

M.rizqi Rosyadi Ahlis Suddin

Pengaruh Variasi Bahan Pirolisis Menjadi Bahan Bakar Cair Berbasis Sampah Plastik PP dan PET

 Quick Submit

 Quick Submit

 Universitas 17 Agustus 1945 Semarang

Document Details

Submission ID

trn:oid::1:3602395373

Submission Date

Jun 27, 2026, 3:38 PM GMT+7

Download Date

Jun 27, 2026, 3:44 PM GMT+7

File Name

k_Mesin,_Elektro_dan_Komputer_M.Rizqi_Rosyadi_Ahlis_Suddin.docx

File Size

1.8 MB

18 Pages

8,355 Words

51,531 Characters

18% Overall Similarity

The combined total of all matches, including overlapping sources, for each database.

Filtered from the Report

- Bibliography
- Small Matches (less than 10 words)

Top Sources

- 18%  Internet sources
- 0%  Publications
- 0%  Submitted works (Student Papers)

Integrity Flags

0 Integrity Flags for Review

No suspicious text manipulations found.

Our system's algorithms look deeply at a document for any inconsistencies that would set it apart from a normal submission. If we notice something strange, we flag it for you to review.

A Flag is not necessarily an indicator of a problem. However, we'd recommend you focus your attention there for further review.

Top Sources

18% Internet sources
0% Publications
0% Submitted works (Student Papers)

Top Sources

The sources with the highest number of matches within the submission. Overlapping sources will not be displayed.

1	Internet	journalcenter.org	9%
2	Internet	jurnal.polines.ac.id	1%
3	Internet	media.neliti.com	1%
4	Internet	adoc.pub	1%
5	Internet	science.e-journal.my.id	<1%
6	Internet	etheses.uin-malang.ac.id	<1%
7	Internet	repository.unmuhjember.ac.id	<1%
8	Internet	eprints.umm.ac.id	<1%
9	Internet	ojs.unimal.ac.id	<1%
10	Internet	repository.ub.ac.id	<1%
11	Internet	repository.its.ac.id	<1%

12	Internet	prosiding.polimedia.ac.id	<1%
13	Internet	e-journal.unair.ac.id	<1%
14	Internet	jurnal-tmit.com	<1%
15	Internet	www.science.gov	<1%
16	Internet	ilmugeografi.com	<1%
17	Internet	jurnal.stokbinaguna.ac.id	<1%
18	Internet	ojspanel.undikma.ac.id	<1%
19	Internet	repository.itpln.ac.id	<1%
20	Internet	soeketgn.blogspot.com	<1%
21	Internet	www.kompasiana.com	<1%
22	Internet	repository.unsri.ac.id	<1%
23	Internet	www.researchgate.net	<1%
24	Internet	123dok.com	<1%
25	Internet	cot.unhas.ac.id	<1%

26	Internet	eprints.undip.ac.id	<1%
27	Internet	pdfcoffee.com	<1%
28	Internet	repository.moestopo.ac.id	<1%
29	Internet	scholar.unand.ac.id	<1%
30	Internet	text-id.123dok.com	<1%

JURITEK: Jurnal Ilmiah Teknik Mesin, Elektro dan Komputer

E-ISSN: 2809-0799

P-ISSN: 2809-0802

Pengaruh Variasi Bahan Pirolisis Menjadi Bahan Bakar Cair Berbasis Sampah Plastik PP dan PET

M.Rizqi Rosyadi Ahlis Suddin¹, Asroful Abidin^{2*}, dan Mokh. Hairul Bahri³

¹ Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Jember ; email : riskirosadi10@gmail.com

² Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Jember ; email : riskirosadi10@gmail.com

³ Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Jember ; email : riskirosadi10@gmail.com

* Penulis Korespondensi : Asroful Abidin

Abstract: This study aims to analyze the effect of variations in the composition of raw materials of Polypropylene (PP) and Polyethylene Terephthalate (PET) plastic waste on the characteristics of pyrolysis oil. The pyrolysis process was carried out using a batch-type reactor with a capacity of 2 kg at a constant temperature of 400°C with a residence time of 60 minutes, using variations of pure PP, pure PET, a mixture of 75% PP + 25% PET, and a mixture of 75% PET + 25% PP. The test results showed that the addition of PET fractions was linear with an increase in oil density values, where the highest density was obtained in pure PET at 0.994 g/mL and the lowest in pure PP at 0.964 g/mL. In contrast, the energetic performance and quantity of liquid products were dominated by the PP fraction; Pure PP oil produced the highest calorific value of 10,535.76 Cal/gram with a maximum liquid volume of 390 ml (yield 0.33%), while a mixture of 75% PET + 25% PP produced the lowest calorific value (8,266.82 Cal/gram) and the smallest oil volume of 280 ml (yield 0.29%). Therefore, the use of pure PP raw materials or a mixture dominated by PP is far superior and effective for producing alternative fuels with abundant quantities and high energy quality.

Keywords: Pyrolysis; Plastic Waste; PP; PET; Liquid Fuel; Density; Calorific Value

Abstrak: Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh variasi komposisi bahan baku limbah plastik Polypropylene (PP) dan Polyethylene Terephthalate (PET) terhadap karakteristik minyak hasil pirolisis. Proses pirolisis dilakukan menggunakan reaktor tipe batch berkapasitas 2 kg pada suhu konstan 400°C dengan waktu tinggal selama 60 menit, menggunakan variasi bahan PP murni, PET murni, campuran PP 75% + PET 25%, dan campuran PET 75% + PP 25%. Hasil pengujian menunjukkan bahwa penambahan fraksi PET linier dengan peningkatan nilai densitas minyak, di mana densitas tertinggi diperoleh pada PET murni sebesar 0,994 g/mL dan terendah pada PP murni sebesar 0,964 g/mL. Sebaliknya, performa energetik dan kuantitas produk cair didominasi oleh fraksi PP; minyak PP murni menghasilkan nilai kalor tertinggi sebesar 10.535,76 Cal/gram dengan volume cairan maksimal mencapai 390 ml (yield 0,33%), sementara campuran PET 75% + PP 25% menghasilkan nilai kalor terendah (8.266,82 Cal/gram) serta volume minyak paling sedikit yaitu 280 ml (yield 0,29%). Dengan demikian, penggunaan bahan baku PP murni atau campuran yang didominasi oleh PP jauh lebih unggul dan efektif untuk menghasilkan bahan bakar alternatif dengan kuantitas melimpah dan kualitas energi yang tinggi.

Kata kunci: Pirolisis; Sampah Plastik; PP; PET; Bahan Bakar Cair; Densitas; Nilai Kalor

1. Pendahuluan

Plastik telah menjadi bagian tak terpisahkan dari kehidupan manusia modern. Sifatnya yang ringan, kuat, dan tahan lama menjadikan plastik sebagai material pilihan untuk berbagai keperluan, mulai dari peralatan rumah tangga hingga kemasan produk konsumen. Polypropylene (PP) dan Polyethylene Terephthalate (PET) merupakan dua jenis plastik yang mendominasi pasar kemasan global, ditemukan dalam hampir setiap aspek kehidupan mulai dari

Diterima: tanggal
Direvisi: tanggal
Diterima: tanggal
Diterbitkan: tanggal
Versi sekarang: tanggal



Hak cipta: © 2025 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/>)

botol minuman, wadah makanan, hingga kemasan produk rumah tangga. Di Indonesia, kebutuhan plastik terus meningkat hingga mengalami kenaikan rata-rata 200 ton per tahun, yang berimplikasi pada peningkatan jumlah sampah plastik secara signifikan.

Permasalahan utama muncul ketika sifat plastik yang tahan lama justru menjadi ancaman lingkungan karena pola konsumsi linier "ambil, pakai, buang". Sifat PP dan PET yang ringan, kuat, dan tahan lama berubah menjadi bumerang lingkungan karena umur pakainya yang singkat sebagai produk sekali pakai menghasilkan akumulasi limbah yang masif dan persisten. Dengan tingkat daur ulang mekanis konvensional yang masih sangat terbatas—hanya sekitar 9% dari total limbah plastik global yang berhasil didaur ulang—kedua polimer ini menumpuk di tempat pembuangan akhir (TPA) dan mencemari ekosistem.

Tantangan utama dalam mengelola limbah PP dan PET terletak pada kompleksitas dan biaya tinggi dari proses daur ulang mekanis, yang sangat bergantung pada kemurnian material dan bebasnya dari kontaminasi. Daur ulang mekanis untuk PET, meskipun telah mapan, seringkali mengalami penurunan kualitas pada setiap siklusnya, sementara daur ulang PP umumnya bernilai lebih rendah dan kurang diminati pasar. Selain itu, keberadaan PP dan PET dalam aliran sampah yang bercampur membuat pemilahannya menjadi tidak ekonomis. Hal ini semakin diperparah dengan masih kurangnya pengetahuan masyarakat tentang pengelolaan sampah plastik yang tepat, di mana praktik pembakaran sampah plastik masih dilakukan meskipun dapat menghasilkan gas beracun seperti hidrogen sulfida (H_2S) dan dioksin yang berbahaya bagi kesehatan.

Keterbatasan daur ulang mekanis inilah yang kemudian membuka jalan bagi pencarian teknologi daur ulang yang lebih mutakhir, di mana proses pirolisis muncul sebagai salah satu solusi potensial untuk memutus siklus limbah ini dengan mengubahnya kembali menjadi sumber daya yang bernilai. Pirolisis menawarkan paradigma pengelolaan yang berbeda, teknologi termokimia ini dirancang untuk menangani campuran plastik yang heterogen, termasuk PP dan PET, dengan memanaskannya pada suhu tinggi tanpa oksigen. Proses ini tidak memerlukan pemilahan yang rumit dan mampu mengurai rantai polimer plastik menjadi produk yang lebih sederhana, seperti minyak pirolisis, wax, dan gas, yang dapat digunakan sebagai bahan bakar atau bahan baku kimia. Dengan kata lain, pirolisis berpotensi mengubah tumpukan sampah plastik yang tidak bernilai menjadi "minyak" yang berharga, sekaligus meringankan beban TPA.

Integrasi teknologi pirolisis ke dalam strategi pengelolaan limbah plastik menandai pergeseran menuju pendekatan ekonomi sirkular yang lebih dalam. Berbeda dengan pendekatan daur ulang tradisional yang hanya memperpanjang umur material, pirolisis pada dasarnya melakukan "daur ulang molekuler" dengan mengembalikan plastik ke bentuk hidrokarbonnya. Produk minyak yang dihasilkan dari proses pirolisis limbah plastik PP dapat disuling lebih lanjut menjadi bahan bakar atau dijadikan nafta untuk memproduksi plastik baru, sehingga menutup loop material dan mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil virgin.

Namun, penerapan teknologi pirolisis dalam skala industri masih dihadapkan pada beberapa kendala signifikan. Studi-studi sebelumnya mengungkapkan bahwa rendemen dan mutu produk pirolisis amat dipengaruhi oleh kondisi operasional, mencakup suhu proses, kecepatan pemanasan, dan durasi waktu. Secara spesifik, PET cenderung menghasilkan senyawa sampingan seperti asam tereftalat yang tidak hanya berpotensi menurunkan kualitas minyak pirolisis, tetapi juga dapat menimbulkan korosi pada reaktor. Penelitian menunjukkan bahwa PET dapat menyebabkan deaktivasi katalis yang parah akibat hilangnya sisi asam eksternal. Di sisi lain, pirolisis PP cenderung lebih ideal karena rasio H:C yang tinggi dan tidak adanya heteroatom, yang dapat menghasilkan minyak pirolisis kaya hidrokarbon dengan kualitas tinggi.

Studi tentang kopirolisis PP dan PET juga menunjukkan adanya interaksi sinergis antara kedua polimer tersebut. Penelitian menunjukkan bahwa keberadaan PP dapat menghambat perengkahan berlebihan dari PET dan meningkatkan hasil asam tereftalat hingga 85,0 wt% pada kondisi tertentu. Hal ini membuka peluang untuk mengoptimalkan proses pirolisis campuran PP dan PET, yang merupakan representasi nyata dari komposisi sampah plastik aktual, seperti pada limbah botol minuman yang terdiri dari botol PET dan tutup PP.

Hasil penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa semakin lama waktu pirolisis, jumlah minyak yang dihasilkan cenderung meningkat, yang mengindikasikan proses degradasi polimer yang lebih optimal seiring bertambahnya durasi pirolisis. Penelitian terhadap plastik

PET menunjukkan bahwa pirolisis selama 90 menit dapat menghasilkan rendemen minyak hingga 93%, jauh lebih tinggi dibandingkan pirolisis selama 30 menit yang hanya menghasilkan rendemen 8%.

Berdasarkan uraian di atas, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis karakteristik pirolisis dari limbah plastik PP dan PET, baik secara tunggal maupun dalam bentuk campuran, dengan fokus pada volume hasil, densitas, dan nilai kalor produk minyak yang dihasilkan. Penelitian ini diharapkan dapat memberikan data eksperimen baru yang bermanfaat bagi pengembangan teknologi pirolisis dan pengelolaan limbah plastik yang lebih berkelanjutan di Indonesia.

2. Tinjauan Literatur

2.1 Tinjauan Pustaka

Penelitian ini memiliki keterkaitan dengan sejumlah penelitian terdahulu yang dijadikan sebagai landasan dalam pelaksanaan penelitian. Berdasarkan kajian literatur yang telah dilakukan, ditemukan beberapa hasil studi sebelumnya yang relevan dengan topik pirolisis limbah plastik PP dan PET menjadi bahan bakar cair.

Penelitian yang dilakukan oleh Wibowo dan Mulyawan (2025) dengan judul "Penerapan Teknologi Pirolisa untuk Pengolahan Limbah Plastik Polypropylene Menjadi Bahan Bakar Bensin" mengkaji konversi limbah plastik Polypropylene (PP) menggunakan katalis Tanah Liat Bentonit. Penelitian ini menggunakan reaktor pirolisis dengan variasi suhu 250°C, 275°C, dan 300°C, dengan berat bahan baku 1 kg dan berat katalis 60 gram. Hasil pengujian menunjukkan bahwa minyak pirolisis dengan katalis Bentonite Clay menghasilkan nilai kalor sebesar 10.619 kal/g. Penelitian ini menjadi rujukan penting bagi penulis, terutama dalam hal pemilihan bahan baku dan variasi temperatur pirolisis yang digunakan.

Penelitian lain dilakukan oleh Pet, Bahan, dan Minyak (2021) yang membahas proses pirolisis sampah plastik Polyethylene Terephthalate (PET). Dalam penelitian tersebut, sebanyak 500 gram sampah plastik PET dipirolisis selama 6 jam proses pembakaran dan menghasilkan 90 ml minyak pirolisis. Berdasarkan penelitian ini, diperoleh massa jenis minyak pirolisis sebesar 0,688 g/ml dengan waktu pembakaran selama 6,51 menit. Pemanasan air menggunakan minyak pirolisis mencapai temperatur 75,6°C, dengan volume air yang menguap selama 5 menit sebesar 5,1 ml. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa semakin tinggi massa jenis suatu benda, maka semakin besar pula massa setiap volumenya, dan minyak pirolisis memiliki massa jenis paling rendah dibandingkan dengan minyak tanah dan minyak premium.

Penelitian yang dilakukan oleh Hidayat (2025) dengan judul "Pemanfaatan Sampah Plastik PET (Polyethylene Terephthalate) dan PP (Polypropylene) Menggunakan Proses Pirolisis Menjadi Bahan Bakar Minyak" menunjukkan hasil yang signifikan terkait pengaruh waktu pirolisis terhadap volume minyak yang dihasilkan. Pada penelitian tersebut, pirolisis PET dengan waktu 30 menit menghasilkan rata-rata minyak 600 ml dengan rendemen 8%, sementara pada waktu 60 menit menghasilkan 1000 ml dengan rendemen 13%, dan pada waktu 90 menit menghasilkan 7000 ml dengan rendemen 93%. Penelitian ini membuktikan bahwa semakin lama waktu pirolisis, jumlah minyak yang dihasilkan cenderung meningkat, yang mengindikasikan proses degradasi polimer yang lebih optimal seiring bertambahnya durasi pirolisis.

2.2 Landasan Teori

2.2.1 Karakteristik Plastik PP dan PET

Masalah sampah plastik merupakan masalah global yang tidak hanya terjadi di Indonesia tetapi di seluruh belahan dunia. Limbah plastik jenis Polypropylene (PP) dan Polyethylene Terephthalate (PET) merupakan jenis polimer yang paling banyak dijumpai dalam bentuk limbah yang terbuang ke lingkungan. Permasalahan utama dari limbah jenis ini adalah sangat sulit terurai di dalam tanah, membutuhkan waktu ratusan tahun, sehingga menjadi permasalahan serius bagi lingkungan hidup karena akan sangat mencemari lingkungan (Gorontalo et al., n.d.).

Daur ulang merupakan proses pengolahan kembali barang-barang yang dianggap sudah tidak mempunyai nilai ekonomis lagi melalui proses fisik maupun kimiawi atau kedua-duanya

sehingga diperoleh produk yang dapat dimanfaatkan atau diperjualbelikan kembali. Daur ulang (recycle) sampah plastik dapat dibedakan menjadi empat cara, yaitu daur ulang primer, daur ulang sekunder, daur ulang tersier, dan daur ulang quarter. Daur ulang primer adalah daur ulang limbah plastik menjadi produk yang memiliki kualitas hampir setara dengan produk aslinya, yang dapat dilakukan pada sampah plastik yang bersih dan tidak terkontaminasi. Daur ulang sekunder menghasilkan produk sejenis dengan kualitas di bawahnya. Daur ulang tersier mengubah sampah plastik menjadi bahan kimia atau bahan bakar, sedangkan daur ulang quarter adalah proses untuk mendapatkan energi dari sampah plastik (Gorontalo et al., n.d.).

2.2.2 Prinsip Dasar Pirolisis

Pirolisis merupakan teknologi yang cukup menjanjikan dalam mengkonversi biomassa maupun limbah plastik menjadi bahan bakar yang dapat diperbaharui. Teknologi pirolisis sangat berpotensi untuk dikembangkan karena ketersediaan sumber bahan yang melimpah, teknologinya mudah untuk dikembangkan, bersifat ramah lingkungan, dan menguntungkan secara ekonomi. Produk hasil pirolisis dapat dimanfaatkan untuk energi terbarukan, sumber bahan kimia, penghasil energi, dan sebagainya (Novita et al., 2021).

Prinsip dasar pirolisis adalah dekomposisi termokimia senyawa organik dalam kondisi tanpa oksigen, di mana energi panas memutus ikatan rantai polimer panjang (polimerisasi) menjadi molekul-molekul hidrokarbon yang lebih pendek, yang kemudian terkondensasi menjadi cairan. Secara teoritis, setiap jenis plastik memiliki profil suhu dekomposisi yang berbeda. PP, sebagai plastik rantai karbon lurus, umumnya mengalami dekomposisi utama pada rentang suhu 350–450°C dan menghasilkan yield cair yang tinggi, sementara PET, yang mengandung gugus aromatik (benzena) dan ikatan ester, memerlukan suhu yang lebih tinggi, yakni di atas 450°C, untuk memutus ikatannya yang lebih stabil, namun cenderung menghasilkan lebih banyak produk gas dan residu karbon (char) serta senyawa oksigen seperti asam benzoat yang dapat menurunkan kualitas minyak (Hidayat, 2025).

Potensi pirolisis selaras dengan penelitian yang tertuang dalam jurnal "Pirolisis Sampah Plastik PP (Polypropylene) menjadi Minyak Pirolisis sebagai Bahan Bakar Primer" oleh Megaprastio et al. (2023), yang memaparkan hasil penelitian berupa proses pirolisis sampah plastik PP yang diperoleh dari plastik cup bekas air mineral. Proses pirolisis dilakukan pada suhu 250°C dengan variasi waktu 1 jam, 2 jam, dan 3 jam. Penggunaan variasi waktu menghasilkan peningkatan minyak hasil pirolisis pada variasi waktu yang paling lama, karena penyerapan kalor oleh bahan baku lebih banyak didapatkan pada waktu proses yang lama sehingga dapat mencapai kesetimbangan termal dan plastik dapat berubah fasa menjadi gas. Pada pengujian nilai kalor, minyak hasil pirolisis memiliki nilai yang lebih tinggi dibanding dengan bensin murni, dengan nilai tertinggi pada proses 3 jam yaitu 11.670 kal/gr. Massa jenis minyak hasil pirolisis menempati posisi di antara bensin dan minyak tanah, sedangkan viskositas tertinggi didapatkan pada variasi waktu 3 jam.

2.2.3 Bahan Bakar Cair dari PP dan PET

Bahan bakar cair yang berasal dari proses daur ulang kimiawi polipropilena (PP) dan polietilena tereftalat (PET) merupakan salah satu inovasi dalam bidang pengelolaan sampah plastik dan energi terbarukan. Proses konversi ini umumnya dilakukan melalui teknologi pirolisis, di mana plastik dipanaskan pada suhu tinggi (biasanya antara 300-500°C) tanpa kehadiran oksigen, sehingga memutus rantai polimer panjang menjadi molekul hidrokarbon yang lebih pendek dalam bentuk minyak (Chen et al., 2022).

Pengembangan bahan bakar cair dari PP dan PET ini memiliki potensi besar untuk menangani dua masalah sekaligus: mengurangi tumpukan sampah plastik di tempat pembuangan akhir (TPA) dan lautan, serta menyediakan sumber energi alternatif yang dapat mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil mentah. Namun, terdapat beberapa tantangan signifikan yang harus diatasi, seperti kebutuhan energi input yang besar untuk mempertahankan suhu tinggi, serta produk cair yang dihasilkan (terutama dari PET) seringkali memerlukan pemurnian dan upgrading lebih lanjut sebelum dapat memenuhi spesifikasi bahan bakar kendaraan (Megaprastio et al., 2023). Dari sudut pandang ekonomi, kelayakan skala besar teknologi ini masih bergantung pada harga minyak mentah dunia dan biaya pengumpulan serta sortir sampah plastik (Yani et al., 2021).

2.2.4 Densitas

Analisis distribusi produk dalam proses pirolisis sampah plastik PP dan PET menjadi bahan bakar cair mengungkap kompleksitas konversi termokimia yang sangat dipengaruhi oleh perbedaan struktur kimia dasar kedua polimer tersebut. Pirolisis PP yang memiliki rantai hidrokarbon alifatik jenuh yang panjang dan lurus, cenderung menghasilkan distribusi produk cair dalam rentang hidrokarbon gasoline (C5-C12) dan diesel (C13-C20) yang lebih lebar dan homogen, dengan rendemen cair yang relatif tinggi karena mekanisme pemutusan rantai acak (random scission) yang dominan (Rizak dan Anam, 2022).

Pirolisis PET yang mengandung gugus aromatik dan ester dari asam tereftalat dan etilena glikol, menghadapi tantangan lebih besar; struktur aromatiknya yang stabil memerlukan suhu pirolisis yang lebih tinggi dan justru cenderung menghasilkan rendemen fraksi cair yang lebih rendah, dengan distribusi produk yang didominasi oleh senyawa aromatik seperti benzena, toluena, serta etilbenzena, disertai pembentukan produk samping seperti lilin (wax) dan residu karbon (char) dalam jumlah signifikan akibat reaksi kondensasi dan pembentukan karbon padat. Oleh karena itu, perbandingan komposisi umpan (blending PP dan PET) serta optimasi parameter operasi seperti suhu, laju pemanasan, dan penggunaan katalis menjadi kunci utama dalam memanipulasi distribusi produk ini untuk menggeser selektivitas menuju fraksi bahan bakar cair yang diinginkan (Kalor, 2022).

Rumus perhitungan nilai densitas adalah sebagai berikut:

$$\rho = \frac{W_2 - W_1}{V_0}$$

Keterangan:

W₂ = Berat piknometer kosong + sampel (gram)

W₁ = Berat piknometer kosong (gram)

V₀ = Volume piknometer (mL)

2.2.5 Nilai Kalor

Nilai kalor pada proses pirolisis sampah plastik PP dan PET menjadi bahan bakar cair mengungkap perbedaan mendasar yang signifikan antara kedua jenis polimer ini. Produk pirolisis PP umumnya menghasilkan bahan bakar cair dengan nilai kalor (sekitar 40-45 MJ/kg) yang lebih tinggi dan mendekati nilai kalor bahan bakar minyak solar atau bensin, sehingga lebih unggul secara energetik. Sebaliknya, produk cair dari PET memiliki nilai kalor yang jauh lebih rendah (sekitar 20-25 MJ/kg) karena struktur kimianya yang mengandung gugus aromatik tereftalat dan atom oksigen yang sudah terikat, sehingga kandungan energinya intrinsiknya lebih rendah dan menghasilkan senyawa seperti benzoic acid serta fenol yang tidak terlalu mudah terbakar (Suhartoyo, 2021).

Perbedaan ini bersumber dari komposisi hidrokarbon; PP sebagai poliolefin rantai lurus hanya terdiri dari unsur karbon dan hidrogen, sehingga ketika dipirolisis, ia terdekomposisi menjadi campuran hidrokarbon alifatik (parafin dan olefin) dengan rasio hidrogen-karbon yang tinggi yang sangat ideal untuk pembakaran, sementara PET sebagai poliester mengandung hingga 33% massa unsur oksigen dalam rantainya, yang berperan sebagai "pengencer" energi karena oksigen tidak memberikan kontribusi pada pembakaran dan justru membentuk gugus karboksil serta senyawa oksigenat lainnya yang memiliki nilai kalor lebih rendah. Oleh karena itu, dalam konteks produksi bahan bakar cair, plastik PP merupakan bahan baku pirolisis yang jauh lebih efektif dan bernilai ekonomi tinggi dibandingkan PET (Harlivia et al., 2022).

2.2.6 Volume Hasil

Volume hasil pirolisis adalah besaran yang menyatakan jumlah produk yang diperoleh dari proses dekomposisi termal bahan organik dalam kondisi tanpa oksigen, dibandingkan dengan massa bahan baku awal. Hasil ini biasanya dinyatakan dalam persen berat (% berat) dan terbagi menjadi tiga fraksi utama: cairan (minyak pirolisis), gas (syngas), dan padatan (char/arang). Secara sederhana, jika 100 kg sampah plastik diproses menghasilkan 50 kg minyak, 30 kg gas, dan 15 kg arang, maka volume hasil cairan adalah 50%, gas 30%, dan padatan 15%. Total ketiga fraksi idealnya mendekati 100%, dengan sisanya (biasanya <5%) merupakan

kehilangan massa akibat gas yang tidak terkondensasi atau residu yang menempel di reaktor (Pet et al., 2021).

Volume hasil pirolisis bersifat dinamis, artinya nilainya tidak tetap dan sangat bergantung pada kondisi operasi serta jenis bahan baku. Faktor-faktor utama yang memengaruhinya antara lain suhu reaksi (semakin tinggi suhu, yield gas meningkat dan yield padatan menurun), laju pemanasan (pemanasan cepat menghasilkan lebih banyak cairan, pemanasan lambat menghasilkan lebih banyak arang), waktu tinggal uap di reaktor, serta desain reaktor itu sendiri. Dalam praktik engineering, pengertian volume hasil menjadi kunci untuk menentukan efisiensi proses, memilih konfigurasi reaktor yang tepat, serta melakukan analisis ekonomi karena setiap fraksi produk memiliki nilai jual dan aplikasi yang berbeda (Erlangga, Rahmadi, dan Lubis, 2023).

Rumus untuk mencari volume hasil adalah:

$$\text{Yield} = \frac{\text{Massa minyak hasil pirolisis}}{\text{Massa bahan baku awal}} \times 100\%$$

2.3 Penelitian Terdahulu yang Relevan

Berdasarkan kajian literatur yang dilakukan, terdapat beberapa penelitian relevan yang menjadi acuan dalam penelitian ini. Penelitian oleh Wibowo dan Mulyawan (2025) tentang pirolisis PP dengan katalis Bentonit menunjukkan nilai kalor 10.619 kJ/g pada variasi suhu tertentu. Penelitian oleh Pet, Bahan, dan Minyak (2021) tentang pirolisis PET menghasilkan massa jenis 0,688 g/ml dengan waktu pembakaran 6,51 menit. Penelitian oleh Hidayat (2025) membuktikan bahwa semakin lama waktu pirolisis, volume minyak yang dihasilkan semakin meningkat, dengan rendemen 93% pada waktu 90 menit. Penelitian oleh Megaprasatio et al. (2023) menunjukkan bahwa minyak hasil pirolisis PP memiliki nilai kalor lebih tinggi daripada bensin murni, mencapai 11.670 kJ/gr pada proses 3 jam.

Penelitian-penelitian tersebut menjadi dasar bagi penulis untuk mengembangkan penelitian mengenai pengaruh variasi bahan pirolisis PP dan PET terhadap karakteristik bahan bakar cair yang meliputi densitas, nilai kalor, dan volume hasil, dengan menggunakan suhu konstan 400°C dan waktu pirolisis 60 menit sesuai dengan batasan masalah yang telah ditetapkan.

3. Metode

3.1 Metode Penelitian

Penelitian ini mengadopsi metodologi eksperimental berbasis proses pirolisis *batch* dalam reaktor terskalasi untuk menyelidiki konversi termokimia campuran plastik *Polypropylene* (PP) dan *Polyethylene Terephthalate* (PET). Unit operasi utama melibatkan preparasi umpan di mana PP dan PET dihancurkan dan dikondisikan hingga mencapai ukuran partikel yang homogen sebelum dilakukan penimbangan rasio massa yang spesifik. Setiap sampel dengan kapasitas umpan total 2 kg kemudian diumpankan ke dalam reaktor pirolisis. Kondisi operasi proses dikontrol secara ketat dengan mempertahankan suhu pirolisis konstan pada 400°C, yang berada dalam rentang dekomposisi termal optimal bagi kedua polimer, menggunakan sistem pemanas dan kontrol *temperature feedback*. Uap hidrokarbon hasil *cracking* termal kemudian dikondensasikan dalam *condensing train* untuk diperoleh fraksi bio-oil cair. Karakterisasi kuantitatif terhadap *yield* dan kualitas bio-oil, serta analisis produk samping (*char* dan gas non-kondensabel), dilakukan untuk mengevaluasi kinerja proses dan menentukan efek sinergis dari variasi komposisi rasio massa PP terhadap PET pada kondisi operasi yang telah ditetapkan.

3.2 Variabel Penelitian

3.2.1 Variabel Bebas

Variabel bebas dalam penelitian ini adalah jenis sampah plastik PP dan PET dengan variasi komposisi sebagai berikut:

- PP murni
- PET murni
- Campuran PP 75% + PET 25%
- Campuran PET 75% + PP 25%

3.2.2 Variabel Tetap

Variabel yang dijaga konstan selama penelitian meliputi:

- Sampel yang digunakan adalah Plastik PP dan PET
- Massa sampel yang digunakan dalam setiap proses pirolisis adalah 2 kg
- Waktu setiap proses pirolisis adalah 60 menit
- Temperatur suhu pirolisis: 400°C

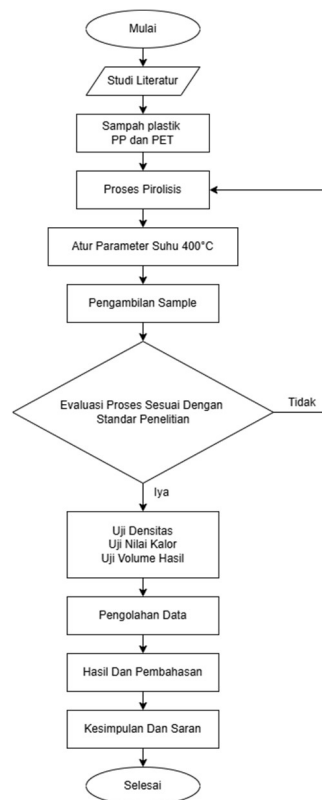
3.2.3 Variabel Terikat

Variabel yang dapat diukur dalam penelitian ini meliputi:

- Densitas (massa jenis) minyak hasil pirolisis
- Nilai kalor minyak hasil pirolisis
- Volume hasil minyak pirolisis

3.3 Diagram Alir Penelitian

Diagram alir penelitian disajikan pada Gambar 3.1 yang menggambarkan secara sistematis tahapan-tahapan penelitian mulai dari persiapan bahan baku, proses pirolisis, hingga pengujian karakteristik minyak hasil pirolisis.



Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian

3.4 Alat dan Bahan

3.4.1 Alat

Alat-alat yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

a. Reaktor Pirolisis

Unit reaktor pirolisis yang digunakan dalam penelitian ini merupakan reaktor tipe *batch* berkapasitas maksimal 3 kg sampah plastik per siklus, yang telah ditempatkan dan dioperasikan di lokasi mitra pengelola sampah di daerah Puger. Pemilihan desain reaktor *batch* ini didasarkan pada kesederhanaan operasinya, serta sesuai dengan kondisi

sumber daya dan keahlian yang tersedia di mitra Puger, yang merupakan kawasan pesisir dengan potensi sampah plastik kemasan yang signifikan.

b. Gas Regulator

Katup pengatur yang dipasang pada *fuel gas tank* untuk mengatur besarnya nyala api dan suhu yang dihasilkan.

c. Fuel Gas Tank

Tabung yang berisi bahan bakar (LPG) untuk menyalakan dan menjalankan *gas furnace*.

d. Termometer Higrometer

Berfungsi untuk mengukur suhu udara dan tingkat kelembapan relatif untuk mengontrol dan menjaga kestabilan suhu selama reaksi berlangsung.

e. Gas Furnace

Sumber panas yang menggunakan bahan bakar gas (LPG) untuk memanaskan reaktor.

f. Pirolisis Reactor

Tempat penampung sampah untuk proses pirolisis berlangsung yang terbuat dari bahan tahan panas (*stainless steel*).

g. Condensor

Unit pendingin (*condensor*) tempat uap hidrokarbon panas dari reaktor dialirkan untuk didinginkan.

h. Pipa Penghubung

Pipa penghubung (*Connecting Pipes*) digunakan untuk mengalirkan uap dari reaktor ke kondensor dan kemudian ke jalur pembuangan.

i. Saluran Gas Buang

Cerobong asap gas buang (*Chimney gas vent*) berupa pipa vertikal tinggi di sisi kanan yang terhubung ke sistem kondensasi/pemisahan.

j. Katup Pembuangan

Katup pembuangan/pengeluaran cairan (*Drain/Liquid Outlet Valve*) terdapat pada ujung pipa kecil dengan bentuk seperti katup.

k. Pemantik Api

Berfungsi sebagai sumber penyalan awal pada saat proses pirolisis bahan bakar cair.

l. Gunting

Untuk memotong bahan plastik PP dan PET menjadi ukuran yang lebih kecil sebelum proses pirolisis agar pemanasan berlangsung lebih merata.

m. Gelas Erlenmeyer

Erlenmeyer glass atau biasa disebut labu pendingin adalah wadah penampung sementara untuk minyak pirolisis hasil kondensasi dari proses pirolisis, sebagai alat bantu analisis produk yang di pirolisis.

n. Timbangan Digital

Digunakan untuk menimbang massa bahan baku plastik, massa sampel bahan bakar cair, serta sisa bahan setelah pengujian.

o. Stopwatch

Digunakan untuk mengukur dan mencatat waktu selama proses penelitian, khususnya waktu pembakaran dan durasi pengamatan pirolisis bahan bakar cair.

p. Piknometer

Berfungsi untuk menentukan volume dan massa sampel bahan bakar cair sehingga dapat dihitung nilai densitas (massa jenis) minyak hasil pirolisis.

q. Gelas Ukur

Digunakan untuk mengukur volume cairan pirolisis dengan lebih teliti.

r. Kunci T

Digunakan untuk mengencangkan dan melonggarkan baut pada reaktor pirolisis agar supaya kencang.

3.4.2 Bahan

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah sampah plastik *Polypropylene* (PP) dan *Polyethylene Terephthalate* (PET). Sampah PP dan PET adalah limbah plastik yang sangat

umum, kuat, dan tahan panas. Meskipun memiliki dampak lingkungan yang signifikan jika tidak dikelola, sampah PP dan PET memiliki nilai daur ulang yang tinggi dan dapat diubah menjadi berbagai produk baru yang berguna. Kunci untuk mengurangi dampak negatifnya terletak pada pemilahan yang benar.

3.5 Prosedur Pembuatan Bahan Bakar

3.5.1 Persiapan Bahan Baku Plastik PP dan PET

a. Persiapan Sampel Sampah Plastik PP dan PET

- 1) Siapkan sampah plastik PP dan PET yang sudah dipilah
- 2) Cuci sampah plastik PP dan PET untuk menghilangkan kotoran, pasir, dan label untuk menghasilkan produk pirolisis yang berkualitas dan mengurangi korosi pada reaktor
- 3) Keringkan sampah plastik untuk menghilangkan kandungan air agar tidak mengurangi efisiensi energi dan mempengaruhi kualitas bahan bakar
- 4) Potong atau cacah menjadi ukuran kecil dan seragam untuk memastikan perpindahan panas yang merata dan waktu pirolisis yang konsisten

b. Persiapan Reaktor dan Proses

- 1) Siapkan jenis reaktor yang digunakan untuk penelitian
- 2) Isi reaktor dengan sampah plastik PP atau PET yang sudah dicacah, pastikan tidak terlalu penuh untuk memberi ruang bagi ekspansi gas
- 3) Sebelum pemanasan/proses pirolisis dimulai, alirkan gas inert ke dalam reaktor selama beberapa menit untuk menciptakan lingkungan tanpa oksigen, mencegah terjadinya pembakaran yang dapat menghasilkan abu dan gas beracun

3.5.2 Tahap Proses Pirolisis

a. Proses Pirolisis

- 1) Panaskan reaktor dengan gas regulator dengan laju pemanasan (dengan suhu 400°C per 60 menit) yang penting untuk mengoptimalkan hasil
- 2) Penetapan suhu reaktor dengan suhu tetap 400°C. Ini adalah suhu variasi yang digunakan untuk mengkonversi PP dan PET menjadi bahan bakar
- 3) Pertahankan suhu selama 1 jam (60 menit), tergantung jumlah dan ukuran bahan sampel
- 4) Uap hidrokarbon yang terbentuk akan dialirkan keluar dari reaktor menuju sistem kondensasi, mengembun, dan menetes ke dalam penampung dalam bentuk cairan

b. Proses Pemisahan dan Pembersihan

- 1) Uap panas dialirkan dari sistem pendingin (kondensor), biasanya berupa pipa spiral yang didinginkan dengan air, di mana uap akan mengembun menjadi cairan yaitu *pyrolysis oil*
- 2) Cairan minyak ditampung ke wadah penampung dan gas yang tidak terkondensasi (*Non-Condensable Gas/NCG*) seperti metana dan etana, dialirkan ke *burner* sebagai sumber energi untuk memanaskan reaktor, membuat proses lebih mandiri secara energi
- 3) Setelah proses selesai dan reaktor mendingin, buka reaktor dan bersihkan residu padat (*char/coke*) yang tertinggal di dalam reaktor
- 4) Minyak/sampel pirolisis yang dihasilkan dilanjutkan pada pengujian pengambilan data selanjutnya

3.5.3 Tahap Persiapan Reaktor dan Sistem

- a. Reaktor pirolisis dipastikan dalam kondisi bersih dan tertutup rapat sebelum proses pemanasan dimulai
- b. Bahan baku PP dan PET ditimbang sesuai dengan massa yang telah ditentukan untuk setiap variasi suhu pirolisis
- c. Bahan baku dimasukkan ke dalam reaktor pirolisis, kemudian sistem pendingin (kondensor) dipastikan berfungsi dengan baik
- d. Proses pirolisis dijalankan pada variasi suhu yang telah ditentukan, yaitu 400°C

- e. Pemanasan dilakukan dengan durasi yang sama untuk setiap variasi suhu agar hasil volume dapat dibandingkan secara adil
- f. Uap hasil pirolisis dialirkan menuju kondensor dan didinginkan hingga berubah menjadi fase cair
- g. Produk cair hasil pirolisis ditampung pada wadah penampung yang telah diberi skala volume
- h. Setelah proses pirolisis selesai, produk cair dibiarkan hingga mencapai suhu ruang
- i. Volume bahan bakar cair yang dihasilkan diukur menggunakan gelas ukur atau wadah ukur berskala dengan ketelitian tertentu
- j. Pembacaan volume dilakukan dengan posisi mata sejajar dengan permukaan cairan untuk menghindari kesalahan paralaks
- k. Volume hasil dicatat sebagai volume bahan bakar cair hasil pirolisis untuk masing-masing variasi suhu
- l. Pengujian volume hasil dilakukan untuk setiap variasi suhu pirolisis dengan kondisi operasi yang sama
- m. Untuk meningkatkan keakuratan data, pengujian diulangi minimal tiga kali pada setiap variasi suhu
- n. Nilai volume akhir ditentukan berdasarkan nilai rata-rata dari hasil pengulangan pengujian
- o. Data volume hasil digunakan sebagai parameter *yield* bahan bakar cair dan dianalisis pengaruhnya terhadap variasi suhu pirolisis

3.5.4 Tahap Pengujian Densitas Bahan Bakar

- a. Piknometer dibersihkan menggunakan akuades untuk menghilangkan sisa kotoran dan residu bahan sebelumnya
- b. Piknometer yang telah dibersihkan kemudian dikeringkan hingga tidak terdapat sisa air di dalam maupun di permukaannya
- c. Piknometer kosong ditimbang menggunakan neraca analitik untuk memperoleh massa piknometer kosong
- d. Sampel bahan bakar cair disiapkan dan dipastikan berada pada suhu ruang yang optimal
- e. Sampel bahan bakar dimasukkan ke dalam piknometer secara perlahan hingga mencapai volume tetap sebesar 10 mL
- f. Pengisian dilakukan dengan hati-hati untuk mencegah terbentuknya gelembung udara di dalam piknometer
- g. Setelah terisi penuh, piknometer ditutup rapat dan bagian luar piknometer dibersihkan dari sisa bahan bakar yang menempel
- h. Piknometer berisi sampel ditimbang kembali menggunakan neraca analitik untuk memperoleh massa total piknometer dan bahan bakar
- i. Massa bahan bakar dihitung dari selisih antara massa piknometer berisi sampel dan massa piknometer kosong
- j. Nilai densitas bahan bakar dihitung dengan membagi massa bahan bakar terhadap volume sampel yang digunakan (10 mL)
- k. Pengukuran densitas dilakukan pada kondisi suhu yang sama untuk setiap sampel guna menjaga konsistensi hasil pengujian
- l. Pengujian densitas diulangi sebanyak tiga kali untuk setiap sampel guna memperoleh data yang lebih akurat
- m. Nilai densitas akhir ditentukan berdasarkan nilai rata-rata dari seluruh hasil pengulangan pengujian
- n. Data densitas yang diperoleh digunakan sebagai salah satu parameter karakteristik bahan bakar dan dianalisis dengan membandingkannya terhadap densitas bahan bakar konvensional

3.5.5 Tahap Pengumpulan Data

- a. Data hasil penelitian dikumpulkan dari pengujian volume minyak pirolisis, massa minyak, densitas, dan laju pembakaran untuk setiap variasi bahan pirolisis

- b. Data volume minyak pirolisis dianalisis secara deskriptif dengan membandingkan volume yang dihasilkan pada masing-masing variasi suhu untuk mengamati kecenderungan perubahan hasil akibat perbedaan bahan pirolisis
- c. Data massa minyak pirolisis digunakan untuk menghitung persentase hasil (*yield*) bahan bakar cair dengan membandingkan massa minyak yang dihasilkan terhadap massa bahan baku plastik PP maupun PET pada setiap sampel
- d. Hasil perhitungan persentase *yield* dianalisis secara komparatif antar variasi suhu untuk menentukan suhu pirolisis yang menghasilkan persentase minyak tertinggi
- e. Data densitas minyak pirolisis dihitung berdasarkan hasil pengukuran massa dan volume menggunakan metode piknometer, kemudian ditentukan nilai rata-rata densitas dari hasil pengulangan pengujian
- f. Nilai densitas yang diperoleh dianalisis secara deskriptif dengan membandingkannya antar variasi suhu pirolisis serta dibandingkan dengan densitas bahan bakar konvensional sebagai acuan karakteristik fisik
- g. Data laju pembakaran dianalisis dengan menghitung laju pembakaran berdasarkan perbandingan antara massa bahan bakar yang terbakar dan waktu pembakaran yang dicatat selama pengujian
- h. Nilai laju pembakaran dari setiap variasi suhu dihitung nilai rata-ratanya untuk mengamati perbedaan karakteristik pembakaran akibat variasi bahan pirolisis
- i. Seluruh data hasil analisis disajikan dalam bentuk tabel dan grafik untuk memudahkan visualisasi tren perubahan akibat variasi bahan pirolisis

3.6 Tempat dan Waktu Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan pada tanggal 2 Februari 2026 di Desa Jambearum Puger Jember, bekerja sama dengan mitra karang taruna setempat sebagai lokasi pengujian dan operasional reaktor pirolisis.

4. Hasil dan Pembahasan

4.1 Hasil Penelitian

Penelitian ini menggunakan sampah plastik polypropylene (PP) dan polyethylene terephthalate (PET) kemudian dilakukan proses pirolisis dengan menggunakan variasi bahan (PP murni, PET murni, PP 75% + PET 25%, dan PET 75% + PP 25%) dengan menggunakan suhu 400°C selama 60 menit. Pembuatan bahan bakar pirolisis dilakukan pada tanggal 2 Februari 2026 di desa Jambearum - Puger - Jember. Dari uji pembuatan bahan bakar minyak pirolisis guna untuk mengetahui Nilai Densitas, Nilai Kalor, Dan Volume Hasil dari sampah plastik polypropylene (PP) dan polyethylene terephthalate (PET).

Minyak pirolisis di proses menggunakan alat pirolisis dengan menggunakan sampah plastik polypropylene (PP) dan polyethylene terephthalate (PET) untuk mendapatkan cairan bahan bakar minyak plastik.



Gambar 4. 1 Minyak Pirolisis PP dan PET

4.2 Densitas

Pengujian densitas bertujuan untuk menentukan karakteristik fisik bahan bakar yang dihasilkan dari hasil variasi bahan pirolisis. Nilai densitas digunakan sebagai parameter mutu bahan bakar serta sebagai indikator kesesuaian terhadap standar yang ditetapkan. Sebelum Pengukuran densitas dilakukan penimbang terlebih dahulu piknometer kosong dan piknometer yang sudah terisi keempat sample tersebut.

Tabel 4. 1 Hasil timbang densitas

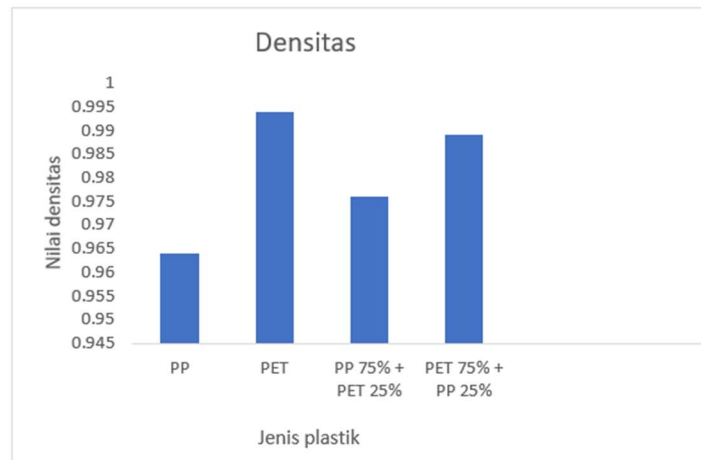
NO	Sample	Berat (g)
1.	Piknometer kosong	18.81g
2.	Piknometer + sample (PP)	28.45g
3.	Piknometer + sample (PET)	28.75g
4.	Piknometer + sample (PP 75% + PET 25%)	28.57g
5.	Piknometer + sample (PET 75% + PP 25%)	28.70g

Data Tabel 4.1 menyajikan data hasil penimbangan piknometer kosong dan piknometer yang berisi sampel minyak pirolisis dari hasil variasi bahan sampah PP dan PET. Berat piknometer kosong tercatat sebesar 18.81 g, sedangkan berat piknometer berisi sampel 1 (PP) sebesar 28,45 g, sampel 2 (PET) sebesar 28,75 g, sampel 3 (PP 75% + PET 25%) sebesar 28,57 g, sampel 4 (PP 25% + PET 75%) sebesar 28.70g. Data tersebut menunjukkan adanya perbedaan massa pada masing-masing sampel. Namun, pada tahap ini pengujian densitas belum dilakukan karena diperlukan data volume piknometer sebagai dasar perhitungan densitas. Berdasarkan perhitungan yang telah dilakukan, nilai densitas dari keempat sampel disajikan pada Tabel 4.2.

Tabel 4. 2 Hasil nilai densitas

No	Jenis minyak	Densitas (g/ml)
1.	PP	0,964
2.	PET	0,994
3.	PP 75% + PET 25%	0,976
4.	PET 75% + PP 25%	0,989

Tabel 4.2 menyajikan hasil perhitungan densitas dari empat jenis bahan bakar yang digunakan sebagai hasil dari variasi bahan pirolisis plastik PP dan PET berdasarkan data yang diperoleh yaitu, Minyak PP menunjukkan nilai densitas sebesar 0,964 g/mL. Sementara itu, Minyak PET memiliki nilai densitas sebesar 0,994 g/mL, Untuk campuran PP 75% + PET 25% menunjukkan nilai densitas 0,976 g/mL, dan campuran PP 25% + PET 75% menunjukkan nilai densitas sebesar 0,989 g/mL Perbedaan nilai densitas tersebut mengindikasikan adanya variasi sifat fisik pada masing-masing jenis sampel yang berbeda. sehingga menunjukkan bahwa minyak PP memiliki struktur molekul yang relatif lebih ringan dibandingkan dengan minyak PET. Data hasil perhitungan densitas pada setiap sampel selanjutnya disajikan dalam bentuk grafik pada Gambar



Gambar 4. 1 Grafik nilai densitas

Gambar 4.2 menunjukkan perbandingan nilai densitas pada setiap sampel minyak pirolisis yang dihasilkan dari empat jenis variasi bahan Berdasarkan hasil perhitungan, sampel yang berasal dari plastik PP memiliki nilai densitas terendah sebesar 0,964 g/mL, yang mengindikasikan massa jenis yang lebih kecil dibandingkan sampel lainnya. Sementara itu sampel dari plastik PET menunjukkan nilai densitas sebesar 0,994 g/mL, yang masih lebih tinggi daripada plastik PP. Adapun minyak pirolisis dengan sampel PP 75% + PET 25% memiliki nilai densitas 0,976 g/mL, menunjukkan massa jenis yang lebih kecil di antara plastik campuran PP dan PET, dan sampel PP 25% + PET 75% memiliki nilai densitas sebesar 0,989 g/mL yang memiliki nilai densitas paling tinggi di antara keempat sampel tersebut.

Berdasarkan hasil penelitian, nilai densitas minyak hasil pirolisis plastik PP dan PET menunjukkan peningkatan nilai densitas karena perbedaan massa jenis bahan plastik pirolisis, di mana densitas tertinggi sebesar 0,989 g/mL diperoleh sampah plastik campuran PP 25% + PET 75% dan densitas terendah sebesar 0,964 g/mL dihasilkan pada plastik PP. Pola penurunan densitas seiring perbedaan sampah plastik PP dan PET ini konsisten dengan temuan dalam beberapa penelitian terdahulu. Hasil penelitian menunjukkan bahwa plastik PP memiliki nilai densitas paling kecil daripada plastik PET, dan begitujuga dengan plastik campuran PP dan PET, yang mana lebih banyak campuran plastik PP akan lebih rendah nilai densitasnya dibandingkan dengan lebih banyak campuran plastik PET daripada PP.

4.3 Nilai Kalor

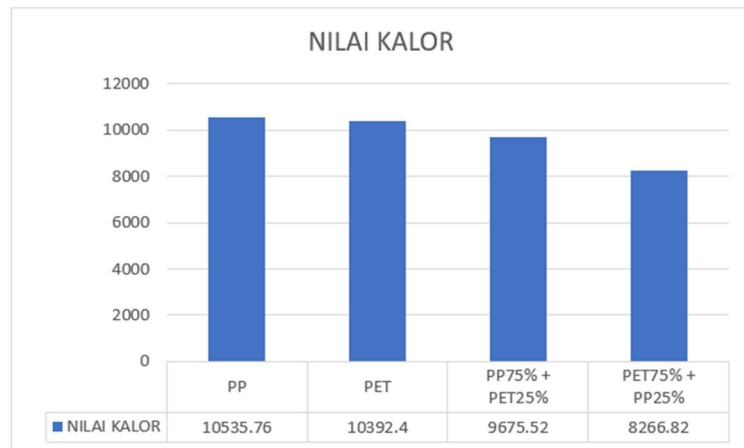
Pengujian Nilai kalor bertujuan untuk mengetahui seberapa besar panas yang bisa dihasilkan oleh suatu bahan bakar, sehingga kita bisa menilai apakah bahan bakar tersebut bagus, efisien, dan layak digunakan. Secara sederhana, penelitian ini bertujuan untuk mengukur langsung kandungan panas dalam suatu bahan, mencari cara meningkatkan nilai kalorinya (misalnya melalui pemanggangan atau pencampuran), mengetahui pengaruh kotoran seperti abu terhadap panas yang dihasilkan, serta mengolah limbah (seperti sekam padi atau kulit singkong) menjadi bahan bakar alternatif yang berguna dan ramah lingkungan.

Tabel 4. 3 hasil nilai kalor

NO	Jenis Sampah	Nilai Kalor (Cal/gram)
1.	PP	10535.76
2.	PET	10392.40
3.	PP 75% + PET 25%	9675.52
4.	PET 75% + PP 25%	8266.82

Data pada Tabel 4.3 memperlihatkan hasil pengukuran nilai kalor dari empat jenis bahan plastik yang dimanfaatkan sebagai bahan baku pembuatan pirolisis, yaitu plastik PP, plastik PET, plastik PP 75% + PET 25%, dan plastik PET 75% + PP 25%. Hasil pengujian

menunjukkan bahwa minyak plasti PP memiliki nilai kalor tertinggi sebesar 10535.76Cal/gram, Minyak plastic PET memiliki nilai kalor sebesar 10392.40Cal/gram, minyak plasti PP 75% + PET 25% memiliki nilai kalor sebesar 9675.52 Cal/gram, Sementara itu, minyak PET 75% + PP 25% menunjukkan nilai kalor paling rendah yaitu 8266.82Cal/gram, Selanjutnya, perbandingan nilai kalor empat minyak tersebut disajikan dalam bentuk grafik pada Gambar 4.3.



Gambar 4. 3 Grafik hasil nilai kalor

Gambar 4.3 memperlihatkan hasil perbandingan nilai kalor pirolisis yang diproduksi dari empat jenis plastik, yaitu plastik PP, plastic PET, plastic PP 75% + PET 25%, dan plastik PET 75% + PP 25%. Minyak plastik PP tercatat memiliki nilai kalor paling tinggi, yaitu sebesar 10535.76Cal/gram, yang menunjukkan kemampuan melepaskan energi paling besar ketika dibakar. Di sisi lain, minyak plastik PET menunjukkan nilai kalor sebesar 10392.40Cal/gram, yang masih tergolong tinggi meskipun lebih rendah dibandingkan minyak PP. Adapun minyak plastik PP 75% + PET 25% menghasilkan nilai kalor 9675.52Cal/gram, dan minyak plastik PET 75% + PP 25% menghasilkan nilai kalor paling rendah yaitu 8266.82Cal/gram. Perbedaan nilai kalor pirolisis berbeda tergantung pada jenis minyak, komposisi campuran bahan yang digunakan. Perbedaan nilai kalor disebabkan oleh perbedaan kandungan zat penyusun bahan bakar. Bahan bakar dengan nilai kalor lebih tinggi menghasilkan energi panas lebih besar sehingga lebih efisien dibandingkan bahan bakar dengan nilai kalor yang lebih rendah.

4.4 Volume Hasil

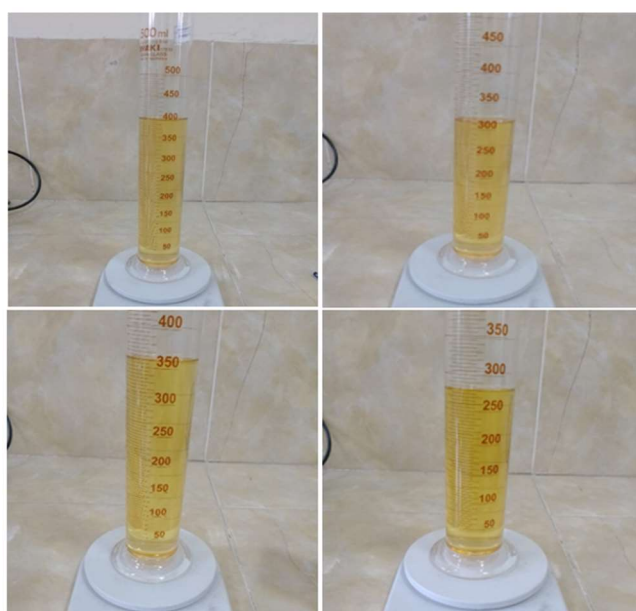
Pengujian volume hasil bertujuan untuk mengukur kuantitas produk cair yang diperoleh dari setiap variasi bahan pirolisis. Nilai volume hasil digunakan sebagai parameter utama dalam mengevaluasi rendemen proses serta sebagai dasar perhitungan untuk analisis lebih lanjut. Sebelum pencatatan volume, dilakukan pendinginan dan penyaringan terhadap produk untuk memisahkan fase cair. Berdasarkan perhitungan persentase hasil minyak pirolisis dengan massa bahan baku sebesar 2 kg pada setiap sampel, diperoleh yield minyak sebesar 19,5% pada plastik PP, 15,5% pada plastik PET, 18% pada plastik campuran PP 75% + PET 25%, dan 14% campuran plastik PP 25% + PET 75%. Hasil ini menunjukkan bahwa perbedaan bahan pirolisis pada pengujian cenderung menurunkan persentase hasil minyak, yang mengindikasikan terjadinya perbedaan bahan dan campuran bahan pirolisis.. Data volume akhir dari keempat sampel tersebut disajikan pada Tabel 4.4.

Tabel 4. 4 Volume hasil

NO	Sample	Volume (ml)	Berat (g)	Persentase (%)
1.	PP	390 ml	671 g	19,5%
2.	PET	310 ml	612 g	15,5%
3.	PP 75% + PET 25%	360 ml	644 g	18 %

4.	PET 75% + PP 25%	280 ml	584 g	14%
----	---------------------	--------	-------	-----

Data Tabel 4.4 menyajikan data volume bahan bakar cair yang diperoleh dari proses pirolisis pada variasi bahan plastik PP, PET, PP75% + PET 25% dan PP 25% + PET 75% dari hasil perhitungan di atas. Volume hasil sampel 1 (PP) tercatat sebesar 390 ml, sampel 2 (PET) sebesar 310 ml, sampel 3 (PP 75% + PET 25%) sebesar 360 ml, dan sampel 4 (PP 25% + PET 75%) Selain itu, hasil penimbangan menunjukkan bahwa berat bahan bakar cair yang dihasilkan masing-masing sebesar 671 g pada plastik PP, 612 g pada plastik PET, 644 g pada plastik PP 75% + PET 25%, dan 584 g pada plastik PP 25% + PET 75%. Data tersebut menunjukkan adanya variasi volume dan berat hasil pada setiap perbedaan bahan, yang mengindikasikan bahwa perbedaan bahan pirolisis berpengaruh terhadap jumlah cairan yang dihasilkan.



Gambar 4. 4 Volume hasil

Perbedaan volume minyak yang dihasilkan dari pirolisis PP dan PET pada variasi bahan menunjukkan pola yang tidak linear, dengan volume tertinggi pada bahan PP (390 ml) diikuti dengan bahan campuran PP 75% + PET 25% (360 ml) kemudian bahan PET (310 ml) dan bahan campuran PP 25% + PET 75% (280 ml). Variasi volume ini dipengaruhi secara langsung oleh mekanisme bahan plastik yang berbeda, di mana bahan pirolisis yang berbeda akan mempengaruhi jumlah volume pada setiap pengujian cairan/minyak pirolisis. Volume minyak yang relatif tinggi pada bahan PP menunjukkan bahwa bahan tersebut berada dalam golongan sampah plastik yang baik daripada bahan plastik PET yang berada di bawah sampah plastik PP dalam hasil minyak atau volume yang di dapat.

5. Perbandingan

Penelitian terdahulu tentang pirolisis limbah plastik telah banyak dilakukan dengan berbagai pendekatan yang berbeda. Wibowo dan Mulyawan (2025) meneliti pirolisis PP dengan katalis Bentonit pada suhu 250-300°C yang menghasilkan nilai kalor 10.619 kal/g. Pet, Bahan, dan Minyak (2021) mengkaji pirolisis PET selama 6 jam yang menghasilkan minyak dengan massa jenis 0,688 g/ml. Hidayat (2025) membuktikan bahwa semakin lama waktu pirolisis (30-90 menit) pada PET meningkatkan rendemen minyak dari 8% hingga 93%. Megaprasatio et al. (2023) menunjukkan pirolisis PP pada suhu 250°C dengan variasi waktu 1-3 jam menghasilkan nilai kalor tertinggi 11.670 kal/gr pada proses 3 jam. Penelitian ini memiliki posisi berbeda dan menawarkan kebaruan dengan mengkaji variasi komposisi campuran PP dan PET yang belum banyak diteliti secara komprehensif, yaitu PP murni, PET murni, PP 75% + PET 25%, dan PET 75% + PP 25%, pada suhu konstan 400°C selama 60 menit

dengan kapasitas reaktor 2 kg. Penelitian ini juga menganalisis secara simultan tiga parameter utama (densitas, nilai kalor, dan volume hasil) untuk melihat pengaruh komposisi bahan baku terhadap kualitas produk secara holistik, serta mengkaji efek sinergis campuran PP dan PET yang masih merupakan area penelitian yang terus berkembang. Dengan demikian, penelitian ini mengisi celah pengetahuan mengenai pengaruh spesifik rasio PP terhadap PET terhadap karakteristik bahan bakar cair, memberikan kontribusi baru berupa data eksperimen yang sistematis untuk pengembangan teknologi pirolisis campuran plastik PP dan PET.

6. Kesimpulan

Berdasarkan hasil pengujian, karakteristik produk cair yang dihasilkan dari pengolahan limbah plastik sangat dipengaruhi oleh jenis dan komposisi bahan baku antara Polypropylene (PP) dan Polyethylene Terephthalate (PET). Pada uji densitas, diketahui bahwa semakin besar kandungan PET dalam campuran, maka densitas atau massa jenis minyak yang dihasilkan akan semakin tinggi. Hal ini dibuktikan dengan PP murni yang menghasilkan densitas terendah sebesar 0,964 g/mL, kemudian meningkat pada campuran PP 75% + PET 25% (0,976 g/mL) dan campuran PET 75% + PP 25% (0,989 g/mL), hingga mencapai angka tertinggi pada PET murni sebesar 0,994 g/mL. Fenomena ini terjadi karena struktur molekul PET secara alami jauh lebih rapat dan kompleks dibandingkan dengan struktur molekul PP yang lebih renggang.

Sementara itu, pengujian nilai kalor menunjukkan hasil yang berkebalikan, di mana peningkatan proporsi plastik PP justru membuat nilai energi panas yang dihasilkan semakin tinggi. PP murni menempati posisi teratas dengan nilai kalor sebesar 10.535,76 Cal/gram karena kaya akan ikatan hidrogen dan karbon yang efektif melepaskan panas, disusul oleh PET murni sebesar 10.392,40 Cal/gram. Namun, ketika kedua bahan tersebut dicampur, terjadi interaksi antarmolekul yang kurang optimal sehingga menurunkan nilai energinya, seperti yang terlihat pada campuran PP 75% + PET 25% (9.675,52 Cal/gram) dan puncaknya pada campuran PET 75% + PP 25% yang menghasilkan nilai kalor terendah sebesar 8.266,82 Cal/gram.

Selaras dengan nilai kalor, volume hasil dan persentase rendemen (yield) juga menunjukkan bahwa plastik PP murni merupakan bahan baku yang paling efisien dan produktif. Minyak cair yang diperoleh dari PP murni mencapai volume tertinggi sebesar 390 ml dengan yield 0,33%, diikuti berturut-turut oleh campuran PP 75% + PET 25% sebanyak 360 ml (yield 0,32%) dan PET murni sebanyak 310 ml (yield 0,30%). Sebaliknya, campuran PET 75% + PP 25% memberikan hasil paling sedikit dengan volume hanya 280 ml dan yield terendah sebesar 0,29% karena karakteristik PET yang lebih sulit dikonversi menjadi produk cair. Secara keseluruhan, dapat disimpulkan bahwa untuk mendapatkan bahan bakar alternatif dengan kuantitas melimpah dan kualitas energi yang tinggi, penggunaan bahan baku PP murni atau campuran yang didominasi oleh PP jauh lebih unggul dibandingkan dengan melibatkan plastik PET.

Kontribusi Penulis: Penelitian ini memberikan kontribusi ilmiah berupa data eksperimen baru tentang pengaruh komposisi campuran PP dan PET terhadap karakteristik pirolisis yang meliputi densitas, nilai kalor, dan volume hasil, yang masih jarang dikaji secara sistematis. Secara praktis, penelitian ini memberikan panduan bagi industri daur ulang bahwa bahan baku PP murni atau campuran yang didominasi PP menghasilkan bahan bakar dengan kuantitas dan kualitas energi yang lebih unggul dibandingkan PET. Penelitian ini juga berkontribusi pada upaya pengelolaan lingkungan dengan mengkonversi limbah plastik menjadi bahan bakar alternatif, mendukung konsep ekonomi sirkular, serta menyediakan prosedur eksperimental terstandar yang dapat diadopsi untuk penelitian sejenis.

Pendanaan: Penelitian ini dilaksanakan dengan sistem pendanaan mandiri yang bersumber dari dana pribadi penulis, tanpa melibatkan bantuan atau sponsor dari lembaga pemerintah, swasta, maupun pihak ketiga lainnya. Seluruh biaya operasional yang mencakup pengadaan bahan baku limbah plastik PP dan PET, penyewaan peralatan reaktor pirolisis di lokasi mitra karang taruna Puger, pengujian karakterisasi sampel di laboratorium, serta penyusunan laporan penelitian ditanggung sepenuhnya oleh penulis. Dengan pendanaan mandiri ini, penelitian tetap dapat berjalan dengan optimal dan menghasilkan data yang akurat dan dapat dipertanggungjawabkan secara ilmiah.

Pernyataan Ketersediaan Data: Data yang mendukung temuan dalam penelitian ini tersedia atas permintaan yang wajar dari penulis korespondensi. Seluruh data mentah hasil pengujian densitas, nilai kalor, dan volume hasil pirolisis dari keempat variasi sampel (PP murni, PET murni, PP 75% + PET 25%, dan PET 75% + PP 25%) telah didokumentasikan dan disimpan oleh penulis. Data tersebut mencakup hasil penimbangan piknometer, nilai densitas, hasil uji laboratorium nilai kalor, serta volume dan persentase rendemen minyak pirolisis. Selain itu, dokumentasi proses penelitian berupa foto-foto kegiatan dan catatan lapangan juga tersedia. Data tidak dipublikasikan secara daring karena sifatnya yang spesifik dan terbatas pada lingkup penelitian ini, namun dapat diakses untuk keperluan verifikasi atau pengembangan penelitian lanjutan dengan menghubungi penulis secara langsung.

Ucapan Terima Kasih: Penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada Universitas Muhammadiyah Jember, khususnya Fakultas Teknik dan Program Studi Teknik Mesin, yang telah memberikan kesempatan dan fasilitas akademik selama masa perkuliahan hingga terselesaikannya penelitian ini. Ucapan terima kasih juga penulis sampaikan kepada Mitra Karang Taruna Puger di Desa Jambearum, yang telah memberikan izin, dukungan, dan fasilitas berupa lokasi serta reaktor pirolisis untuk pelaksanaan penelitian. Dukungan dan kerja sama dari kedua pihak sangat berarti bagi kelancaran proses penelitian, sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi ini dengan baik.

Konflik Kepentingan: Penulis menyatakan bahwa tidak terdapat konflik kepentingan dalam pelaksanaan penelitian dan penyusunan skripsi yang berjudul "Pengaruh Variasi Bahan Pirolisis Menjadi Bahan Bakar Cair Berbasis Sampah Plastik PP dan PET" ini. Penelitian dilakukan secara independen tanpa adanya intervensi, pengaruh, atau kepentingan finansial dari pihak manapun yang dapat mempengaruhi objektivitas hasil penelitian. Seluruh proses mulai dari perencanaan, pelaksanaan eksperimen, analisis data, hingga penarikan kesimpulan dilakukan secara jujur dan transparan sesuai dengan kaidah ilmiah yang berlaku. Penulis juga tidak memiliki afiliasi bisnis, hubungan kerja, maupun kepentingan pribadi dengan mitra karang taruna Puger selain sebagai tempat pelaksanaan penelitian. Dengan demikian, hasil penelitian ini dapat dipertanggungjawabkan secara ilmiah dan bebas dari unsur kepentingan yang bersifat komersial maupun non-ilmiah lainnya.

Referensi

- [1] Bella, R. R., Alda Restanti, Program Studi, Teknik Lingkungan, and Fakultas Teknik. 2024. "Pengolahan Sampah Plastik Menjadi Bahan Bakar Minyak Alternatif Dengan Metode Pirolisis."
- [2] Chen, Huan, Jun-jian Wang, Pei-jia Ku, Martin Tsz-ki Tsui, Rebecca B. Abney, Asmeret Asefaw Berhe, Qiang Zhang, Sarah D. Burton, Randy A. Dahlgren, and Alex T. Chow. 2022. "Burn Intensity Drives the Alteration of Phenolic Lignin to (Poly) Aromatic Hydrocarbons as Revealed by Pyrolysis Gas Chromatography – Mass Spectrometry (Py-GC / MS)." doi: 10.1021/acs.est.2c00426.
- [3] Erlangga, Zeisha, Fahrul Rahmadi, and Andreas Lubis. 2023. "Studi Nilai Massa Jenis Bahan Bakar Alternatif Minyak Dari Proses Pirolisis Sampah Plastik HDPE (High Density Polyethylene) Dan PET (Polyethylene Terephthalate)." 11(2):540–47.
- [4] Gorontalo, Universitas Negeri, Universitas Cokroaminoto Palopo, Idawati Supu, Ni Nyoman Fitriani, and Sardayanti Sulmi. n.d. "PENERAPAN ALAT SEDERHANA DALAM KONVERSI LIMBAH PLASTIK JENIS POLYPROPYLENE (PP) Dan POLYETHYLENE TEREPHTHALATE (PET) MENJADI BAHAN BAKAR MINYAK." 3:9–12.
- [5] Harlivia, Rara, Sahrul Effendy, Program Studi, Teknik Energi, Jurusan Teknik Kimia, and Politeknik Negeri Sriwijaya. 2022. "Pengaruh Persen Katalis Zeolit Alam Terhadap Yield Bahan Bakar Cair Proses Pirolisis Dari Limbah Plastik Polypropylene The Effect of Percentage of Natural Zeolit Catalyst on Liquid Fuel Yield from Polypropylene Plastic Waste." 2(11):453–59.
- [6] Hidayat, Ahmad Taufiq. 2025. "Pemanfaatan Sampah Plastik PET (Polyethylene Terephthalat e) Dan PP (Polypropylene) Menggunakan Proses Pirolisis Menjadi Bahan Bakar Minyak." 7(4):2840–54.
- [7] Irawan, Raka, Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Sultan, and Ageng Tirtayasa. 2022. KEKUATAN TARIK MATERIAL PLASTIK JENIS PP DAN PET PADA MESIN PENGOLAH PLASTIK Skripsi PET PADA MESIN PENGOLAH PLASTIK.
- [8] Jurnal, Areopagus, Pendidikan Dan, Teologi Kristen, Regina Elriana, and Oki Prigiya. 2021. "Pembuangan Limbah Plastik : Studi Kasus Limbah Rumah Tangga Di Desa Sigi." 19(2):1–8.
- [9] Kalor, D. A. N. Nilai. 2022. "PENGARUH PENAMBAHAN KATALIS ACTIVE CARBON DAN BENTONITE CLAY PADA PIROLISIS SAMPAH PLASTIK POLYETHYLENE TEREPHTHALATE (PETE) TERHADAP." 20(3).
- [10] Lingkungan, Jurnal Ilmu, Damian Andreas Lubis, Y. Fitrianingsih, Suci Pramadita, and Christiadora Asbanu. 2022. "Pengolahan Sampah Plastik HDPE (High Density Polyethylene) Dan PET (Polyethylene Terephthalate) Sebagai Bahan Bakar Alternatif Dengan Proses Pirolisis." 20(4):735–42. doi: 10.14710/jil.20.4.735-742.
- [11] Megaprastio, Bayu, Mochamad Syamsiro, Muhammad Arief, and Fadmi Rina. 2023. "Teknologi Pirolisis Untuk Konversi Sampah Plastik Menjadi Bahan Bakar Minyak : Kajian Literatur Bayu Megaprastio Dkk / Jurnal Rekayasa Mesin." 18(2):229–40.

- [12] Novita, Sri Aulia, Ahmad Fudholi, Program Doktorat, Ilmu Pertanian, Universitas Andalas, Program Studi, Teknologi Industri, Universitas Andalas, Program Studi Agribisnis, Universitas Andalas, Program Studi, Teknik Pertanian, Universitas Andalas, Padang Indonesia, and Penulis Korespondensi. 2021. "Www.Agroteknika.Id." 4(1):53–67.
- [13] Pendahuluan, Cair. 2022. "KAJIAN ITEMPERATUR IDAN IWAKTU IPROSES ITERHADAP IRENDREMEN IBAHAN IBAKAR ICAIR IPADA IKONVERSI ILIMBAH IPLASTIK IDI IUNIT i THERMAL i CRACKING i REAKTOR." 7:61–66.
- [14] Pet, Terephthlate, Menjadi Bahan, and Bakar Minyak. 2021. "PENGOLAHAN LIMBAH SAMPAH PLASTIK POLYTHYLENE." (4).
- [15] Pirolisis, Proses, Pengolahan Sampah, Menjadi Bahan, and Bakar Cair. 2022. "Jurnal Chemurgy." 06(200):80–87.
- [16] Rahman, Abdur, and Universitas Trunojoyo Madura. 2024. "Dampak Penggunaan Plastik Sekali Pakai Terhadap Lingkungan Bisnis." 2(6).
- [17] Rizak, Muchamad Rusdy, and Khoirul Anam. 2022. "Perbandingan Bahan Bakar Minyak Hasil Dari Pengolahan Sampah Plastik Pp Dan Pe Berbasis Metode Pirolisis Variabel Penelitian Variabel Bebas Yang Digunakan Pada Penelitian Ini Adalah :." 6(1).
- [18] Siregar, Rolan, and Apriyan Acmi. 2022. "Department of Mechanical Engineering Universitas Darma Persada 13450 , Indonesia Corresponding Author Email : Acmi04041998@gmail.Com 2 Siregar , Rolan ., Dkk ; Desain Mekanik Sistem Pemilah Sampah Plastik Otomatis Di Tempat Pembuangan Akhir Sampah (TPA)." 8(1):1–7.
- [19] Sosial, Jurnal. 2024. "E-ISSN 2774-5155 p-ISSN 2774-5147." 537–45.
- [20] Suhartoyo, Suhartoyo. 2021. "Pemanfaatan Sampah Plastik Menjadi Bahan Bakar." AME (Aplikasi Mekanika Dan Energi): Jurnal Ilmiah Teknik Mesin 7(2):90. doi: 10.32832/ame.v7i2.4872.
- [21] Tauhid, Karimah, Faizal Hoerul Zaman, Amar Maruf, Jurusan Teknologi, Industri Pertanian, Fakultas Ilmu, and Pangan Halal. 2024. "MODEL PEMANFAATAN SAMPAH PLASTIK DENGAN." 3:4984–5001.
- [22] Temperatur, Pengaruh, D. A. N. Waktu, Reaksi Dalam, and Upaya Daur. 2024. "WASTE : THE EFFECT OF TEMPERATURE AND REACTION TIME IN." 9(1):98–106. doi: 10.20527/sjmekinematika.v9i1.318.
- [23] Wibowo, Rofiq Imam, and Rizka Mulyawan. 2025. "Penerapan Teknologi Pirolisa Untuk Pengolahan Limbah Plastik Polypropylene Menjadi Bahan Bakar Bensin." 5(Oktober):995–1004.
- [24] Winda, Sri, Mustika Nur Hasanah, Muhammad Afindito Dzulkarnain, Departemen Teknik Kelautan, Universitas Hasanuddin, and Limbah Plastik. 2022. "PENGELOLAAN LIMBAH PLASTIK MENJADI BIOGAS DI PESISIR PANTAI GALESONG." 5(1):67–70.
- [25] Yani, Ahmad, Jurusan Teknik Mesin, Sekolah Tinggi, and Teknologi Industri. 2021. "Pengolahan Limbah Plastik Menjadi Bahan Bakar Minyak Untuk Mengatasi Sampah Plastik Di Kota Bontang." 7(2).
- [26] Zaenuri, Muhammad, and Nely Ana Mufarida. 2023. "Pengaruh Variasi Komposisi Zeolit Alam Terhadap Hasil Pirolisis Plastik Campuran Polypropylene Dan Polyethylene Terephthalate." 21(2):227–33.