

Rancang Bangun Mesin Konversi Sampah Plastik Menjadi Minyak Mentah Melalui Proses Pirolisis Dengan Variasi Material Plastik PP Dan LDPE

Ardika Rendi Hadi Ansyah¹, Hisyam Ma'mun², Muhamad Safi'i³

Progam Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik Dan Informatika, Universitas PGRI Semarang, Indonesia

Email: ¹ardikarendi562@gmail.com, ²hisyam@upgris.ac.id, ³muhamadsafii@upgris.ac.id

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

Info Artikel	Abstrak
Kata Kunci: Pirolisis. Limbah Plastik. Polypropylene (PP). Low-Density Polyethylene (LDPE). Rendemen Minyak.	Plastik merupakan polimer sintesis yang diproduksi dari nafta sebagai salah satu fraksi hasil penyulingan minyak bumi. Material ini memiliki ikatan kimia yang kuat sehingga banyak dimanfaatkan dalam berbagai kebutuhan sehari-hari. Meningkatnya penggunaan plastik menyebabkan jumlah limbah terus bertambah dan berpotensi menimbulkan pencemaran lingkungan. Salah satu teknologi yang dapat diterapkan untuk mengatasi permasalahan tersebut adalah pirolisis, yaitu proses konversi limbah plastik menjadi minyak pirolisis melalui dekomposisi termal. Penelitian ini bertujuan merancang serta mengevaluasi kinerja mesin pirolisis sederhana dalam mengolah limbah plastik jenis <i>Polypropylene</i> (PP) dan <i>Low-Density Polyethylene</i> (LDPE) menjadi minyak pirolisis. Kebaruan penelitian ini terletak pada pengembangan mesin pirolisis skala laboratorium yang dievaluasi berdasarkan temperatur operasi dan rendemen minyak dari dua jenis plastik yang berbeda. Pengujian dilakukan pada temperatur reaktor 200°C selama 120 menit, kemudian uap hasil pirolisis dikondensasikan menjadi minyak cair. Hasil pengujian menunjukkan bahwa 280 g plastik PP menghasilkan 60 mL minyak pirolisis dengan massa 45 g atau rendemen 16,07%, sedangkan 150 g plastik LDPE menghasilkan 30 mL minyak dengan massa 20 g atau rendemen 13,33%. Hasil tersebut menunjukkan bahwa plastik PP menghasilkan rendemen minyak yang lebih tinggi dibandingkan LDPE pada kondisi operasi yang sama. Penelitian ini memberikan kontribusi terhadap pengembangan mesin pirolisis skala laboratorium yang memiliki konstruksi sederhana, mudah dioperasikan, serta berpotensi menjadi alternatif teknologi pengolahan limbah plastik sekaligus menghasilkan bahan bakar cair yang bernilai ekonomi.
Keywords : Pyrolysis. Plastic Waste. Polypropylene (PP). Low-Density Polyethylene (LDPE). Oil Yield.	Plastic is a synthetic polymer produced from naphtha, one of the fractions obtained from petroleum refining. Due to its strong chemical bonds, plastic is widely used in various daily applications. However, the increasing consumption of plastic has led to a significant accumulation of plastic waste, posing serious environmental pollution risks. One promising technology for addressing this issue is pyrolysis, a thermal decomposition process that converts plastic waste into pyrolysis oil. This study aims to design and evaluate the performance of a simple pyrolysis machine for converting Polypropylene (PP) and Low-Density Polyethylene (LDPE) plastic waste into pyrolysis oil. The novelty of this research lies in the development of a laboratory-scale pyrolysis machine and the evaluation of its performance based on operating temperature and oil yield from two different types of plastic. The experiments were conducted at a reactor temperature of 200°C for 120 minutes, after which the pyrolysis vapors were condensed into liquid

oil. The results showed that 280 g of PP produced 60 mL of pyrolysis oil with a mass of 45 g, corresponding to an oil yield of 16.07%, while 150 g of LDPE produced 30 mL of oil with a mass of 20 g, corresponding to an oil yield of 13.33%. These findings indicate that PP produced a higher oil yield than LDPE under the same operating conditions. This study contributes to the development of a laboratory-scale pyrolysis machine with a simple design and easy operation, demonstrating its potential as an alternative technology for plastic waste management while producing liquid fuel with economic value.

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



1. PENDAHULUAN

Plastik merupakan material polimer sintetis yang diproduksi dari nafta, yaitu fraksi hasil penyulingan minyak bumi yang diolah melalui proses petrokimia. Sifatnya yang kuat, ringan, dan tahan terhadap berbagai kondisi lingkungan menyebabkan plastik banyak digunakan dalam berbagai sektor. Namun, karakteristik tersebut juga menyebabkan limbah plastik sulit terurai sehingga menjadi salah satu sumber pencemaran lingkungan. Salah satu teknologi yang dapat dimanfaatkan untuk mengatasi permasalahan tersebut adalah pirolisis, yaitu proses dekomposisi termal tanpa oksigen yang mampu mengonversi limbah plastik menjadi minyak pirolisis. Berbagai penelitian terdahulu umumnya berfokus pada pengaruh temperatur, penggunaan katalis, atau karakterisasi minyak hasil pirolisis. Akan tetapi, penelitian mengenai rancang bangun mesin pirolisis yang disertai evaluasi kinerja termal dan rendemen minyak masih terbatas. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan merancang dan membangun mesin pirolisis serta mengevaluasi kinerjanya berdasarkan temperatur reaktor, temperatur minyak, massa minyak, volume minyak, dan rendemen pada plastik *Polypropylene* (PP) dan *Low-Density Polyethylene* (LDPE). Kebaruan penelitian ini terletak pada pengembangan mesin pirolisis dengan desain sederhana yang dikombinasikan dengan analisis kinerja termal untuk mengevaluasi efektivitas konversi limbah plastik menjadi minyak pirolisis[1]. Indonesia adalah termasuk negara dengan tingkat penggunaan plastik dengan tingkat penggunaan yang sangat tinggi. Penggunaan plastik yang besar dalam berbagai kegiatan sehari-hari berkontribusi pada peningkatan jumlah limbah plastik yang dihasilkan[2]. Sampah plastik berasal dari berbagai jenis sumber, termasuk dari rumah, rumah sakit, tempat rekreasi, sekolah, kantor, serta berbagai kegiatan lainnya[3]. Seiring berjalannya waktu, volume sampah yang dihasilkan mengalami peningkatan seiring bertambahnya penduduk, kemajuan ekonomi, serta meningkatnya aktivitas serta pola penggunaan masyarakat. Jika kenaikan volume sampah ini tidak didukung oleh sistem pengelolaan yang efektif, maka masalah lingkungan yang timbul akan menjadi semakin kompleks dan dapat menimbulkan dampak negatif yang lebih serius bagi lingkungan serta kesehatan masyarakat[4]. Saat ini, sampah plastik telah menjadi salah satu persoalan utama lingkungan yang cukup serius di berbagai negara, termasuk Indonesia. Keberadaan limbah plastik dapat menyebabkan efek buruk terhadap lingkungan serta makhluk hidup karena sulitnya bahan ini untuk terurai secara alami[5].

Dengan demikian, volume limbah plastik yang terus bertambah dan menumpuk di sekitar kita perlu ditangani dengan cara yang lebih kreatif dan bermanfaat. Salah satu upaya dalam memanfaatkan sampah tersebut dilakukan dengan mengubahnya sebagai sumber energi alternatif melalui teknologi pirolisis[6]. Pirolisis adalah metode pemecahan bahan organik dengan cara pemanasan pada suhu tinggi tanpa adanya oksigen, sehingga bahan tersebut terdesak menjadi hasil berupa gas, cair, dan endapan. Teknologi pirolisis adalah proses dekomposisi material melalui reaksi kimia pada temperatur tinggi pada kondisi bebas oksigen maupun dengan jumlah oksigen yang sangat minim di dalam sebuah reaktor[7]. Penelitian ini dilakukan untuk merancang dan membangun tabung pirolisis dalam perangkat yang memanfaatkan limbah plastik untuk menghasilkan bahan bakar cair menggunakan elemen pemanas sebagai sumber energi panas[8]. Unit pirolisis umumnya terdiri dari oven pemanas, reaktor, alat penukar panas (kondensor), dan wadah untuk hasil minyak bakar. Oven pemanas memberikan suhu yang dibutuhkan reaktor untuk melelehkan limbah kantong guna menghasilkan uap[9]. Proses pirolisis terbagi menjadi dua elemen utama, yaitu reaktor dan kondensor. Reaktor berperan sebagai lokasi di mana sampah plastik dipanaskan pada temperatur tinggi sehingga menghasilkan uap atau gas dari dekomposisi termal. Uap atau gas yang dihasilkan kemudian diteruskan ke kondensor. Kondensor bertindak sebagai perangkat penukar panas yang mengubah gas atau uap dari proses pirolisis menjadi bentuk cair melalui proses kondensasi. Hal ini terjadi karena panas dari gas hasil pirolisis berpindah menuju fluida pendingin yang memiliki suhu lebih rendah,

yaitu air yang mengalir di dalam kondensor. Sebagai hasil dari perpindahan panas ini, suhu uap menurun dan bertransformasi menjadi cairan berupa minyak dari pirolisis[10].

Proses pirolisis plastik memecah sampah plastik menjadi barang yang lebih berharga, seperti minyak pirolisis, gas, dan char. Dalam tahap ini, kondensor memiliki fungsi krusial dengan mendinginkan uap plastik yang dihasilkan selama pirolisis dan mengubahnya kembali menjadi bentuk cair, yaitu minyak pirolisis[11]. Studi numerik pada pirolisis *gas-fired industrial burners* dengan memvariasikan power pembakaran sebesar 200kW, 700kW, dan 1000kW serta tekanan operasi sebesar 105,5 kPa dan 211 kPa terhadap efisiensi sistem tersebut. Hasil studi numerik didapatkan bahwa nilai efisiensi terbesar diperoleh pada variasi power pembakaran sebesar 1000kW dan operasi tekanan sebesar 211 kPa dengan nilai efisiensi 63,03%[12]. Penelitian sebelumnya mengenai pengolahan limbah plastik untuk menghasilkan bahan bakar cair melalui metode pirolisis menunjukkan bahwa metode ini berhasil dalam mengolah limbah plastik menjadi bahan bakar cair. Dari penelitian ini, didapatkan bahwa kondisi optimal terjadi pada suhu 400°C dengan waktu pemanasan selama 40 menit. Pada kondisi ini, didapatkan volume minyak sebanyak 39 ml dengan nilai yield maksimum mencapai 5,0410%. Hasil penelitian menunjukkan bahwa temperatur dan waktu pemanasan merupakan faktor utama yang menentukan keberhasilan proses pirolisis serta jumlah bahan bakar cair yang dihasilkan [13]. Penelitian terdahulu mengenai konversi limbah plastik menjadi bahan bakar cair menggunakan teknologi pirolisis telah banyak dilaksanakan, terutama menggunakan plastik jenis LDPE maupun campuran berbagai jenis plastik. Hasil dari penelitian tersebut mengindikasikan bahwa tipe plastik memengaruhi jumlah minyak yang dapat diproduksi. Dalam proses pirolisis yang dilakukan pada 150 gram plastik LDPE, diperoleh hasil minyak sebesar 23,5 ml, sedangkan untuk 150 gram plastik campuran dihasilkan minyak sebanyak 40 ml. Temuan ini menunjukkan bahwa plastik campuran berpotensi menghasilkan volume minyak yang lebih besar dibanding plastik LDPE pada kondisi pengujian tersebut[14]. Penelitian terdahulu tentang penilaian pirolisis limbah plastik domestik menggunakan reaktor listrik dengan kapasitas 2000 watt dalam konteks ekonomi sirkular. Temuan mengungkapkan bahwa proses pirolisis termal dapat memproses berbagai jenis plastik rumah tangga menjadi produk dari pirolisis. Penelitian ini menggunakan reaktor listrik dengan daya 2000 W yang dioperasikan pada rentang suhu 450–500°C selama 4–5 jam. Hasil penelitian menunjukkan bahwa delapan jenis plastik rumah tangga memiliki karakteristik dekomposisi termal yang berbeda, sebagaimana ditunjukkan oleh perbedaan volume residu padat dan residu cair yang diperoleh[15].

Penelitian sebelumnya mengenai pirolisis limbah plastik PP dan LDPE dengan penambahan katalis zeolit alami berfokus pada evaluasi kualitas minyak pirolisis berdasarkan nilai massa jenis. Hasil analisis menunjukkan bahwa penggunaan katalis zeolit alami tidak memberikan pengaruh yang signifikan terhadap densitas minyak yang dihasilkan. Temuan tersebut mengindikasikan bahwa penelitian lebih menitikberatkan pada karakteristik produk minyak, sedangkan aspek desain mesin, distribusi temperatur, dan kinerja termal selama proses pirolisis belum dianalisis secara mendalam. Selain itu, sebagian besar penelitian terdahulu mengkaji pengaruh katalis atau variasi parameter proses terhadap kualitas produk, namun masih terbatas dalam menghubungkan desain alat dengan performa proses konversi limbah plastik. Oleh karena itu, diperlukan penelitian yang tidak hanya mengevaluasi produk hasil pirolisis, tetapi juga mengkaji kinerja mesin sebagai dasar pengembangan teknologi pirolisis yang lebih efektif. Selain itu, hasil pengujian memperlihatkan bahwa densitas bahan bakar cair yang diperoleh dari sampel PP serta PP dengan katalis hampir mencapai standar densitas bensin RON 88 sesuai SNI 3506:2017, yaitu berada dalam rentang 715–850 kg/m³[16]. Penelitian terkait optimasi proses pirolisis limbah plastik LDPE dengan menerapkan metode RSM (*Response Surface Methodology*) bertujuan meneliti cara terbaik untuk mengolah plastik LDPE melalui metode statistik *Response Surface Methodology* yang berlandaskan pada *Central Composite Design* (CCD). Dalam studi ini, dua variabel yang digunakan adalah laju pemanasan dan berat katalis zeolit alami untuk menemukan kondisi terbaik dalam produksi minyak pirolisis. Penelitian ini menunjukkan bahwa kondisi yang paling optimal dicapai dengan laju pemanasan 10°C/menit serta massa katalis sebesar 24,04 gram, yang menghasilkan volume minyak 523,83 mL atau *yield* mencapai 52,38%. Model kuadratik yang diperoleh menunjukkan nilai koefisien determinasi (R^2) sebesar 0,9394, yang menandakan kemampuan prediksi proses dengan tingkat akurasi yang tinggi[17]. Penelitian mengenai pengolahan limbah plastik jenis *Polypropylene* (PP) melalui proses pirolisis menunjukkan bahwa plastik PP berpotensi dimanfaatkan sebagai sumber energi alternatif. Penelitian tersebut mengoptimalkan temperatur dan waktu pirolisis, dengan kondisi terbaik diperoleh pada temperatur 400°C yang menghasilkan bahan bakar cair sebesar 79,85%, sedangkan waktu optimum 25 menit menghasilkan *yield* sebesar 72,19%. Hasil tersebut menunjukkan bahwa penelitian terdahulu lebih berfokus pada optimasi parameter operasi untuk meningkatkan hasil minyak pirolisis[18]. Namun, penelitian tersebut belum mengkaji aspek rancang bangun mesin pirolisis dan evaluasi kinerja alat berdasarkan parameter temperatur reaktor, temperatur minyak, volume minyak, massa minyak, dan rendemen hasil pirolisis. Oleh karena itu, penelitian ini mengisi *research gap* tersebut melalui pengembangan mesin pirolisis skala laboratorium dengan konstruksi sederhana yang dievaluasi berdasarkan parameter-parameter tersebut pada limbah plastik PP dan LDPE. Kebaruan penelitian ini terletak pada integrasi antara rancang bangun mesin dan evaluasi kinerja proses pirolisis, sehingga memberikan kontribusi teknis yang belum dibahas secara komprehensif dalam penelitian sebelumnya.

Pada studi ini, fokus utama berada pada pengembangan konstruksi mesin pirolisis yang menggunakan campuran sampah plastik dari jenis PP dan LDPE sebagai bahan dasar utama dalam proses perubahan menjadi minyak mentah. Hasil dari percobaan menunjukkan bahwa di suhu reaktor yang serupa, yaitu 200°C, dan dengan durasi proses selama 120 menit, plastik PP yang memiliki berat awal 280 g memproduksi minyak sebanyak 60 ml dengan berat 45 g dan suhu minyak sebesar 33,3°C. Di sisi lain, plastik LDPE yang berat awalnya 150 g menghasilkan minyak sebanyak 30 ml dengan berat 20 g dan suhu minyak sebesar 31,9°C. Penelitian yang telah dilakukan sebelumnya biasanya hanya memakai satu jenis plastik tertentu dan lebih terfokus pada dampak suhu, lama waktu proses, atau penggunaan katalis terhadap produk minyak pirolisis. Di sisi lain, penelitian ini tidak hanya mengkaji hasil minyak yang diperoleh, tetapi juga berusaha untuk menciptakan desain mesin pirolisis yang lebih sederhana dan lebih ekonomis. Penelitian ini memiliki dampak yang signifikan di sektor lingkungan, ekonomi, dan teknologi. Dalam hal lingkungan, alat pirolisis yang dibuat dapat membantu mengurangi dampak pencemaran yang timbul akibat akumulasi sampah plastik jenis PP dan LDPE yang sulit terurai secara alami. Metode pirolisis merupakan teknologi yang mampu mengonversi limbah plastik menjadi bahan bakar alternatif, sehingga mendukung pengelolaan limbah yang mendukung kelestarian lingkungan. Dari sudut pandang ekonomi, minyak hasil pirolisis berpotensi memiliki nilai ekonomis yang tinggi dan dapat digunakan sebagai alternatif bahan bakar, yang berkontribusi pada peningkatan nilai ekonomi dari limbah plastik. Di samping itu, penerapan mesin pirolisis yang sederhana dan terjangkau dapat menciptakan peluang bisnis dalam pengolahan limbah plastik yang dapat dimanfaatkan oleh masyarakat serta pelaku UMKM[19].

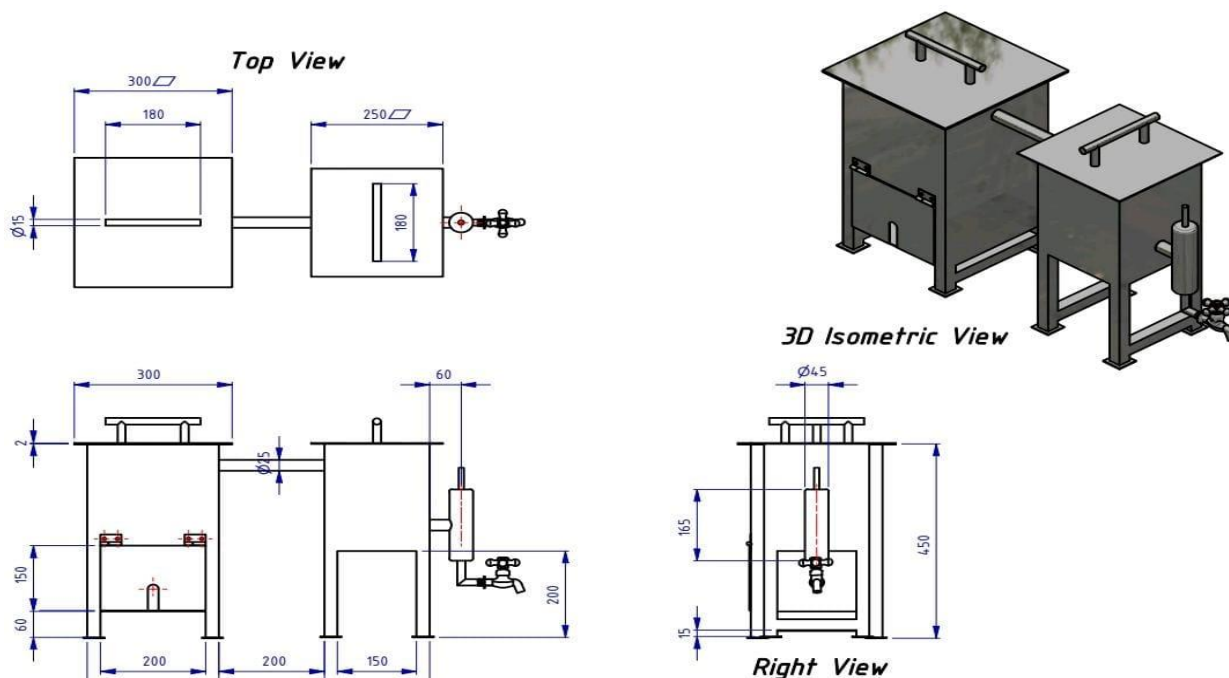
2. METODOLOGI PENELITIAN

2.1 Model Fisik

Gambar 1 merupakan rancangan desain mesin pirolisis plastik yang digunakan untuk mengubah limbah plastik menjadi minyak mentah melalui proses pemanasan tanpa oksigen. Rancangan alat terdiri dari beberapa tampilan gambar teknik yaitu pandangan atas (*top view*), pandangan depan (*front view*), dan pandangan samping (*side view*), dan tampilan tiga dimensi (3D *isometric view*). Dari gambar tersebut terlihat bahwa alat memiliki dua bagian utama, yaitu reaktor pirolisis sebagai tempat pembakaran plastik dan kondensor sebagai tempat pendinginan uap hasil pirolisis agar berubah menjadi minyak cair. Kedua bagian tersebut dihubungkan menggunakan pipa pengalir uap sehingga proses konversi dapat berlangsung secara tertutup dan lebih aman. Pada tampak atas terlihat dimensi reaktor utama sekitar 300 mm dan kondensor sekitar 250 mm. Selain itu terlihat pula pipa penghubung berdiameter 25 mm yang berfungsi sebagai jalur aliran uap hasil pemanasan plastik menuju kondensor. Tata letak ini menunjukkan bahwa sistem dirancang sederhana dan efisien untuk mempermudah aliran uap dari reaktor menuju sistem pendingin. Bentuk reaktor dibuat menyerupai tabung kotak agar kapasitas penampungan limbah plastik lebih besar dan proses pemanasan dapat berlangsung merata. Pada tampak depan terlihat struktur rangka penyangga alat dengan tinggi sekitar 450 mm yang berfungsi menopang seluruh komponen mesin. Reaktor dilengkapi penutup pada bagian atas yang digunakan untuk memasukkan bahan plastik sekaligus menjaga agar tidak terjadi kebocoran uap selama proses pirolisis berlangsung. Di bagian bawah reaktor terdapat ruang pembakaran yang berperan sebagai sumber energi panas. Energi panas tersebut selanjutnya akan memecah rantai polimer plastik menjadi uap hidrokarbon. Selanjutnya uap dialirkan menuju kondensor untuk didinginkan. Pada bagian kondensor terdapat saluran keluaran dan kran yang digunakan untuk mengambil minyak hasil pirolisis. Pada tampak samping terlihat sistem kondensor vertikal yang berfungsi sebagai media pendingin uap hasil pirolisis. Kondensor ini bekerja dengan cara menurunkan temperatur uap sehingga berubah menjadi cairan berupa minyak. Penempatan kran pada bagian bawah bertujuan agar minyak hasil kondensasi dapat keluar dan ditampung dengan mudah. Desain kondensor vertikal juga membantu meningkatkan proses pendinginan karena uap memiliki waktu kontak lebih lama dengan dinding pendingin. Secara keseluruhan, rancangan mesin pirolisis ini memiliki konstruksi yang sederhana namun cukup efektif untuk pengolahan limbah plastik untuk menghasilkan bahan bakar alternatif.

Mesin pirolisis yang digunakan pada penelitian ini terdiri atas reaktor, kondensor, pipa penyalur uap, rangka penyangga, dan sistem pemanas. Reaktor dan rangka dibuat dari material logam yang memiliki ketahanan terhadap temperatur tinggi sehingga mampu mempertahankan stabilitas selama proses pirolisis berlangsung. Sistem dirancang dalam kondisi tertutup untuk meminimalkan kebocoran uap hasil dekomposisi termal dan meningkatkan efisiensi proses kondensasi menjadi minyak. Pengujian dilakukan pada suhu operasi 200°C yang dipilih berdasarkan kemampuan sistem pemanas serta untuk menjaga kondisi operasi tetap konstan selama pengujian, sehingga pengaruh jenis plastik terhadap hasil pirolisis dapat diamati secara objektif. Temperatur reaktor diukur menggunakan termokopel yang dipasang pada dinding reaktor dan dipantau secara berkala selama proses berlangsung. Sebelum pengujian dilakukan, seluruh instrumen ukur, meliputi termokopel, timbangan digital, dan gelas ukur, dikalibrasi menggunakan alat standar untuk memastikan akurasi hasil pengukuran. Material yang digunakan berupa limbah plastik jenis PP dan LDPE yang diperoleh dari limbah kemasan plastik bekas. Plastik dijadikan satu berdasarkan jenisnya, kemudian dibersihkan dari kotoran dan sisa bahan

lain, dikeringkan pada suhu ruang. Setiap sampel dipastikan memiliki tingkat kemurnian yang baik dengan hanya menggunakan satu jenis plastik pada setiap pengujian tanpa tercampur material lain seperti logam, kertas, atau plastik jenis berbeda. Setiap sampel diuji sebanyak satu kali pada kondisi operasi yang sama karena penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi kinerja mesin pirolisis hasil rancang bangun pada setiap jenis plastik. Data yang diperoleh meliputi tempertaur reaktor, temperatur minyak, waktu proses, volume minyak, dan massa minyak.

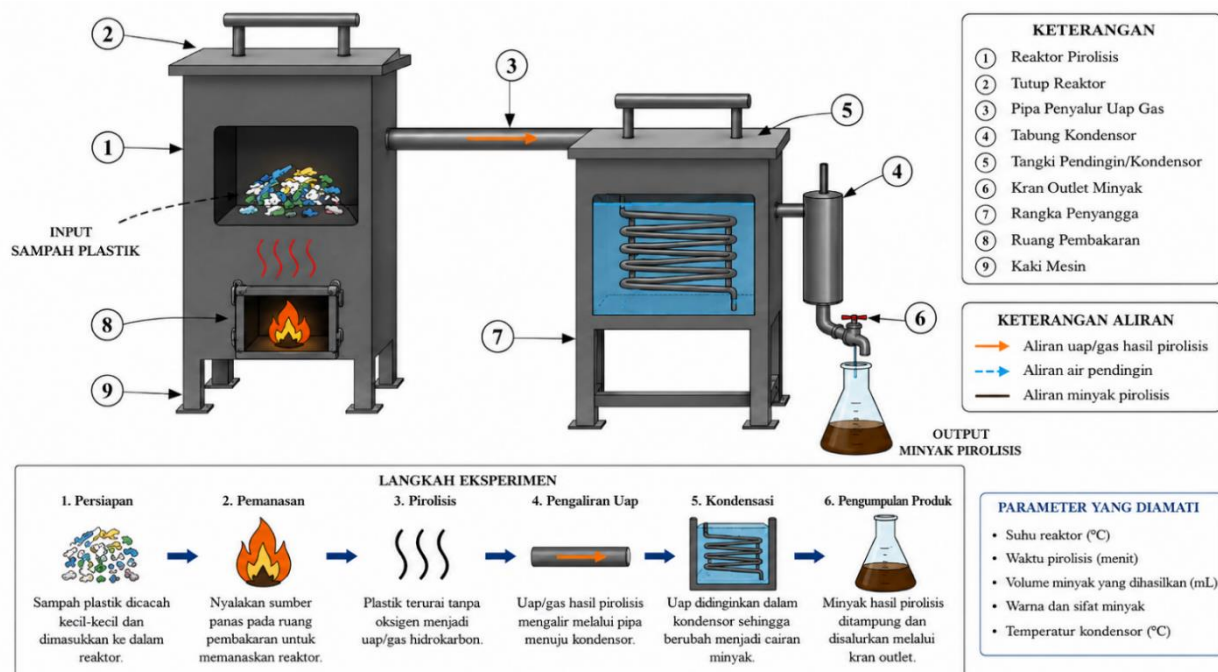


Gambar 1. Model fisik.

2.2 Skema Eksperimen

Skema eksperimen alat pirolisis pada Gambar 2 yang menunjukkan proses pengolahan sampah plastik menjadi minyak pirolisis melalui tahapan pemanasan tanpa oksigen. Komponen utama pada sistem pirolisis meliputi reaktor pirolisis, pipa penyalur uap gas, kondensor, tabung pendingin, dan saluran keluaran minyak pirolisis. Reaktor pirolisis dibuat menggunakan plat baja setebal 2 mm yang dipilih karena memiliki kekuatan mekanik yang baik, mudah difabrikasi, dan mampu menahan temperatur operasi penelitian. Pemanasan reaktor menggunakan kompor gas LPG yang ditempatkan di bawah reaktor. Temperatur reaktor dipantau menggunakan termokopel digital hingga mencapai 200°C, kemudian dipertahankan selama 120 menit. Temperatur operasi 200°C dipilih untuk mengevaluasi kinerja awal mesin pirolisis hasil rancang bangun pada kondisi operasi yang aman dan sesuai dengan kapasitas sistem pemanas yang digunakan. Penelitian ini berfokus pada evaluasi performa mesin, bukan pada optimasi kondisi pirolisis, sehingga temperatur tidak divariasikan. Pada tahap awal, limbah plastik yang telah dicacah menjadi potongan-potongan kecil dimasukkan ke dalam reaktor pirolisis melalui bukaan pada bagian atas reaktor yang dilengkapi dengan tutup menjaga kondisi sistem tetap tertutup selama proses pirolisis. Reaktor berfungsi sebagai tempat terjadinya proses penguraian termal plastik akibat pemanasan pada temperatur tinggi. Pemanasan dilakukan pada ruang pembakaran yang berada di bagian bawah reaktor. Sumber panas yang digunakan akan meningkatkan temperatur di dalam reaktor sehingga plastik mengalami proses pirolisis, yaitu penguraian material plastik tanpa adanya oksigen. Pada kondisi tersebut, rantai polimer plastik akan terpecah menjadi uap atau gas hidrokarbon. Uap hasil pirolisis kemudian mengalir melalui pipa penyalur menuju sistem kondensor. Aliran uap ini ditunjukkan dengan panah berwarna oranye pada skema. Kondensor berfungsi untuk mendinginkan uap panas hasil pirolisis agar berubah menjadi cairan minyak. Di dalam tangki pendingin terdapat pipa spiral yang dialiri uap panas, sedangkan bagian luar pipa diisi air pendingin untuk mempercepat proses kondensasi. Aliran air pendingin ditunjukkan dengan panah berwarna biru pada gambar. Ketika uap mengalami penurunan temperatur, uap akan berubah fase menjadi cairan berupa minyak pirolisis. Minyak hasil kondensasi kemudian mengalir menuju tabung penampungan dan dikeluarkan melalui kran output.

Berdasarkan skema eksperimen tersebut, terdapat beberapa parameter yang diamati selama proses berlangsung, meliputi suhu reaktor, waktu pirolisis, temperatur kondensor, volume minyak yang dihasilkan, serta warna dan sifat minyak pirolisis. Pengamatan parameter tersebut bertujuan untuk mengetahui pengaruh kondisi operasi terhadap jumlah dan kualitas minyak yang dihasilkan. Semakin optimal proses pemanasan dan pendinginan, maka proses konversi plastik menjadi minyak akan semakin efektif. Secara keseluruhan, skema eksperimen ini menunjukkan bahwa alat pirolisis bekerja dengan prinsip pemanasan limbah plastik dalam sistem tertutup sehingga menghasilkan uap hidrokarbon yang kemudian didinginkan menjadi minyak cair. Rancangan alat ini dapat menjadi alternatif teknologi pengolahan limbah plastik yang ramah lingkungan dan memberikan nilai tambah ekonomi karena mampu mengonversi limbah plastik menjadi bahan bakar alternatif. Skema percobaan ini mengilustrasikan cara mengonversi limbah plastik menjadi bahan bakar cair menggunakan metode pirolisis. Proses diawali dengan memasukkan limbah plastik ke dalam reaktor pirolisis, lalu dilakukan pemanasan di ruang pembakaran sampai plastik terdekomposisi menjadi gas hidrokarbon. Gas yang dihasilkan dari pirolisis diarahkan ke kondensor untuk didinginkan sehingga berubah menjadi minyak pirolisis cair yang kemudian dikumpulkan dalam wadah penampung.



Gambar 2. Skema Eksperimen.

2.3 Pengumpulan Data

Pengumpulan data dilakukan melalui metode eksperimen dengan menguji performa mesin pirolisis yang telah dirancang dan difabrikasi pada kondisi operasi yang telah ditentukan. Penelitian menggunakan dua jenis limbah plastik, yaitu PP dan LDPE, yang diuji secara terpisah untuk mengevaluasi kemampuan mesin dalam mengonversi limbah plastik menjadi minyak pirolisis. Massa awal sampel ditetapkan sebesar 280 g untuk plastik PP dan 150 g untuk plastik LDPE, yang disesuaikan dengan kapasitas reaktor serta karakteristik masing-masing material. Selanjutnya, sampel dimasukkan ke dalam reaktor dan dipanaskan hingga mencapai temperatur operasi 200°C, kemudian dipertahankan selama 120 menit. Selama proses pirolisis berlangsung, temperatur reaktor dipantau secara kontinu menggunakan termokopel, sedangkan lama proses diukur menggunakan stopwatch. Uap hasil dekomposisi termal yang terbentuk dialirkan menuju kondensor untuk mengalami proses pendinginan sehingga berubah menjadi fase cair. Minyak hasil kondensasi kemudian ditampung, selanjutnya volumenya diukur menggunakan gelas ukur dan massanya ditentukan menggunakan timbangan digital. Selain itu, temperatur minyak hasil pirolisis setelah keluar dari kondensor juga diukur menggunakan termokopel untuk mengetahui kondisi termal produk cair yang dihasilkan. Seluruh pengujian dilakukan pada kondisi operasi yang sama agar evaluasi difokuskan pada kinerja mesin pirolisis hasil rancang bangun. Dengan demikian, perbedaan hasil yang diperoleh lebih mencerminkan pengaruh karakteristik bahan plastik PP dan LDPE dibandingkan dengan pengaruh variasi parameter proses. Penelitian ini dilaksanakan pada satu kondisi operasi, yaitu temperatur reaktor 200°C dengan waktu pirolisis selama 120 menit, sehingga hasil yang diperoleh merepresentasikan kinerja mesin pirolisis pada kondisi tersebut.

2.4 Reduksi Data**2.4.1 Koefisien Perpindahan Panas**

Koefisien perpindahan panas merupakan parameter yang menunjukkan kemampuan suatu sistem dalam memindahkan energi panas dari permukaan yang bersuhu lebih tinggi menuju fluida atau material yang bersuhu lebih rendah melalui mekanisme konveksi. Semakin tinggi nilai koefisien perpindahan panas, semakin efektif proses perpindahan panas yang terjadi sehingga energi panas dapat disalurkan lebih cepat ke material yang dipanaskan dan dihitung menggunakan Persamaan 1.

$$h = \frac{q}{A \cdot \Delta T} \quad (1)$$

2.4.2 Laju Perpindahan Panas

Laju perpindahan panas (Persamaan 2) adalah jumlah energi panas yang berpindah dari sumber panas menuju material dalam setiap satuan waktu. Pada proses pirolisis, laju perpindahan panas menunjukkan besarnya energi yang disuplai oleh elemen pemanas ke reaktor untuk memanaskan limbah plastik hingga mengalami dekomposisi termal menjadi uap hidrokarbon. Semakin besar laju perpindahan panas, semakin cepat energi diterima oleh material sehingga proses pirolisis dapat berlangsung lebih efektif.

$$q = h \cdot A \cdot \Delta T \quad (2)$$

2.4.3 Rendemen

Rendemen merupakan parameter yang menunjukkan tingkat keberhasilan suatu proses melalui perbandingan antara hasil produk dan jumlah bahan baku awal, yang dinyatakan dalam persen (%) [20]. Perhitungan rendemen digunakan untuk menentukan persentase minyak yang dihasilkan dari proses pirolisis dibandingkan dengan massa awal sampah plastik yang digunakan dan dihitung dengan Persamaan 3.

$$\text{Rendemen} = \frac{\text{massa minyak}}{\text{massa plastik awal}} \times 100\% \quad (3)$$

3. HASIL DAN PEMBAHASAN**3.1 Pengaruh Material PP Terhadap Performa Termal**

PP adalah salah satu jenis plastik termoplastik yang umum digunakan dalam berbagai produk karena memiliki karakteristik ringan, kekuatan mekanik yang baik, tahan terhadap bahan kimia, serta kandungan hidrokarbon yang tinggi. Karakteristik tersebut menjadikan PP sebagai bahan baku yang potensial dalam proses pirolisis karena mampu menghasilkan produk minyak dengan rendemen yang relatif tinggi. Struktur molekul PP terdiri dari rantai polimer yang terdiri atas karbon dan hidrogen, yang bisa terputus saat terpapar panas dalam jumlah tertentu. Selama proses pirolisis, peningkatan suhu membuat material PP mengalami perubahan fisik menjadi lebih lunak dan mencair, diikuti dengan dekomposisi termal. Pada tahap ini, rantai polimer yang panjang mengalami dekomposisi termal menjadi senyawa hidrokarbon dengan struktur molekul yang lebih sederhana. Produk hasil dekomposisi tersebut kemudian berubah menjadi uap hidrokarbon dan dialirkan menuju kondensor untuk mengalami proses kondensasi sehingga menghasilkan minyak pirolisis.

**Gambar 3.** Pengujian Material PP.

Proses pengujian pirolisis plastik PP dengan massa awal 280 gram diperoleh 60 ml minyak yang massanya 45 gram. Proses berlangsung di reaktor pada suhu 200°C selama 120 menit, dan setelah dikondensasikan temperatur minyak tercatat 33,3°C. Hasil ini menunjukkan bahwa PP dapat terurai oleh pemanasan tanpa oksigen dan menghasilkan produk cair berupa minyak pirolisis. Sebelum pirolisis, sampah plastik tampak utuh dan dinding reaktor relatif bersih. Setelah proses, plastik terdekomposisi sehingga meninggalkan residu atau abu di dasar reaktor, dan dinding reaktor menjadi hitam karena jelaga dan sisa karbon dari proses termal. Perubahan ini mengindikasikan terjadinya dekomposisi termal yang memecah rantai hidrokarbon plastik menjadi gas, cairan (minyak), dan residu padat (*char*).

Volume minyak 60 ml menunjukkan bahwa tidak semua massa plastik berubah menjadi minyak cair; sebagian beralih menjadi gas yang tidak terkondensasi dan sebagian menjadi residu padat. Massa minyak 45 gram mengindikasikan densitas minyak pirolisis yang mendekati bahan bakar cair umum. Temperatur minyak 33,3°C membuktikan kondensor mampu mendinginkan uap pirolisis menjadi cairan yang dapat ditampung. Kesimpulannya, mesin pirolisis yang diuji mampu mengubah limbah PP menjadi minyak mentah alternatif, membantu mengurangi penumpukan sampah plastik dan berpotensi menyediakan bahan bakar alternatif. Namun diperlukan pengembangan pada sistem pemanasan dan pendinginan untuk meningkatkan efisiensi konversi dan kualitas minyak yang dihasilkan. Dalam penelitian ini, laju perpindahan panas diasumsikan sebesar 1000 W berdasarkan daya efektif sumber panas yang digunakan sebagai pendekatan teoritis. Nilai tersebut digunakan untuk mengestimasi koefisien perpindahan panas sehingga hasil analisis termal bersifat estimasi dan belum merepresentasikan kondisi aktual.

3.2 Pengaruh Material LDPE Terhadap Performa Termal

LDPE adalah salah satu tipe plastik termoplastik yang memiliki struktur molekul dengan rantai polimer bercabang, serta kerapatan yang tergolong rendah. Ciri ini menjadikan LDPE bersifat fleksibel, ringan, dan mudah melunak ketika terkena panas. Pada saat proses pirolisis, peningkatan suhu membuat material LDPE berpindah dari keadaan padat ke lunak dan mencair, lalu dilanjutkan dengan dekomposisi termal yang menguraikan rantai polimer panjang membentuk senyawa hidrokarbon yang molekulnya lebih sederhana. Hasil dekomposisi ini kemudian membentuk uap hidrokarbon selanjutnya dialirkan melalui pipa menuju kondensor untuk mengalami proses pendinginan dan kondensasi sehingga berubah fase menjadi produk cair berupa minyak pirolisis.



Gambar 4. Pengujian Material LDPE.

Proses pengujian pirolisis pada plastik jenis LDPE dengan massa awal 150 gram menghasilkan minyak pirolisis sebanyak 30 ml dengan massa 20 gram. Percobaan dilakukan pada suhu reaktor 200°C selama 120 menit, sementara suhu minyak setelah kondensasi tercatat 31,1°C. Hasil ini menunjukkan bahwa plastik LDPE dapat terurai secara termal dan menghasilkan minyak melalui proses pirolisis. Sebelum proses berlangsung, kondisi plastik masih utuh dan ruang reaktor tampak bersih. Setelah pirolisis, plastik mengalami perubahan bentuk akibat pemanasan tanpa kehadiran oksigen. Pada dokumentasi setelah pembakaran terlihat adanya residu atau abu yang tertinggal di dasar reaktor, serta dinding reaktor menghitam akibat akumulasi karbon dan jelaga. Hal ini menunjukkan bahwa tidak semua plastik berubah menjadi minyak; sebagian menjadi padatan atau gas.

Volume minyak yang diperoleh yaitu 30 ml tergolong rendah dibandingkan massa awal plastik 150 gram. Faktor utama penyebabnya adalah suhu reaktor yang masih terlalu rendah untuk pirolisis LDPE. Pada 200°C, pemutusan rantai polimer belum optimal sehingga hanya sebagian plastik yang dapat dikonversi menjadi minyak. Sebagian lainnya kemungkinan berubah menjadi gas yang tidak mengembun atau residu padat yang tertinggal. Massa minyak sebesar 20 gram menunjukkan bahwa karakteristik minyak menyerupai bahan bakar cair dengan densitas tertentu. Suhu minyak yang mencapai 31,9°C menandakan bahwa kondensor bekerja cukup baik dalam mendinginkan uap pirolisis hingga menjadi cair. Semakin efisien proses pendinginan, semakin besar jumlah uap yang dapat berubah menjadi minyak. Secara keseluruhan, penelitian ini menunjukkan bahwa mesin pirolisis yang dirancang sudah mampu mengolah sampah plastik LDPE menjadi minyak mentah alternatif. Selain dapat membantu mengurangi limbah plastik, teknologi ini berpotensi menjadi sumber energi alternatif. Meski demikian, pengembangan lebih lanjut pada sistem pemanas, kondensor, dan pengendalian suhu masih diperlukan agar produksi minyak lebih maksimal dan kualitasnya meningkat.

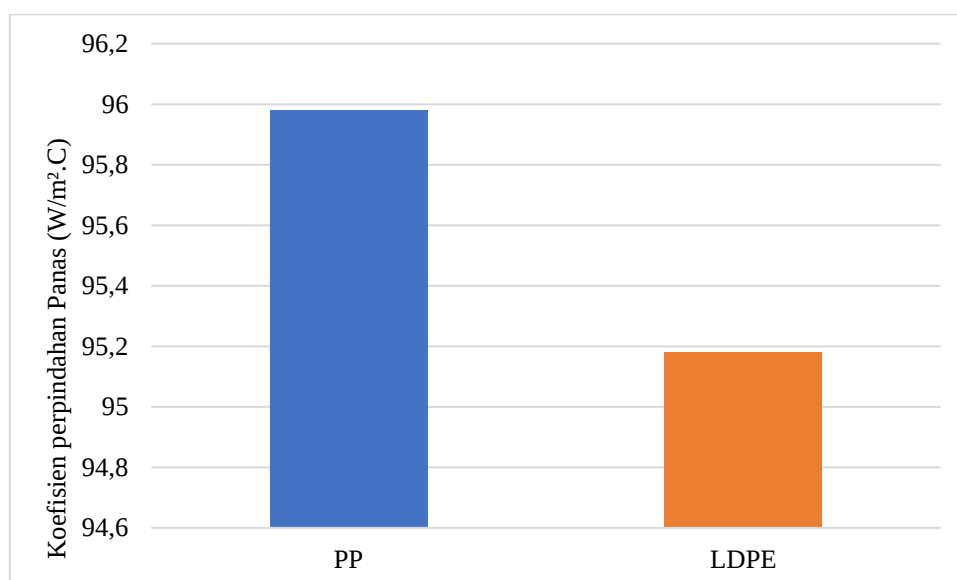
Tabel 1. Hasil Pengujian.

Jenis plastik	Massa awal plastik (g)	Temperatur minyak (°C)	Waktu proses (menit)	Volume minyak (ml)	Massa minyak (g)	Suhu reaktor (°C)
PP	280	33,3	120	60	45	200
LDPE	150	31,9	120	30	20	200

Hasil pengujian menunjukkan bahwa proses pirolisis terhadap plastik PP dan LDPE dilakukan pada kondisi operasi yang sama, yaitu temperatur reaktor 200°C dengan waktu proses 120 menit. Pada pengujian plastik PP, massa awal sampel sebesar 280 g menghasilkan minyak pirolisis sebanyak 60 mL dengan massa 45 g, sedangkan plastik LDPE

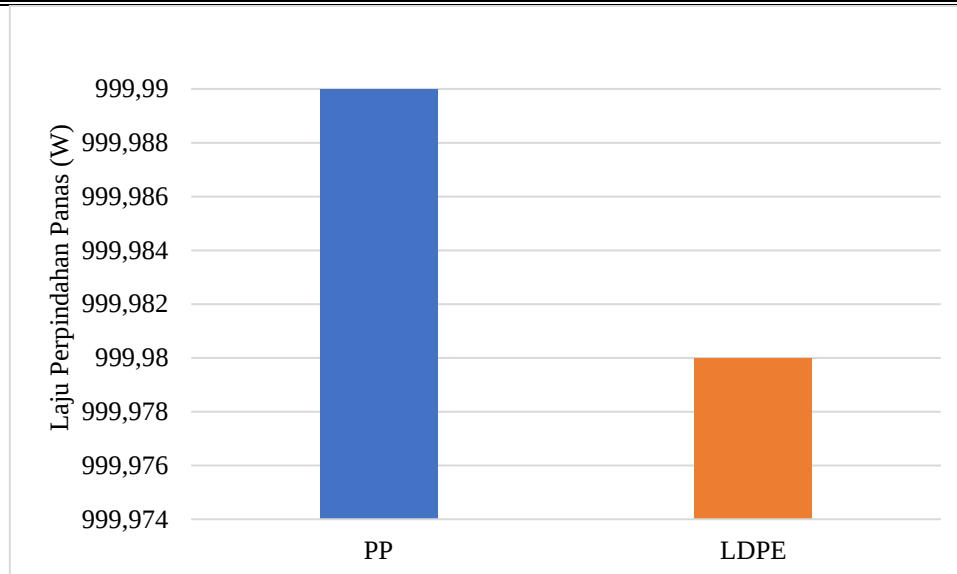
dengan massa awal 150 g menghasilkan minyak sebanyak 30 mL dengan massa 20 g. Temperatur minyak setelah melewati proses kondensasi tercatat sebesar 33,3°C untuk PP dan 31,9°C untuk LDPE. Berdasarkan perbandingan antara massa minyak yang dihasilkan dan massa awal bahan baku, diperoleh rendemen minyak sebesar 16,07% pada plastik PP dan 13,33% pada plastik LDPE. Hasil tersebut menunjukkan bahwa plastik PP memiliki kemampuan konversi menjadi minyak yang lebih tinggi dibandingkan plastik LDPE pada kondisi operasi yang sama.

Perbedaan nilai rendemen tersebut dipengaruhi oleh karakteristik termal serta struktur molekul masing-masing jenis plastik. Plastik PP memiliki rantai polimer yang relatif lebih mudah mengalami pemutusan rantai polimer (*chain scission*) selama proses pirolisis sehingga menghasilkan fraksi hidrokarbon cair dalam jumlah yang lebih besar. Sebaliknya, LDPE memiliki struktur molekul yang lebih bercabang sehingga memerlukan energi yang lebih besar untuk mengalami dekomposisi termal secara sempurna. Akibatnya, sebagian produk pirolisis LDPE cenderung terbentuk sebagai fraksi gas dibandingkan fraksi cair. Kondisi ini menyebabkan jumlah minyak yang dihasilkan dari plastik PP lebih tinggi daripada LDPE meskipun kedua material diproses pada temperatur dan waktu operasi yang sama. Hasil tersebut menunjukkan bahwa karakteristik struktur molekul material berpengaruh terhadap efisiensi konversi limbah plastik menjadi minyak melalui proses pirolisis.

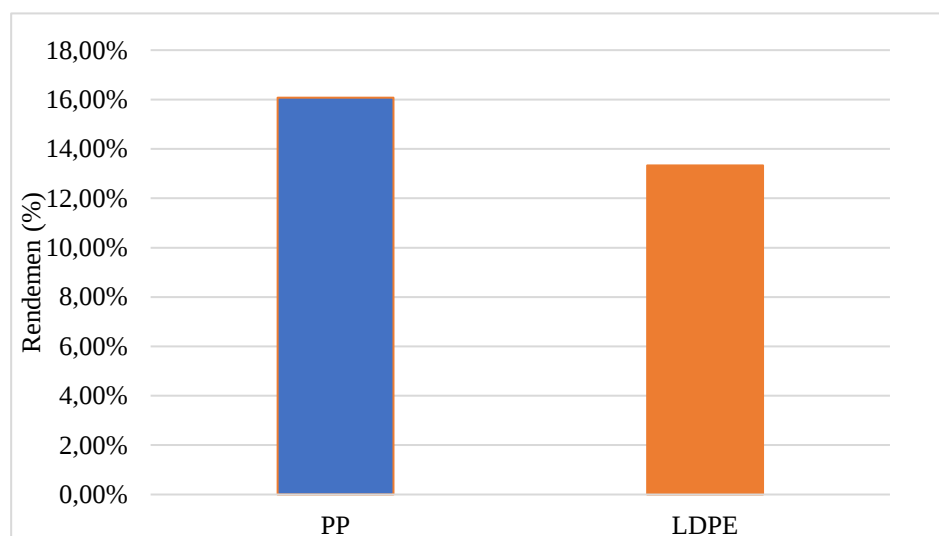


Gambar 5. Grafik Koefisien Perpindahan Panas.

Berdasarkan grafik, nilai koefisien perpindahan panas dalam proses pirolisis material PP tercatat sebesar 95,98 W/m².°C, sementara untuk material LDPE tercatat sebesar 95,18 W/m².°C. Dari hasil ini, terlihat bahwa nilai koefisien perpindahan panas kedua material ini cukup mendekati, dengan perbedaan mencapai 0,80 W/m².°C. Koefisien perpindahan panas untuk material PP sedikit lebih tinggi daripada LDPE. Selisih tersebut dipengaruhi oleh nilai perbedaan temperatur (ΔT) yang digunakan dalam perhitungan, yaitu 166,7°C untuk PP dan 168,1°C untuk LDPE, dan laju perpindahan panas yang digunakan adalah 1000 W dengan luas permukaan perpindahan panas 0,0625 m² sebagai parameter dalam perhitungan. Kedekatan nilai koefisien perpindahan panas ini menunjukkan bahwa berdasarkan kondisi dan asumsi yang diterapkan dalam perhitungan, proses perpindahan panas pada pengujian PP dan LDPE memiliki sifat yang hampir sama.

**Gambar 6.** Grafik Laju Perpindahan Panas.

Berdasarkan grafik, tingkat konduksi panas dalam proses pirolisis bahan PP mencapai 999,99 W, sementara untuk bahan LDPE tercatat 999,98 W. Kedua angka ini menunjukkan nilai yang hampir identik, dengan selisih hanya 0,01 W. Angka laju konduksi panas ini dihitung dengan rumus $q = h.A.\Delta T$, dengan luas permukaan konduksi panas sebesar 0,0625 m². Untuk bahan PP, digunakan nilai koefisien konduksi panas sebesar 95,98 W/m².°C dan perbedaan suhu sebesar 166,7°C. Di sisi lain, bahan LDPE memakai koefisien konduksi panas yang sedikit lebih rendah, yaitu 95,18 W/m².°C dan perbedaan suhu 168,1°C. Hasil yang hampir serupa ini menunjukkan bahwa, berdasarkan parameter yang dipakai dalam perhitungan, transfer energi panas yang terjadi dalam pengujian kedua jenis plastik hampir setara. Perbedaan kecil pada hasil perhitungan dapat dijelaskan oleh pembulatan angka pada koefisien konduksi panas. Minyak pirolisis yang dihasilkan menunjukkan potensi untuk dimanfaatkan sebagai bahan bakar alternatif. Namun, potensi tersebut masih bersifat awal karena penelitian ini belum mencakup karakterisasi sifat fisik dan kimia minyak, seperti densitas, viskositas, nilai kalor, *flash point*, komposisi senyawa menggunakan GC-MS, maupun gugus fungsi menggunakan FTIR. Oleh karena itu, pengujian karakteristik minyak dan perbandingannya dengan standar bahan bakar perlu dilakukan pada penelitian selanjutnya untuk memastikan kualitas dan kelayakan penggunaannya sebagai bahan bakar alternatif.

**Gambar 7.** Grafik Rendemen.

Berdasarkan hasil pengujian pirolisis, plastik jenis PP dengan massa awal 280 gram menghasilkan massa minyak sebesar 45 gram, sehingga diperoleh rendemen sebesar 16,07%. Sementara itu, plastik jenis LDPE dengan massa awal 150 gram menghasilkan massa minyak sebesar 20 gram dengan rendemen sebesar 13,33%. Penelitian ini menunjukkan bahwa plastik PP memberikan hasil minyak yang lebih banyak dibandingkan plastik LDPE ketika kondisinya sama. Temuan ini sesuai dengan beberapa penelitian sebelumnya yang menyebutkan bahwa plastik PP mampu menghasilkan lebih banyak fraksi cair dibandingkan LDPE karena struktur molekulnya lebih mudah terurai secara termal menjadi senyawa hidrokarbon cair. Meskipun hasil rendemen dalam penelitian ini lebih kecil dibandingkan beberapa penelitian sebelumnya, perbedaan tersebut kemungkinan besar disebabkan oleh suhu operasi yang lebih rendah, desain reaktor, kapasitas peralatan, serta sistem pengkondensan yang digunakan. Dengan demikian, hasil penelitian ini menunjukkan pola yang selaras dengan teori dan penelitian sebelumnya, sehingga membantu memperkuat kebenaran hasil uji coba yang dilakukan.

Penelitian ini memiliki beberapa keterbatasan. Pengujian dilakukan hanya pada satu kondisi operasi, yaitu temperatur reaktor 200°C dengan waktu pirolisis 120 menit, sehingga pengaruh variasi temperatur maupun waktu proses terhadap hasil pirolisis belum dapat dianalisis. Selain itu, pengujian hanya dilakukan satu kali untuk setiap jenis plastik sehingga variasi data belum dapat dievaluasi secara statistik. Penelitian ini juga terbatas pada dua jenis plastik, yaitu PP dan LDPE, sehingga hasil yang diperoleh belum dapat digeneralisasi untuk jenis plastik lainnya. Di samping itu, karakterisasi sifat fisik dan kimia minyak pirolisis, seperti nilai kalor, densitas, viskositas, maupun komposisi kimia, belum dilakukan sehingga kualitas minyak yang dihasilkan belum dapat dievaluasi secara menyeluruh. Penelitian selanjutnya disarankan melakukan variasi temperatur reaktor, waktu pirolisis, massa bahan baku, serta sistem pendinginan kondensor untuk memperoleh kondisi operasi yang optimal. Selain itu, pengujian perlu dilakukan dengan pengulangan eksperimen sehingga hasil dapat dianalisis secara statistik dan memiliki tingkat kepercayaan yang lebih tinggi. Karakterisasi minyak pirolisis, seperti nilai kalor, densitas, viskositas, dan komposisi senyawa hidrokarbon, juga perlu dilakukan untuk mengevaluasi kualitas produk secara lebih komprehensif.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil perancangan, pembuatan, dan pengujian, mesin pirolisis yang dibuat berhasil mengubah limbah plastik menjadi minyak pirolisis dengan cara memecah bahan tersebut melalui panas tanpa adanya oksigen. Sistem yang terdiri dari reaktor, pemanas, dan kondensor berjalan dengan baik dalam menghasilkan minyak pirolisis dari dua jenis plastik yang diuji. Dalam kondisi operasi dengan suhu reaktor 200°C selama 120 menit, plastik PP yang memiliki massa awal 280 gram menghasilkan 60 mL minyak pirolisis dengan massa 45 gram, sedangkan plastik LDPE dengan massa awal 150 gram menghasilkan 30 mL minyak pirolisis dengan massa 20 gram. Hasil ini menunjukkan bahwa plastik PP memberikan hasil minyak yang lebih banyak dibandingkan LDPE, yang menunjukkan bahwa sifat bahan mempengaruhi seberapa efektif proses konversi melalui pirolisis. Dari segi ilmu, penelitian ini memberikan sumbangan dalam memperbaiki mesin pirolisis skala laboratorium dengan mengevaluasi kemampuannya berdasarkan beberapa parameter seperti suhu reaktor, suhu minyak, volume minyak, berat minyak, serta hasil pirolisis yang dihasilkan, sehingga bisa menjadi acuan dalam menciptakan teknologi pirolisis yang lebih baik. Dari segi penerapannya, mesin yang telah dikembangkan bisa digunakan sebagai alternatif teknologi dalam pemrosesan limbah plastik, baik untuk skala laboratorium, pendidikan, maupun usaha kecil. Mesin ini memiliki konstruksi yang sederhana, mudah digunakan, dan mampu menghasilkan minyak pirolisis yang memiliki nilai ekonomi. Meskipun begitu, penelitian ini hanya mencakup satu kondisi operasi dan dua jenis bahan baku plastik, sehingga disarankan untuk penelitian berikutnya agar mencakup variasi suhu, durasi pirolisis, dan jumlah bahan baku, serta melakukan analisis sifat fisika dan kimia dari minyak pirolisis agar performa alat dan kualitas hasil produk dapat dinilai secara lebih mendalam.

UCAPAN TERIMA KASIH

Laboratorium Terpadu Universitas Persatuan Guru Republik Indonesia Semarang.

Jl. Gajah Raya No.40, Sambirejo, Kec. Gayamsari, Kota Semarang, Jawa Tengah 5016

REFERENCES

- [1] M. H. Nindi Putri Guswira, Harpito, Anwardi, Nofirza, Muhammad Ihsan Hamdy, "Perancangan Alat Destilasi Untuk Mengubah Sampah Plastik Menjadi Bahan Bakar Minyak Prospektif Melalui Proses Pirolisis Bertingkat," *JRI*, vol. 6, no. 1, pp. 9–18, 2024.

- [2] D. S. Popo Mustopa , Zenal Abidin, “UJI ALAT PENGUBAH LIMBAH SAMPAH PLASTIK MENJADI BAHAN BAKAR BIO SOLAR,” *JMMG*, vol. 4, no. 1, 2026.
- [3] I. R. A. Jurnal, T. Mesin, R. Arif, and T. Subagyo, “Perancangan Alat Pirolisis Limbah Plastik Menjadi Bahan Bakar Alternatif Design of a Plastic Waste Pyrolysis Tool to Become an Alternative Fuel,” *IRAJTMA*, vol. 4, no. 3, pp. 305–311, 2025.
- [4] Y. A. Yuriansyah and L. P. Lestari, “PERENCANAAN PIROLISIS SAMPAH PLASTIK TRANSPARAN DENGAN TUNGKU PEMBAKARAN BERBAHAN BAKAR RESIDU,” *Mechonversio*, vol. 8, no. 2, pp. 51–55, 2025.
- [5] F. B. H. Dominggus G. H. Adoe1, Defmit B.N Riwu, “Rancang Bangun Alat Pirolisis Reaktor Tabung Bertingkat untuk Daur Ulang Sampah Plastik Polypropylene (PP) dengan Menggunakan Metode VDI 2221,” *LJTMU*, vol. 09, no. 01, pp. 90–100, 2022.
- [6] I Gusti Ngurah Nitya Santhiarsa, “RANCANG BANGUN ALAT KONVERSI PLASTIK MENJADI BAHAN BAKAR MINYAK DENGAN METODE PIROLISIS UNTUK PENANGANAN SAMPAH PLASTIK,” *J. Rekayasa Mesin*, vol. 13, no. 1, pp. 189–196, 2022.
- [7] F. R. Bayu Megaprastio, Mochamad Syamsiro, Muhammad Arief Saputro, “Teknologi Pirolisis untuk Konversi Sampah Plastik menjadi Bahan Bakar Minyak : Kajian Literatur,” *Rekayasa Mesin*, vol. 18 No2, no. 2, pp. 229–240, 2023.
- [8] H. L. Dias R.V Rijono, Stenly Tangkuman, “Rancang Bangun Tabung Pirolisis P,” *J. Tekno Mesin*, vol. 9, no. 1, pp. 1–11, 2023, doi: 10.35793/jtmu.v9i1.48220.
- [9] M. Syahrul Gunawan, M. Muharom, M. H. Abdullah, F. Gemala Dewi, A. Jaya Suwondo, and O. Purnamayudhia, “Perancangan Proses Kondensasi Pada Pengolahan Limbah Plastik Menjadi Bahan Bakar Minyak Menggunakan Sistem Pirolisis Dengan Kapasitas 10 Liter,” *J. Syst. Eng. Technol. Innov.*, vol. 1, no. 02, pp. 65–70, 2022, doi: 10.38156/jisti.v1i02.28.
- [10] I. H. S. I Made Yudana Yasa, “PENGARUH JUMLAH LILITAN PIPA KONDENSOR TERHADAP KUANTITAS MINYAK PIROLISIS SAMPAH PLASTIK,” *JTM*, vol. 11, no. 1, pp. 71–78, 2023.
- [11] A. Arzuna Syaputra, “Analisis Kondensor pada Alat Pirolisis Minyak Plastik Kapasitas 2 Kg,” *J. Ilmu Tek.*, vol. 2, no. 1, pp. 157–168, 2024, [Online]. Available: <https://doi.org/10.62017/tekonik>
- [12] G. P. N. B. S. Rahayu Purwanti, Rouf Muhammad, Hamid Ramadhan Nur, Muhammad Nurtanto, Tri Widodo Besar Riyadi, Desi Gustiani, Muhamad Safi'i, “Effect of Combustion Power Levels and Operational Pressures in the Pyrolysis Gas-Fired Industrial Burners : A Numerical Analysis †,” *Eng. Proc.*, vol. 5, no. 137, pp. 2–9, 2026.
- [13] B. W. Moh. Abiyyu Haidar, Nor Faizah, “Pengolahan Sampah Plastik Menjadi Bahan Bakar Minyak dengan Menggunakan Proses Pirolisis,” *COMSERVA J. Penelit. dan Pengabd. Masy.*, vol. 2, no. 10, pp. 2238–2243, 2023, doi: 10.59141/comserva.v2i10.625.
- [14] A. S. S. Juliya Ascha Riandis, Agus Restu Setyawati, “Pirolisis Menjadi Bahan Bakar Minyak Plastic Waste Processing Using Pyrolysis Method Into Fuel Oil,” *J. Chemurg.*, vol. 05, no. 200, pp. 8–14, 2021, [Online]. Available: <http://e-journals.unmul.ac.id/index.php/TK%0A>
- [15] R. M. F. Senki Desta Galuh Latifa Mirzatika Al-Rosyid, Itsbatun Nawafil, “Evaluasi Pirolisis Sampah Plastik Rumah Tangga dengan Reaktor Listrik 2000 Watt dalam Kerangka Ekonomi Sirkular,” *Pros. Semin. Nas. Tek. Lingkung. UII 2025*, vol. 1, no. September, pp. 1–7, 2025, [Online]. Available: <https://conference.uui.ac.id/sntl/paper/view/39>
- [16] P. W. N. Elsa Meilia Mayora, Arifin, “Pirolisis Limbah Plastik Jenis Low Density Polyethylene (LDPE) dan Polypropylene (PP) Menggunakan Katalis Zeolit Alam,” *J. Teknol. Lingkung. Lahan Basah*, vol. 11, no. 3, pp. 773–779, 2023, doi: 10.26418/jtlb.v11i3.69221.
- [17] Ainun Nadiya Alya Salsabila and Kusmiyati, “Optimasi Proses Pirolisis Pada Sampah Plastik LDPE (Low Density Polyethylene) Menggunakan Pendekatan RSM (Response Surface Methodology) Menjadi Bahan Bakar Minyak,” *J. Teknol. dan Manaj. Ind. Terap.*, vol. 4, no. 3, pp. 976–983, 2025, doi: 10.55826/jtmit.v4i3.1078.
- [18] Azis and Hanizah, “Journal of Chemical Process Engineering Produksi Bahan Bakar Cair Dari Limbah Plastik Polypropylene (PP),” *J. Chem. Process Eng. Vol.*, vol. 6, no. 2655, 2021.
- [19] S. W. A. Dara Rizky Rivaldo Rijadi, Erry Ika Rhofita, “Pengaruh Temperatur Dan Waktu Proses Terhadap Kualitas Minyak Pirolisis Limbah Plastik Lowdensity Polyethylene,” *Sci. J. Mech. Eng. Kinemat.*, vol. 10, no. 1, pp. 70–80, 2025, doi: 10.20527/sjmekinematika.v10i1.326.
- [20] Indah Pratiwi, “Rancang Bangun Alat Konversi Limbah Plastik Menjadi Bahan Bakar Melalui Pirolisis,” *J. Multidisiplin Dehasen*, vol. 1, no. 3, pp. 425–430, 2022, doi: 10.37676/mude.v1i3.2710.