}$)	Q (J/gram)	Q (Cal/gram)
1	PP/300 $^{\circ}\text{C}$	2,5380	38.022,85	9.087,68
2	PP/400 $^{\circ}\text{C}$	2,2390	33.538,23	8.015,83
3	PP/500 $^{\circ}\text{C}$	0,2560	3.798,05	907,76

Berdasarkan Tabel 4.1, hasil pengujian menunjukkan bahwa suhu pirolisis memengaruhi nilai kalor bahan bakar cair yang dihasilkan. Hubungan antara kedua parameter tersebut bersifat berbanding terbalik, di mana peningkatan suhu pirolisis diikuti oleh penurunan nilai kalor. Nilai kalor tertinggi diperoleh pada suhu 300 $^{\circ}\text{C}$, yaitu sebesar 38.022,85 J/gram (9.087,68 Cal/gram). Ketika suhu dinaikkan menjadi 400 $^{\circ}\text{C}$, nilai kalor menurun menjadi 33.538,23 J/gram (8.015,83 Cal/gram), atau sekitar 11,8% lebih rendah dibandingkan pada suhu 300 $^{\circ}\text{C}$. Penurunan yang lebih signifikan terjadi pada suhu 500 $^{\circ}\text{C}$, dengan nilai kalor hanya sebesar 3.798,05 J/gram (907,76 Cal/gram), atau berkurang sekitar 88,6% dibandingkan dengan suhu 400 $^{\circ}\text{C}$. Penurunan nilai kalor pada suhu 400 $^{\circ}\text{C}$ diduga berkaitan dengan meningkatnya proses *cracking* yang menghasilkan hidrokarbon berantai karbon lebih pendek. Pada suhu 500 $^{\circ}\text{C}$, penurunan yang sangat tajam mengindikasikan terjadinya *over-cracking*, yaitu perengkahan lanjutan yang mengubah sebagian besar fraksi cair menjadi produk gas. Kondisi tersebut menyebabkan jumlah minyak pirolitik yang dihasilkan semakin sedikit sekaligus menurunkan kandungan energi yang dimilikinya. Berdasarkan nilai kalornya, minyak pirolitik yang diperoleh pada suhu 300 $^{\circ}\text{C}$ dan 400 $^{\circ}\text{C}$ masih berpotensi dimanfaatkan sebagai bahan bakar alternatif karena nilainya relatif mendekati standar bahan bakar solar komersial (± 45.000 J/gram), dengan selisih masing-masing sekitar 15,5% dan 25,5%. Sebaliknya, minyak pirolitik yang dihasilkan pada suhu 500 $^{\circ}\text{C}$ belum memenuhi kriteria untuk digunakan secara langsung sebagai bahan bakar karena nilai kalornya sangat rendah dan jauh di bawah standar bahan bakar komersial.



Gambar 4. 1 Grafik Nilai Kalor

Gambar 4.1 menyajikan hubungan antara suhu pirolisis dan nilai kalor minyak pirolitik yang dihasilkan dari limbah plastik Polypropylene (PP). Grafik menunjukkan

adanya kecenderungan penurunan nilai kalor seiring dengan meningkatnya suhu pirolisis. Nilai kalor tertinggi tercatat pada suhu 300°C sebesar 38.022,85 J/gram, kemudian menurun menjadi 33.538,23 J/gram pada suhu 400°C, dan turun secara signifikan hingga 3.798,05 J/gram pada suhu 500°C.

Selain menampilkan hasil pengujian minyak pirolitik, Gambar 4.1 juga memperlihatkan nilai kalor bahan bakar konvensional sebagai acuan, yaitu sekitar 45.000 J/gram untuk solar dan 47.000 J/gram untuk bensin. Hasil perbandingan menunjukkan bahwa minyak pirolitik yang dihasilkan pada suhu 300°C memiliki nilai kalor tertinggi, meskipun masih berada di bawah nilai kalor kedua bahan bakar tersebut. Tren pada grafik mengindikasikan bahwa peningkatan suhu pirolisis tidak selalu memberikan peningkatan kualitas bahan bakar cair. Pada suhu yang lebih tinggi, proses pirolisis justru menghasilkan minyak pirolitik dengan nilai kalor yang lebih rendah. Oleh karena itu, berdasarkan parameter nilai kalor, suhu 300°C merupakan kondisi operasi yang paling optimal pada penelitian ini..

Variasi nilai kalor minyak pirolitik dari plastik **Polypropylene (PP)** dipengaruhi oleh kondisi operasi selama proses pirolisis, terutama suhu, serta komposisi hidrokarbon yang terbentuk. Suhu pirolisis berperan penting dalam mengendalikan proses perengkahan (*cracking*), sehingga memengaruhi distribusi panjang rantai karbon pada produk cair yang dihasilkan. Pada suhu yang lebih rendah, proses perengkahan berlangsung lebih terbatas sehingga fraksi hidrokarbon yang terbentuk cenderung memiliki rantai karbon lebih panjang atau lebih berat [16]. Sedangkan suhu yang lebih tinggi mendorong terbentuknya hidrokarbon ringan yang lebih mudah terbakar sehingga nilai kalor meningkat, suhu yang terlalu tinggi dapat meningkatkan pembentukan gas non-kondensabel sehingga menurunkan jumlah dan kualitas fraksi cair [17]. Selain itu, faktor seperti waktu tinggal, laju pemanasan, dan kemurnian bahan baku juga memengaruhi nilai kalor, Kondisi proses yang optimal akan menghasilkan distribusi hidrokarbon yang lebih seimbang dan meningkatkan nilai kalor, sedangkan kondisi yang kurang optimal dapat menghasilkan fraksi berat atau residu yang menurunkan kualitas energi bahan bakar cair yang dihasilkan [18].

4.2 Densitas

Pengujian densitas bertujuan untuk menentukan karakteristik fisik yang dihasilkan pirolisis dari sampah polypropylene. Nilai densitas digunakan sebagai parameter dan indikator kesesuaian terhadap standar yang ditetapkan, sebelum pengukuran densitas dilakukan menimbang terlebih dahulu piknometer kosong dan piknometer yang sudah terisi ketiga sample tersebut. Data hasil timbang piknometer disajikan pada tabel.

Tabel 4. 2 Data Pengujian

Volume Piknometer	Massa Kosong Piknometer	Massa Isi Piknometer		
		Suhu		
		300°C	400°C	500°C
10 ml	19,27	29,55	29,38	29,58

Tabel 4.2 menyajikan hasil penimbangan massa piknometer pada kondisi kosong dan setelah diisi dengan sampel. Piknometer kosong memiliki berat 19,27 g, sedangkan sampel pertama yaitu piknometer yang berisi minyak PP dengan suhu 300°C memiliki berat 29,55 g, sampel kedua piknometer berisi minyak PP dengan suhu 400°C memiliki berat 29,38 g, sampel ketiga piknometer berisi minyak PP dengan suhu 500°C memiliki berat 29,58 g.

4.2.1 Densitas Suhu 300 °C

Densitas minyak pirolisis pada suhu 300°C adalah sebagai berikut:

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

$$\rho = \frac{29,55 - 19,27}{10}$$

$$\rho = 1,028 \text{ g/ml}$$

4.2.2 Densitas Suhu 400 °C

Densitas minyak pirolisis pada suhu 400°C adalah sebagai berikut:

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

$$\rho = \frac{29,38 - 19,27}{10}$$

$$\rho = 1,011 \text{ g/ml}$$

4.2.3 Densitas Suhu 500°C

Densitas minyak pirolisis pada suhu 400°C adalah sebagai berikut:

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

$$\rho = \frac{29,58 - 19,27}{10}$$

$$\rho = 1,031 \text{ g/ml}$$

4.2.4 Hasil Densitas

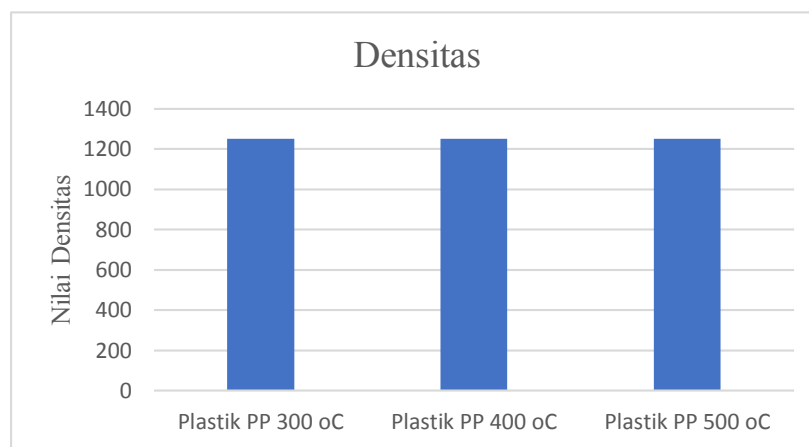
Hasil densitas minyak pirolisis adalah sebagai berikut:

Tabel 4. 3 Data Rendemen

No.	Jenis Sampel	Densitas (g/ml)
1	Minyak PP 300 °C	1,028
2	Minyak PP 400 °C	1,011
3	Minyak PP 500 °C	1,031

Berdasarkan Tabel 4.3, hasil perhitungan menunjukkan bahwa densitas minyak pirolitik yang dihasilkan dari plastik **Polypropylene (PP)** berbeda pada setiap variasi suhu pirolisis. Pada suhu 300°C, densitas minyak tercatat sebesar 1,028 g/mL, kemudian menurun menjadi 1,011 g/mL pada suhu 400°C. Ketika suhu pirolisis ditingkatkan menjadi 500°C, densitas kembali meningkat hingga mencapai 1,031 g/mL. Hasil tersebut menunjukkan bahwa suhu pirolisis memengaruhi karakteristik fisik minyak

pirolitik yang dihasilkan. Perbedaan nilai densitas pada setiap variasi suhu diduga berkaitan dengan perubahan komposisi senyawa hidrokarbon yang terbentuk selama proses perengkahan (*cracking*) rantai polimer. Meskipun demikian, hubungan antara suhu pirolisis dan densitas tidak menunjukkan kecenderungan yang linier. Densitas mengalami penurunan pada suhu 400°C sebelum kembali meningkat pada suhu 500°C. Untuk memberikan gambaran yang lebih jelas mengenai perbandingan nilai densitas pada setiap variasi suhu, data hasil perhitungan disajikan dalam bentuk grafik pada Gambar 4.3



Gambar 4. 2 Grafik Densitas

Gambar 4.3 menunjukkan adanya perbedaan densitas minyak pirolitik yang dihasilkan dari plastik Polypropylene (PP) pada setiap variasi suhu pirolisis. Nilai densitas yang diperoleh pada suhu 300°C, 400°C, dan 500°C masing-masing sebesar 1,028 g/mL, 1,011 g/mL, dan 1,031 g/mL. Hasil tersebut mengindikasikan bahwa perubahan suhu pirolisis memengaruhi karakteristik fisik minyak yang dihasilkan. Densitas menjadi salah satu parameter penting dalam penilaian kualitas minyak pirolitik karena mencerminkan komposisi hidrokarbon, distribusi fraksi dengan berat molekul yang berbeda, serta keberadaan residu atau pengotor yang terbentuk selama proses pirolisis.

Densitas minyak pirolitik yang diperoleh pada suhu pirolisis 300°C sebesar 1,028 g/mL. Nilai tersebut menunjukkan bahwa proses dekomposisi termal plastik Polypropylene (PP) belum berlangsung secara optimal. Pada suhu ini, proses *cracking* masih terbatas sehingga sebagian rantai polimer belum terurai sepenuhnya menjadi hidrokarbon dengan berat molekul yang lebih rendah. Akibatnya, minyak pirolitik masih mengandung fraksi hidrokarbon yang relatif berat, yang berkontribusi terhadap tingginya nilai densitas. Di samping itu, suhu operasi yang masih rendah berpotensi menghasilkan senyawa lilin (*wax*) atau residu hasil perengkahan yang belum sempurna, sehingga turut meningkatkan densitas minyak yang terbentuk.

Densitas minyak pirolitik yang dihasilkan pada suhu 400°C sebesar 1,011 g/mL, lebih rendah dibandingkan dengan minyak yang diperoleh pada suhu 300°C. Hasil ini menunjukkan bahwa peningkatan suhu membuat proses pirolisis berlangsung lebih efektif. Pada kondisi tersebut, proses *cracking* terjadi lebih intensif sehingga rantai polimer Polypropylene (PP) terurai menjadi hidrokarbon dengan berat molekul yang

lebih rendah. Akibatnya, fraksi cair yang terbentuk didominasi oleh senyawa yang lebih ringan, sehingga densitas minyak menurun. Nilai densitas terendah pada suhu 400°C mengindikasikan bahwa kondisi operasi ini menghasilkan minyak pirolitik dengan komposisi yang lebih homogen serta kandungan residu dan hidrokarbon berat yang lebih sedikit dibandingkan variasi suhu lainnya.

Namun, pada suhu 500°C densitas kembali meningkat menjadi 1,031 g/ml. Kenaikan densitas ini menunjukkan adanya perubahan karakteristik produk akibat temperatur yang terlalu tinggi. Pada suhu tinggi, proses secondary cracking dan reaksi lanjutan dapat menghasilkan senyawa aromatik, tar, maupun fraksi hidrokarbon kompleks yang memiliki massa molekul relatif lebih besar. Selain itu, peningkatan suhu juga dapat menyebabkan terbentuknya senyawa karbon tak jenuh dan residu cair yang lebih pekat sehingga densitas minyak meningkat kembali. Fenomena ini menunjukkan bahwa kenaikan suhu pirolisis tidak selalu menghasilkan penurunan densitas secara linier, karena komposisi kimia minyak sangat dipengaruhi oleh mekanisme reaksi termal yang terjadi selama proses pirolisis.

Perubahan nilai densitas minyak pirolitik dipengaruhi oleh komposisi hidrokarbon yang terbentuk selama proses dekomposisi termal plastik Polypropylene (PP). Pada suhu pirolisis yang lebih rendah, proses *cracking* masih terbatas sehingga sebagian besar produk cair masih mengandung hidrokarbon berantai panjang dengan massa molekul yang relatif besar. Dominasi fraksi hidrokarbon tersebut menyebabkan densitas minyak menjadi lebih tinggi. Sebaliknya, pada suhu 400°C proses *cracking* berlangsung lebih efektif sehingga rantai hidrokarbon panjang terurai menjadi senyawa yang lebih ringan dan lebih mudah menguap. Pergeseran komposisi inilah yang menyebabkan densitas minyak pirolitik menurun. [19]. Hal tersebut menyebabkan densitas minyak mengalami penurunan karena komponen penyusunnya didominasi oleh fraksi hidrokarbon dengan massa molekul lebih rendah, namun pada suhu 500°C densitas minyak kembali meningkat yang mengindikasikan terbentuknya senyawa hidrokarbon berat, residu karbon, maupun senyawa aromatik hasil reaksi sekunder selama proses pirolisis. Reaksi sekunder tersebut dapat meningkatkan kandungan senyawa dengan struktur molekul lebih kompleks sehingga massa jenis minyak menjadi lebih besar.

4.3 Rendemen

Pengujian rendemen bertujuan untuk menentukan persentase minyak pirolitik yang dihasilkan dari proses pirolisis limbah plastik **Polypropylene (PP)**. Parameter ini digunakan untuk menilai efektivitas konversi bahan baku menjadi produk cair pada setiap variasi suhu pirolisis. Semakin tinggi nilai rendemen yang diperoleh, semakin besar pula fraksi minyak pirolitik yang berhasil dihasilkan dari massa bahan baku yang diproses. Data hasil perhitungan rendemen disajikan dalam bentuk tabel sebagai dasar untuk menganalisis pengaruh variasi suhu terhadap produksi minyak pirolitik.

Tabel 4. 4 Data Rendemen

No.	Sampel	Massa plastik (g)	Massa minyak (g)	Waktu (menit)
1	Plastik PP 300 °C	1250	260	60 menit
2	Plastik PP 400 °C	1250	195	60 menit
3	Plastik PP 500 °C	1250	119	60 menit

4.3.5 Rendemen Suhu 300 °C

Rendemen minyak pirolisis pada suhu 300°C adalah sebagai berikut:

$$\text{Rendemen} = \frac{\text{Berat produk yang dihasilkan}}{\text{Berat bahan baku}} \times 100\%$$

$$\text{Rendemen} = \frac{260 \text{ g}}{1.250 \text{ g}} \times 100\%$$

$$\text{Rendemen} = 20,8\%$$

4.3.6 Rendemen Suhu 400 °C

Rendemen minyak pirolisis pada suhu 400°C adalah sebagai berikut:

$$\text{Rendemen} = \frac{\text{Berat produk yang dihasilkan}}{\text{Berat bahan baku}} \times 100\%$$

$$\text{Rendemen} = \frac{195 \text{ g}}{1250 \text{ g}} \times 100\%$$

$$\text{Rendemen} = 15,6\%$$

4.3.7 Rendemen Suhu 500 °C

Rendemen minyak pirolisis pada suhu 500°C adalah sebagai berikut:

$$\text{Rendemen} = \frac{\text{Berat produk yang dihasilkan}}{\text{Berat bahan baku}} \times 100\%$$

$$\text{Rendemen} = \frac{119 \text{ g}}{1250 \text{ g}} \times 100\%$$

$$\text{Rendemen} = 9,52\%$$

4.3.8 Hasil Rendemen

Hasil densitas minyak pirolisis adalah sebagai berikut:

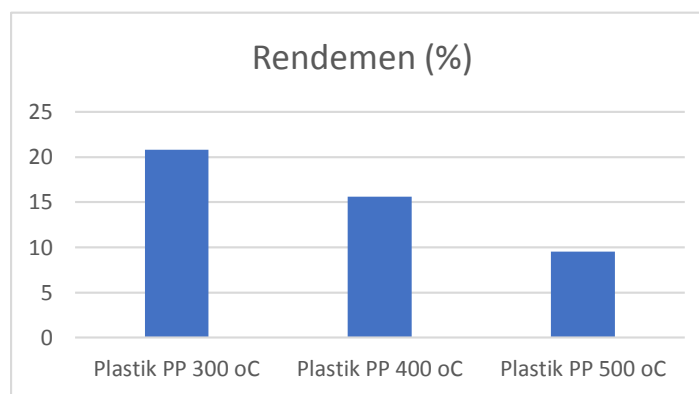
Tabel 4. 5 Hasil Rendemen

Suhu	Waktu	Rendemen%
300 °C	60 menit	20,8%
400 °C	60 menit	15,6%
500 °C	60 menit	9,52%

Berdasarkan hasil perhitungan, rendemen minyak pirolitik dari plastik Polypropylene (PP) cenderung menurun seiring dengan peningkatan suhu pirolisis. Pada suhu 300°C diperoleh rendemen tertinggi sebesar 20,8%, yang kemudian menurun menjadi 15,6% pada suhu 400°C dan kembali turun menjadi 9,52% pada suhu 500°C. Penurunan tersebut menunjukkan bahwa suhu yang lebih tinggi meningkatkan intensitas proses *cracking* sekunder. Akibatnya, sebagian hidrokarbon berantai panjang yang semula membentuk fraksi cair mengalami perengkahan lebih lanjut menjadi produk gas yang

tidak dapat dikondensasikan, sehingga jumlah minyak pirolitik yang dihasilkan menjadi lebih sedikit.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa hubungan antara suhu pirolisis dan rendemen tidak bersifat linier. Peningkatan suhu operasi tidak selalu diikuti oleh peningkatan jumlah minyak pirolitik yang dihasilkan. Pada suhu 300°C, proses dekomposisi Polypropylene (PP) masih menghasilkan fraksi cair dalam jumlah yang relatif tinggi karena proses *cracking* belum berlangsung secara berlebihan. Ketika suhu dinaikkan hingga 400°C dan 500°C, intensitas *cracking* meningkat sehingga sebagian hidrokarbon mengalami perengkahan lanjutan menjadi produk gas, seperti metana, etana, propana, dan senyawa volatil lainnya. Kondisi tersebut menyebabkan fraksi cair yang dapat dikondensasikan semakin berkurang, sehingga rendemen minyak pirolitik ikut menurun.



Gambar 4. 3 Grafik Rendemen

Berdasarkan grafik rendemen minyak pirolitik dari limbah plastik *Polypropylene* (PP), terlihat bahwa variasi suhu pirolisis memengaruhi jumlah produk cair yang dihasilkan. Rendemen tertinggi diperoleh pada suhu 300°C, yaitu sebesar 20,8%. Ketika suhu ditingkatkan menjadi 400°C, rendemen menurun menjadi 15,6%, kemudian kembali mengalami penurunan pada suhu 500°C hingga mencapai 9,52%. Hasil tersebut menunjukkan bahwa peningkatan suhu pirolisis cenderung diikuti oleh penurunan rendemen minyak pirolitik yang dihasilkan.

Penurunan rendemen pada suhu yang lebih tinggi terjadi karena proses perengkahan (*cracking*) rantai hidrokarbon berlangsung semakin intensif. Pada suhu 300°C, dekomposisi termal plastik *Polypropylene* (PP) masih menghasilkan fraksi hidrokarbon cair dalam jumlah yang relatif besar sehingga rendemen minyak pirolitik yang diperoleh lebih tinggi. Ketika suhu pirolisis dinaikkan menjadi 400°C dan 500°C, sebagian senyawa hidrokarbon cair mengalami perengkahan lanjutan menjadi gas-gas ringan, seperti metana, etana, propana, dan butana. Akibatnya, jumlah produk cair yang dapat dikondensasikan menjadi minyak pirolitik semakin berkurang sehingga nilai rendemen terus menurun.

Selain meningkatkan pembentukan gas, suhu yang lebih tinggi juga dapat memicu terbentuknya residu karbon serta meningkatkan kehilangan panas selama proses pirolisis. Hal ini mengakibatkan efisiensi pembentukan minyak cair menurun. Berdasarkan grafik, hubungan antara suhu pirolisis dan rendemen minyak menunjukkan

pola berbanding terbalik, di mana kenaikan suhu diikuti dengan penurunan rendemen yang cukup signifikan. Selisih rendemen antara suhu 300°C dan 500°C mencapai lebih dari 11%, sehingga dapat diketahui bahwa suhu operasi menjadi salah satu faktor utama yang memengaruhi distribusi produk hasil pirolisis plastik PP.

Nilai rendemen dipengaruhi oleh proses dekomposisi termal plastik polypropylene selama pirolisis berlangsung. Pada suhu 300°C, proses pemutusan rantai polimer belum berlangsung secara optimal sehingga rendemen minyak yang dihasilkan masih tinggi yaitu sebesar 20,8% [20]. Peningkatan suhu hingga 400°C menyebabkan proses cracking berlangsung lebih efektif sehingga sebagian fraksi cair terurai menjadi gas, yang mengakibatkan rendemen menurun menjadi 15,6%. Pada suhu 500°C, rendemen kembali menurun menjadi 9,52% akibat cracking sekunder yang semakin dominan [21]. Pada kondisi ini, senyawa hidrokarbon cair banyak terurai menjadi gas non-kondensabel dan residu karbon sehingga jumlah minyak yang terkondensasi semakin sedikit. Dengan demikian, semakin tinggi suhu pirolisis maka rendemen minyak polypropylene cenderung menurun karena produk lebih banyak berubah menjadi fraksi gas [22].

6. Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian dan analisis yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa variasi suhu pirolisis memengaruhi karakteristik minyak pirolitik yang dihasilkan dari limbah plastik Polypropylene (PP), yang ditinjau dari nilai kalor, densitas, dan rendemen. Adapun kesimpulan penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Variasi suhu pirolisis berpengaruh terhadap rendemen minyak pirolitik yang dihasilkan dari limbah plastik Polypropylene (PP). Rendemen tertinggi diperoleh pada suhu 300°C sebesar 20,8%, kemudian menurun menjadi 15,6% pada suhu 400°C dan 9,52% pada suhu 500°C. Hasil tersebut menunjukkan bahwa peningkatan suhu mempercepat proses *cracking*, sehingga sebagian besar hidrokarbon berubah menjadi fraksi gas dan menyebabkan rendemen minyak pirolitik menurun.
2. Variasi suhu pirolisis memengaruhi nilai kalor minyak pirolitik yang dihasilkan dari limbah plastik Polypropylene (PP). Nilai kalor tertinggi diperoleh pada suhu 300°C sebesar 38.022,85 J/gram (9.087,68 Cal/gram), kemudian menurun menjadi 33.538,23 J/gram (8.015,83 Cal/gram) pada suhu 400°C dan 3.798,05 J/gram (907,76 Cal/gram) pada suhu 500°C. Hasil tersebut menunjukkan bahwa suhu 300°C menghasilkan minyak pirolitik dengan kandungan energi paling tinggi, sehingga menjadi kondisi operasi terbaik berdasarkan parameter nilai kalor.
3. Variasi suhu pirolisis juga berpengaruh terhadap densitas minyak pirolitik yang dihasilkan dari limbah plastik Polypropylene (PP). Nilai densitas yang diperoleh pada suhu 300°C, 400°C, dan 500°C berturut-turut sebesar 1,028 g/mL, 1,011 g/mL, dan 1,031 g/mL. Densitas terendah diperoleh pada suhu 400°C, sedangkan densitas tertinggi terjadi pada suhu 500°C. Temuan ini menunjukkan bahwa perubahan suhu pirolisis memengaruhi karakteristik fisik minyak

pirolitik akibat perubahan komposisi dan distribusi fraksi hidrokarbon selama proses dekomposisi termal.

5.2 Saran

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, beberapa saran berikut diharapkan dapat menjadi masukan bagi penelitian selanjutnya serta mendukung pengembangan pemanfaatan hasil penelitian ini.

1. Penelitian selanjutnya diharapkan dapat mengeksplorasi rentang suhu pirolisis yang lebih luas sehingga suhu operasi optimum untuk menghasilkan bahan bakar cair dari limbah plastik Polypropylene (PP) dapat diidentifikasi dengan lebih akurat.
2. Penelitian selanjutnya disarankan melengkapi pengujian karakteristik bahan bakar dengan beberapa parameter tambahan, seperti viskositas, *flash point*, dan analisis komposisi kimia, sehingga kualitas minyak pirolisis dapat dievaluasi secara lebih komprehensif.
3. Penelitian selanjutnya perlu mengkaji pengaruh parameter lain, seperti waktu pirolisis, laju pemanasan, dan penggunaan katalis, untuk mengetahui pengaruhnya terhadap peningkatan rendemen serta kualitas bahan bakar cair yang dihasilkan.

Referensi

- [1] Rezi, R., & Rahayu, I. (2025). Transformasi Kebijakan Pengelolaan Sampah Plastik Global Pasca Global Plastics Treaty: Implikasi Bagi Regulasi Nasional di Indonesia. *JIIP - Jurnal Ilmiah Ilmu Pendidikan*, 8(3), 3320–3326. <https://doi.org/10.54371/jiip.v8i3.7557>
- [2] Rahman, I., Larasati, C. E., Waspodo, S., Gigentika, S., & Jefri, E. (2021). Pengelolaan Sampah Plastik Menjadi Ekobrik Untuk Menekan Laju Pencemaran Sampah Mikroplastik Yang Mengancam Kelangsungan Hidup Biota Perairan Teluk Bumbang, Kabupaten Lombok Tengah. *Indonesian Journal of Fisheries Community Empowerment*, 1(1), 62–68. <https://doi.org/10.29303/jppi.v1i1.82>
- [3] Hidayat, A. T., & Kusmiyati, K. (2025). Pemanfaatan Sampah Plastik PET (Polyethylene Terephthalate) dan PP (Polypropylene) Menggunakan Proses Pirolisis menjadi Bahan Bakar Minyak. *Ranah Research : Journal of Multidisciplinary Research and Development*, 7(4), 2840–2854. <https://doi.org/10.38035/rrj.v7i4.1569>
- [4] Selpiana, S., Yunita Bayu Ningsih, R., Wulandari Putri, R., Daffa Umar Syauqi, M., & Hidayatullah, N. (2021). Sintesis Bahan Bakar Padat Berbahan Baku Residu (Char) Hasil Pirolisis Limbah Plastik. *Indonesian Journal of Industrial Research*, 32(1), 75–84. <https://www.neliti.com/publications/446559/>
- [5] Sa'diyah, K., Suharti, P. H., Hendrawati, N., Pratamasari, F. A., & Rahayu, O. M. (2021). Pemanfaatan Serbuk Gergaji Kayu sebagai Karbon Aktif melalui Proses Pirolisis dan Aktivasi Kimia. *CHEESA: Chemical Engineering Research Articles*, 4(2), 91. <https://doi.org/10.25273/cheesa.v4i2.8589.91-99>
- [6] Keshmiry, A., Hassani, S., Mousavi, M., & Dackermann, U. (2023). Effects of Environmental and Operational Conditions on Structural Health Monitoring and Non-Destructive Testing: A Systematic Review. *Buildings*, 13(4). <https://doi.org/10.3390/buildings13040918>
- [7] Novita, S. A., Fudholi, A., Dكتورال, P., Pertanian, I., Andalas, U., Studi, P., Industri, T., Andalas, U., Agribisnis, P. S., Andalas, U., Studi, P., Pertanian, T., Andalas, U., Indonesia, P., & Korespondesi, P. (2021). *www.agroteknika.id*. 4(1),

53–67.

- [8] Zabaniotou, A. (2023). *Circular economy and industrial symbiosis_phd*
- [9] Sania, S., & Rubianto, L. (2023). Studi Literatur Pengaruh Suhu Pemanasan Dan Jenis Katalis Terhadap Produksi Minyak Pirolisis Sampah Plastik. *DISTILAT: Jurnal Teknologi Separasi*, 6(2), 171–175. <https://doi.org/10.33795/distilat.v6i2.72>
- [10] Susanto, H., Aji, B. S., Solikhah, M. D., Nugroho, B. A., Mawardi, R., Susilawati, H. L., Cahyono, T., Wahyuni, T., Sasongko, N. A., & Martini, T. (2024). Fuel Characteristics of Pyrolysis Oil from Plastic Waste: A Case Study of Banjarnegara Waste Bank. *Evergreen*, 11(3), [2404–2414](https://doi.org/10.5109/7236883). <https://doi.org/10.5109/7236883>
- [11] Gonzalez-Aguilar, A. M., Cabrera-Madera, V. P., Vera-Rozo, J. R., & Riesco-Ávila, J. M. (2022). Effects of Heating Rate and Temperature on the Thermal Pyrolysis of Expanded Polystyrene Post-Industrial Waste. *Polymers*, 14(22). <https://doi.org/10.3390/polym14224957>
- [12] Rosmainar, L., Tukan, D. N., & Deviyanti, M. (2021). *Perbandingan Plastik Dari Material-Material Bioplastik Plastic Comparison of Bioplastic Materials*. 03(01), 19–28.
- [13] Adoe, D. G. H., Satria, D. Y., & Sanusi, A. (2023). Karakterisasi Minyak Hasil Pirolisis Berbahan Dasar Limbah Plastik Jenis Polypropylene (PP). *LONTAR Jurnal Teknik Mesin Undana*, 10(02), 15–22. <https://doi.org/10.35508/ljtmu.v10i02.13435>.
- [14] Pyrolysis, H., Campuran, D., & Dan, P. (2022). *Azamataufiq Budiprasojo, Aditya Wahyu Pratama, Nilai Kalor Bahan Bakar Plastik Polypropilene (BBPP)mHasil Pyrolysis dengan Campuran Premium dan Octane Booster*. 122–127.
- [15] Febriana, I., Putri, A. M., & Silviyati, I. (2023). ANALISIS KONSUMSI ENERGI SPESIFIK PIROLISATOR DOUBLE KONDENSOR PADA KONVERSI LIMBAH BIOMASSA. 8(2021), 2019–2024.
- [16] Sofia Jati Wardani¹, Mohammad Fahrurrozi², H. S. (2024). *e-ISSN 2774-5155 p-ISSN 2774-5147*. 537–545.
- [17] Azis, N., Erwin, A., Putra, E., & Kusumawati, D. (2022). Analisis Karakteristik Minyak Jelantah Hasil Perlakuan Plasma. 20(2), 250–258.
- [18] Hydrotreating, U., & Pt, D. I. (2022). MAKSIMASI % YIELD GAS OIL DI KOLOM FRAKSINASI 14-C-102. 2(November), 522–528.
- [19] Of, P., Fuel, L., Waste, F., Polypropylene, P., & Pyrolysis, P. P. (2021). Journal of Chemical Process Engineering Produksi Bahan Bakar Cair Dari Limbah Plastik Polypropylene (PP). 6(2655).
- [20] Nofiyanto, R., & Nugraha, D. (2019). Studi Proses Pirolisis Berbahan Jerami Padi terhadap Hasil Produksi Char dan Tar. *Prosiding Seminar Nasional Energi*, 11(1), 55–61.
- [21] Hidayat, A. T. (2025). Pemanfaatan Sampah Plastik PET (Polyethylene Terephthalat e) dan PP (Polypropylene) Menggunakan Proses Pirolisis menjadi Bahan Bakar Minyak. 7(4), 2840–2854.
- [22] Of, I., Time, R., The, T. O., Of, P., From, P., & Waste, P. (2020). Multitek Indonesia : Jurnal Ilmiah. 6223(1), 34–40.
- [23] Abidin, A., Nurhalim, N., Ridlo, M. Z., Rizkina, F. D., Al-Rosyid, L. M., & Iswanto, F. F. (2025). Studi Eksperimental Hydrothermal Carbonization (HTC) Batang Tembakau untuk Optimalisasi Nilai Kalor: Pengaruh Temperatur dan Residence Time. *Turbo: Jurnal Program Studi Teknik Mesin*, 14(1).
- [24] Kurniawan, B. D., Abidin, A., & Kosjoko, K. (2025). Pengaruh Variasi Suhu Pirolisis terhadap Karakteristik Bio-Oil dari Limbah Batang Tembakau sebagai Bahan Bakar Alternatif. *Journal of Applied Mechanical Engineering and Renewable Energy*, 5(2), 83–87.