

Rancang Bangun Alat Pirolisis Tabung Bertingkat Pengolah Sampah Plastik menjadi BBM Alternatif (PITARA)

Arif Surono ^{1✉}, Wachid Yahya ², Onery Andy Saputra ³, Muhammad Iwan ⁴

(1,2,3) Program Studi Teknologi Rekayasa Otomotif, Politeknik Indonusa Surakarta, Surakarta, Indonesia

(4) Program Studi Teknik Mesin, Universitas Muhammadiyah Pontianak, Pontianak, Indonesia

Abstrak: Sampah plastik sulit terurai dan terus menekan kualitas lingkungan, sedangkan kebutuhan bahan bakar cair alternatif semakin meningkat. Studi ini bertujuan merancang dan menguji PITARA, yaitu prototipe pirolisis tabung bertingkat untuk mengolah sampah plastik campuran menjadi bahan bakar cair. Metode yang digunakan adalah eksperimen rancang bangun melalui analisis fungsional, desain struktural, fabrikasi, uji fungsi, uji kinerja, dan pengujian awal sifat bahan bakar. Alat terdiri atas reaktor *stainless steel* berkapasitas 10 kg, burner berbahan bakar ganda berupa LPG dan arang, serta kondensor vertikal tipe pipa ganda. Bahan baku yang digunakan berupa sampah plastik campuran PP, PE, HDPE, dan sejenisnya yang diproses menjadi bijih berukuran 2 x 3 mm. Dari 10 kg sampah plastik bersih dan kering, prototipe menghasilkan 10,35 L kondensat cair atau setara 8,221 kg dan 82,21% massa, residu padat sekitar 2 g, serta fraksi gas atau nonkondensabel sekitar 17,77% berdasarkan selisih massa. Hasil uji laboratorium menunjukkan densitas 0,7944 g/cm³, viskositas 0,257 cP, nilai kalor 37,37 MJ/kg, dan sifat mudah terbakar. Kebaruan studi ini terletak pada integrasi burner berbahan bakar ganda, reaktor *stainless steel* kompak, dan kondensor vertikal pipa ganda untuk pirolisis plastik campuran skala kecil. Temuan ini merupakan validasi awal prototipe, sehingga analisis GC-MS, pengujian standar bahan bakar, uji emisi, dan uji performa mesin masih perlu dilakukan.

Abstract: Plastic waste is difficult to decompose and continues to create environmental pressure, while the need for alternative liquid fuels remains high. This study aimed to design and test PITARA, a multi-stage tube pyrolysis prototype for converting mixed plastic waste into liquid fuel. The method used an experimental engineering design through functional analysis, structural design, fabrication, functional testing, performance testing, and preliminary fuel-property testing. The unit consisted of a 10 kg stainless-steel reactor, a dual-fuel burner using LPG and charcoal, and a vertical double-pipe condenser. The feedstock consisted of mixed PP, PE, HDPE, and similar plastics processed into 2 x 3 mm pellets. From 10 kg of clean and dry plastic waste, the prototype produced 10.35 L of liquid condensate, equivalent to 8.221 kg or 82.21% by mass, about 2 g of solid residue, and an estimated 17.77% gaseous or non-condensable fraction by difference. Laboratory testing showed a density of 0.7944 g/cm³, viscosity of 0.257 cP, calorific value of 37.37 MJ/kg, and positive flammability. The novelty of this study lies in the integration of a dual-fuel burner, compact stainless-steel reactor, and vertical double-pipe condenser for small-scale mixed-plastic pyrolysis. The findings represent preliminary prototype validation; further GC-MS analysis, fuel-standard testing, emission testing, and engine performance evaluation are required.

Article history:

Received: 16 June 2026

Revised: 17 July 2026

Accepted: 21 July 2026

Published: 23 July 2026

Kata Kunci:

sampah plastik, pirolisis, bahan bakar alternatif, kondensor, reaktor

Keyword:

plastic waste, pyrolysis, alternative fuel, condenser, reactor

This is an open-access article under the [CC-BY-SA License](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/).



How to cite: Surono, A., Yahya, W., Saputra, O. A., & Iwan, M. (2026). Rancang Bangun Alat Pirolisis Tabung Bertingkat Pengolah Sampah Plastik menjadi BBM Alternatif (PITARA). RESWARA: Jurnal Riset Ilmu Teknik, 4(3), 533–547. <https://doi.org/10.70716/reswara.v4i3.618>

PENDAHULUAN

Plastik banyak digunakan karena ringan, murah, mudah dibentuk, dan tahan lama. Keunggulan tersebut juga menimbulkan masalah karena sebagian besar plastik sulit terurai secara alami. Yang et al. (2022) menjelaskan bahwa konversi termokimia dapat mengolah plastik campuran menjadi bahan

bakar, bahan kimia, dan material bernilai tambah. Sari et al. (2024) juga menunjukkan bahwa pirolisis memiliki potensi ekonomi dalam pengelolaan sampah plastik berkelanjutan. Masalah ini penting bagi bidang teknik karena pengolahan limbah tidak cukup diselesaikan melalui pemilahan, tetapi juga membutuhkan teknologi konversi yang dapat diterapkan pada skala kecil dan menengah.

Pengelolaan sampah plastik selama ini banyak diarahkan pada prinsip reuse, reduce, dan recycle. Prinsip tersebut tetap penting, tetapi belum selalu mampu mengolah sampah plastik campuran yang bernilai daur ulang rendah. Kabeyi dan Olanrewaju (2023) menegaskan bahwa pirolisis dapat mengubah rantai polimer panjang menjadi produk cair, gas, dan padat melalui pemanasan tanpa oksigen. Papari et al. (2021) menempatkan pirolisis sebagai metode valorisasi plastik karena produk keluarannya dapat diarahkan menjadi bahan bakar atau bahan kimia. Antelava et al. (2021) menambahkan bahwa pirolisis memiliki potensi energi yang kuat dibandingkan beberapa jalur konversi termal lain. Dengan cara ini, plastik tidak hanya dipandang sebagai limbah, tetapi juga sebagai bahan baku energi alternatif.

Pirolisis plastik bekerja melalui dekomposisi termal pada kondisi minim oksigen. Yaqoob et al. (2025) menjelaskan bahwa faktor temperatur, waktu, jenis plastik, jenis reaktor, dan keberadaan katalis memengaruhi jumlah serta mutu minyak yang dihasilkan. Maqsood et al. (2021) menunjukkan bahwa perbedaan jenis plastik menghasilkan variasi produk karena struktur polimer memiliki mekanisme perengkahan yang berbeda. Javed et al. (2023) juga menemukan bahwa HDPE, LDPE, PP, PS, dan PET menghasilkan rendemen serta nilai kalor yang berbeda saat diproses melalui pirolisis. Pada plastik jenis PP, PE, dan HDPE, proses termal dapat menghasilkan minyak dengan sifat fisik yang mendekati bahan bakar cair. Hal ini membuat desain reaktor, burner, dan kondensor menjadi bagian penting dalam menentukan keberhasilan konversi.

Penelitian tentang alat pirolisis skala kecil telah berkembang di Indonesia. Nofendri dan Haryanto (2021) merancang reaktor batch berbahan bakar LPG untuk mengolah sampah plastik menjadi bahan bakar. Novarini et al. (2021) menunjukkan bahwa karakteristik energi minyak pirolisis dipengaruhi oleh jenis plastik dan kondisi proses. Wijayanti et al. (2022) membuktikan bahwa variasi temperatur memengaruhi rendemen, densitas, viskositas, titik nyala, dan nilai oktan minyak pirolisis LDPE. Prurapark et al. (2020) menekankan bahwa temperatur, waktu pengumpulan, dan kinerja kondensor perlu diperhatikan dalam pengolahan HDPE dan PET. Wisnujati dan Yudhanto (2020) juga menekankan pentingnya pengujian densitas, viskositas, dan nilai kalor untuk menilai kelayakan minyak pirolisis sebagai bahan bakar alternatif.

Meski demikian, rancangan alat pirolisis yang mudah dibuat, memiliki burner berbahan bakar ganda, dan dilengkapi kondensor pipa ganda masih perlu diuji lebih lanjut. Yasir et al. (2024) menunjukkan bahwa desain alat pirolisis rumah tangga perlu mempertimbangkan kelayakan teknis dan ekonomi. Hanaseta et al. (2024) menambahkan bahwa edukasi teknologi pirolisis perlu didukung oleh contoh alat yang dapat dipahami masyarakat. Maithomklang et al. (2022) menunjukkan bahwa minyak pirolisis dari botol plastik dapat dimanfaatkan sebagai bahan bakar alternatif setelah karakteristiknya diuji. Sunaryo et al. (2024) juga menegaskan bahwa pemanfaatan minyak pirolisis sebagai campuran bahan bakar masih memerlukan evaluasi performa dan emisi. Karena itu, rancangan sederhana dengan komponen mudah diperoleh dapat memperkuat peluang penerapan di lapangan.

Berbeda dari studi terdahulu yang banyak menekankan pengaruh jenis plastik, temperatur, katalis, atau desain reaktor tunggal, studi ini memosisikan PITARA sebagai prototipe integratif yang menggabungkan reaktor stainless steel berkapasitas 10 kg, burner berbahan bakar ganda, dan

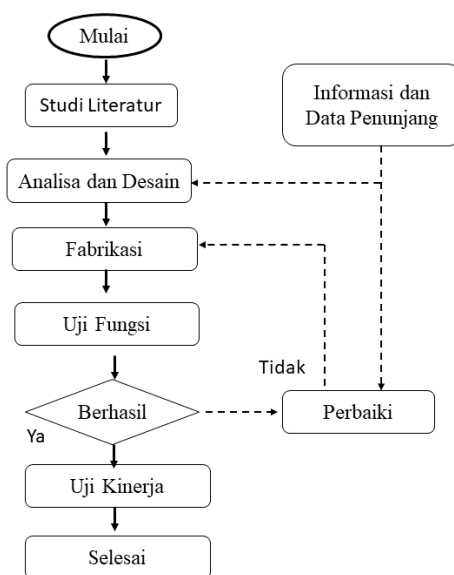
kondensor vertikal pipa ganda pada satu rangkaian kerja. Kesenjangan yang dijawab bukan hanya ketersediaan alat pirolisis skala kecil, tetapi juga kebutuhan penjelasan hubungan antara desain komponen, parameter operasi, neraca massa, dan karakteristik awal produk cair pada pengolahan plastik campuran. Dengan posisi tersebut, studi ini tidak hanya melaporkan keberhasilan fabrikasi alat, tetapi juga memberikan dasar evaluasi teknik untuk pengembangan prototipe pirolisis plastik skala kecil yang lebih terukur.

Studi ini bertujuan merancang, membuat, dan menguji alat pirolisis tabung bertingkat pengolah sampah plastik menjadi BBM alternatif atau PITARA. Fokus kajian meliputi rancangan reaktor, burner, kondensor, proses fabrikasi, uji fungsi, uji kinerja, neraca massa, serta karakteristik awal kondensat cair yang dihasilkan. Kontribusi ilmiah studi ini terletak pada perumusan rancangan terpadu yang menghubungkan fungsi termal, perpindahan panas, dan evaluasi produk pada satu prototipe. Kontribusi praktisnya terletak pada penyediaan desain alat yang relatif mudah dibuat, menggunakan komponen yang tersedia, dan dapat menjadi dasar pengembangan teknologi pengolahan sampah plastik campuran pada skala kecil.

METODE PENELITIAN

Desain Penelitian

Studi ini menggunakan metode eksperimen rancang bangun. Tahap kerja meliputi identifikasi kebutuhan alat, analisis fungsi, desain komponen utama, fabrikasi, uji fungsi, uji kinerja, dan pengujian sifat awal minyak pirolisis. Gambar 1 menunjukkan alur penelitian yang digunakan sebagai dasar proses perancangan dan pengujian.



Gambar 1. Diagram alir penelitian

Alur tersebut membantu proses kerja berjalan berurutan. Setiap tahap menghasilkan dasar keputusan untuk tahap berikutnya, sehingga desain akhir tidak hanya berbasis gambar, tetapi juga berbasis kebutuhan fungsi dan hasil pengujian.

Analisis Fungsional Unit Pirolisis

Secara fungsional, alat pirolisis terdiri atas tiga komponen utama, yaitu reaktor, burner, dan kondensor. Reaktor berfungsi sebagai ruang pemanasan plastik, burner berfungsi sebagai sumber energi panas, sedangkan kondensor berfungsi mengubah uap hasil pirolisis menjadi kondensat cair. Tabel 1 menyajikan bagian utama reaktor dan fungsi teknisnya.

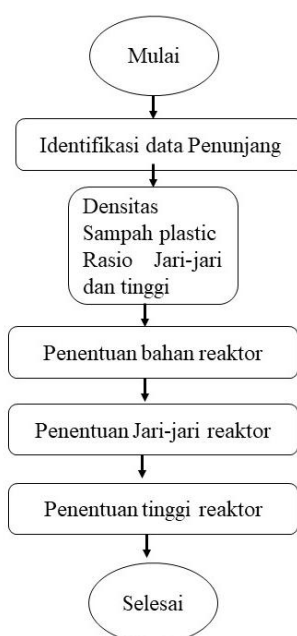
Tabel 1. Nama dan fungsi bagian reaktor

No.	Nama bagian	Fungsi
1	Tabung reaktor	Wadah bahan plastik yang akan diproses
2	Flange	Membuka, menutup, dan memudahkan pemasukan bahan
3	Termometer	Mengetahui suhu ruang reaktor
4	Relief valve	Pengaman tekanan ruang reaktor

Pembagian fungsi tersebut menjadi dasar penentuan bahan dan konstruksi. Reaktor dipilih dari stainless steel karena bahan ini relatif tahan panas, tahan korosi, dan sesuai untuk proses yang melibatkan uap hidrokarbon.

Desain Reaktor

Desain reaktor ditentukan dari kebutuhan kapasitas bahan baku sebesar 10 kg. Sampah plastik yang digunakan berupa campuran PP, PE, HDPE, dan plastik sejenis yang sudah dibersihkan serta diproses menjadi bijih berukuran sekitar 2 x 3 mm. Penentuan dimensi mempertimbangkan densitas curah plastik sebesar 80 kg/m³, rasio radius terhadap tinggi tabung, dan kemudahan proses bongkar pasang. Gambar 2 menyajikan alur desain reaktor yang digunakan dalam perhitungan.



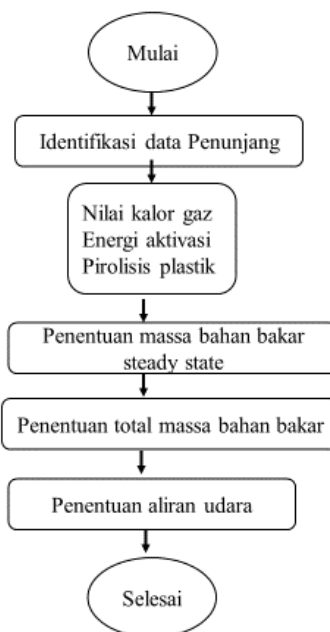
Gambar 2. Diagram alir proses desain reaktor

Kapasitas reaktor ditentukan dari hubungan volume material dan densitas curah plastik. Hubungan dasar yang digunakan adalah $V = m / \rho$, dengan V sebagai volume bahan, m sebagai massa

plastik, dan ρ sebagai densitas curah. Hasil rancangan menghasilkan reaktor berdiameter sekitar 0,28 m dan tinggi efektif sekitar 0,254 m.

Desain Burner

Burner dirancang menggunakan sumber bahan bakar ganda, yaitu LPG 3 kg dan arang kayu atau bahan sejenis. Pilihan ini bertujuan menjaga fleksibilitas operasi ketika salah satu sumber panas sulit diperoleh. Analisis kebutuhan panas dibagi menjadi tahap steady state dan unsteady state. Gambar 3 menunjukkan alur perancangan tungku yang menjadi dasar perhitungan kebutuhan energi.



Gambar 3. Diagram alir proses perancangan burner

Tahap steady state digunakan untuk memperkirakan energi pemecahan rantai molekul plastik selama proses berlangsung. Tahap unsteady state digunakan untuk memperkirakan energi awal yang dibutuhkan untuk memanaskan reaktor sampai temperatur kerja. Pemisahan dua tahap ini membuat kebutuhan bahan bakar lebih mudah dihitung dan dievaluasi selama uji kinerja.

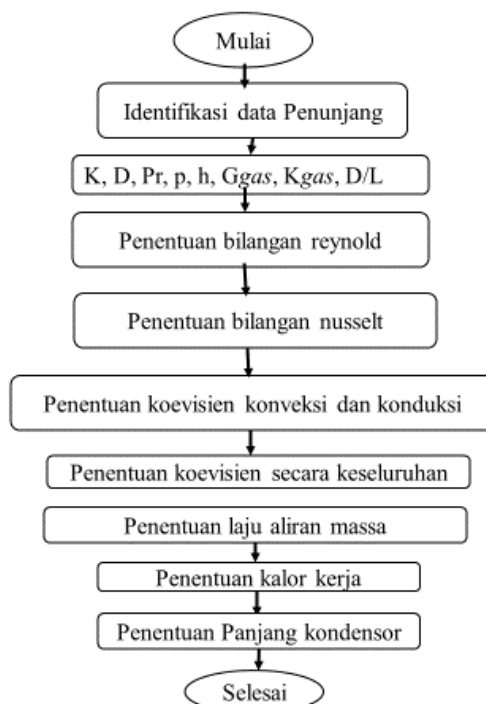
Desain Kondensor

Kondensor dirancang menggunakan tipe pipa ganda dengan bahan stainless steel pada pipa luar dan pipa spiral bagian dalam. Air digunakan sebagai fluida pendingin karena mudah diperoleh dan sesuai untuk sistem skala kecil. Tabel 2 menyajikan bagian kondensor dan fungsi masing-masing komponen.

Tabel 2. Nama dan fungsi komponen kondensor

No.	Nama bagian	Fungsi
1	Saluran masuk air pendingin	Jalur masuk air pendingin
2	Rumah kondensor	Wadah pipa spiral kondensor
3	Termometer	Mengetahui suhu air pendingin
4	Koil kondensor	Mengubah uap panas menjadi cair
5	Saluran keluar air pendingin	Jalur keluar air pendingin

Rancangan kondensor memperhitungkan luas permukaan perpindahan panas, laju aliran massa uap, dan waktu proses. Gambar 4 menampilkan alur proses pembuatan kondensor yang digunakan pada alat ini.



Gambar 4. Proses pembuatan kondensor

Kondensor dipasang secara vertikal agar kondensat cair dapat mengalir dengan bantuan gravitasi. Susunan ini mengurangi kebutuhan pompa tambahan dan membuat alat lebih sederhana untuk operasi lapangan.

Fabrikasi dan Uji Kinerja

Fabrikasi dimulai dari pemotongan bahan, pengelasan tabung reaktor, pemasangan flange, pemasangan termometer, pemasangan katup pengaman, dan perakitan burner pada rangka utama. Kondensor dibuat dari pipa stainless steel dengan pipa spiral di bagian dalam. Setelah alat selesai dirakit, uji fungsi dilakukan untuk memastikan reaktor, burner, saluran uap, kondensor, dan wadah kondensat bekerja sesuai perannya.

Uji kinerja dilakukan menggunakan 10 kg sampah plastik bersih dan kering pada setiap batch. Bahan dimasukkan ke reaktor, pemanas dinyalakan, sistem pendingin kondensor diaktifkan, dan temperatur dipantau setiap 10 menit pada fase pengamatan awal. Temperatur operasi reaktor dipertahankan pada kisaran 200-300 °C, sedangkan suhu tungku diamati sampai mendekati 297 °C. Keseluruhan proses pirolisis berlangsung sekitar 8 jam sampai aliran kondensat menurun dan produk cair tidak lagi keluar secara stabil. Uji fungsi komponen dilakukan tiga kali untuk memastikan sambungan, burner, saluran uap, kondensor, dan wadah kondensat bekerja tanpa kebocoran. Data rendemen yang dilaporkan dalam artikel ini berasal dari batch pengujian kinerja utama setelah fungsi alat stabil, sehingga hasilnya diposisikan sebagai validasi awal prototipe.

Validasi eksperimental dilakukan melalui pencatatan temperatur tungku, temperatur air pendingin, temperatur uap keluar, volume kondensat cair, massa residu padat, dan perhitungan fraksi gas atau nonkondensabel berdasarkan selisih massa. Selama pengujian, temperatur dipantau menggunakan termometer, massa bahan dan residu diukur menggunakan timbangan digital, serta volume kondensat cair diukur menggunakan gelas ukur. Sampel kondensat cair diuji di laboratorium untuk memperoleh densitas, viskositas, nilai kalor, dan sifat mampu bakar. Instrumen pengujian yang digunakan meliputi alat ukur densitas atau piknometer, viskometer, kalorimeter, dan perangkat uji nyala sederhana. Densitas dihitung berdasarkan hubungan massa dan volume, viskositas diuji melalui prinsip waktu alir fluida, nilai kalor diuji menggunakan prinsip kalorimetri, dan uji bakar dilakukan sebagai pemeriksaan awal kemampuan nyala. Pengamatan temperatur dilakukan karena temperatur dan waktu proses terbukti memengaruhi mutu minyak pirolisis, terutama pada aspek densitas, viskositas, dan rendemen (Rijadi et al., 2025).

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil Desain Fungsional dan Struktural

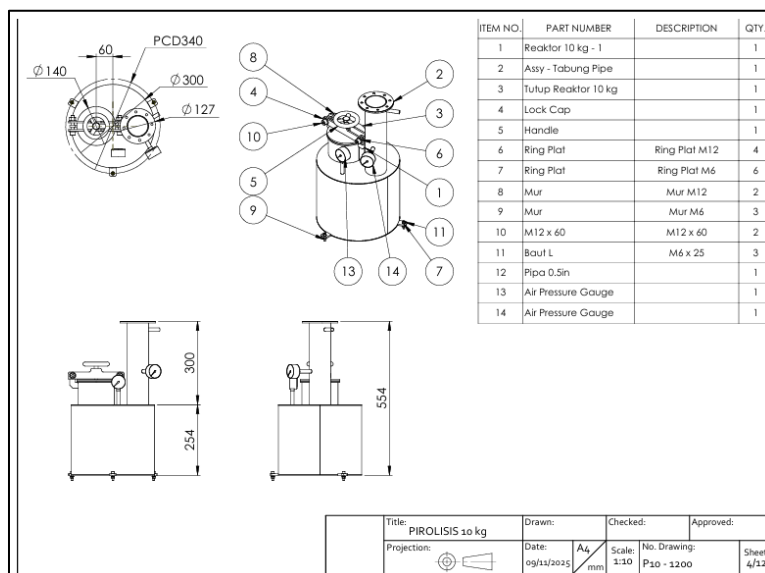
Hasil perancangan menunjukkan bahwa alat pirolisis dapat dibagi menjadi reaktor, burner, kondensor, dan wadah kondensat. Dimensi utama alat diringkas pada Tabel 3. Data ini menunjukkan bahwa desain dibuat untuk kapasitas bahan 10 kg dengan kondensor berukuran kompak.

Tabel 3. Dimensi dan parameter utama alat pirolisis

Parameter desain	Hasil
Diameter reaktor	0,28 m
Massa jenis plastik curah	80 kg/m ³
Rasio r/t	0,5
Tinggi efektif reaktor	0,254 m
Bilangan Reynolds kondensor	163,877
Bilangan Nusselt kondensor	5,968
Koefisien pindah panas	7,9 W/mK
Luas permukaan kondensor	5.725,55 cm ²
Panjang kondensor hasil desain	0,9 m
Diameter dalam kondensor	0,09 m
Diameter luar kondensor	0,09 m

Tabel 3 menunjukkan bahwa dimensi alat berada pada ukuran yang masih mudah dipindahkan dan dioperasikan. Panjang kondensor hasil fabrikasi menjadi sekitar 1.060 mm karena terdapat ruang tambahan untuk pemasangan dan pembongkaran pipa kondensor bagian dalam.

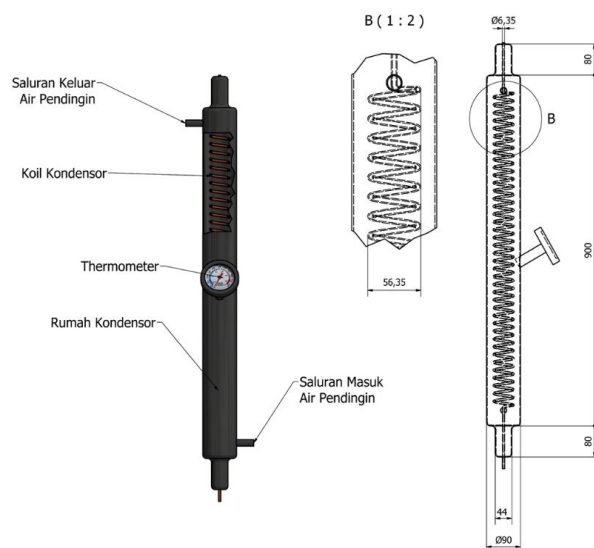
Gambar 5 memperlihatkan desain reaktor yang digunakan dalam alat PITARA. Reaktor dilengkapi tutup, flange, termometer, dan katup pengaman untuk mendukung operasi yang lebih aman.



Gambar 5. Desain reaktor pirolisis

Desain reaktor dibuat dengan permukaan tutup yang mudah dibuka. Bagian atas reaktor dibuat untuk mendukung aliran uap menuju kondensor, sehingga hambatan aliran dapat dikurangi selama proses pirolisis berlangsung.

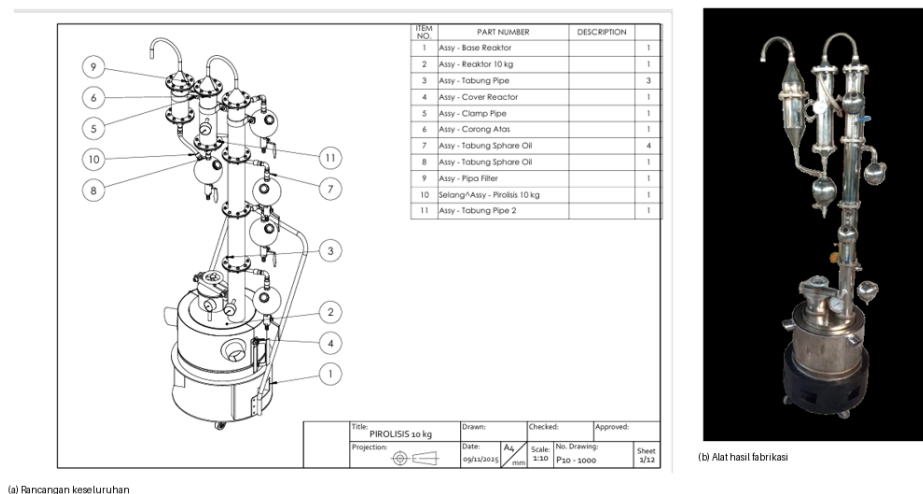
Gambar 6 menyajikan desain kondensor yang digunakan dalam penelitian. Pipa spiral ditempatkan di dalam rumah kondensor agar luas kontak perpindahan panas meningkat.



Gambar 6. Desain kondensor pipa ganda

Desain kondensor memanfaatkan aliran air pendingin dari bawah ke atas. Arah aliran ini membantu penyerapan panas dari uap yang melewati pipa spiral, sehingga uap dapat berubah fase menjadi kondensat cair. Prurapark et al. (2020) menunjukkan bahwa kinerja kondensor menjadi faktor penting dalam pemisahan produk cair pada unit pirolisis bergerak.

Gambar 7 memperlihatkan rancangan keseluruhan alat dan bentuk alat setelah proses fabrikasi. Perbandingan ini menunjukkan bahwa desain teknis dapat diwujudkan menjadi prototipe yang berfungsi.



Gambar 7. Desain dan alat pirolisis hasil fabrikasi

Hasil fabrikasi menunjukkan bahwa reaktor, burner, dan kondensor dapat dipasang dalam satu rangkaian kerja. Integrasi komponen ini membuat proses pemanasan, pengaliran uap, pendinginan, dan penampungan kondensat berjalan dalam satu sistem.

Uji Kinerja dan Perolehan Kondensat

Uji kinerja menghasilkan tiga kelompok keluaran, yaitu kondensat cair, residu padat, dan fraksi gas atau nonkondensabel yang dihitung berdasarkan selisih massa. Dari 10 kg sampah plastik dalam kondisi bersih dan kering, alat menghasilkan 10,35 L kondensat cair. Dengan densitas 0,7944 g/cm³ atau 0,7944 kg/L, massa kondensat cair diperkirakan sebesar 8,221 kg. Residu padat yang tertinggal sekitar 2 g atau 0,002 kg. Berdasarkan selisih terhadap massa awal, fraksi gas atau nonkondensabel diperkirakan sebesar 1,777 kg. Dengan demikian, rendemen massa kondensat cair mencapai 82,21%, residu padat 0,02%, dan fraksi gas atau nonkondensabel 17,77%. Rincian neraca massa produk pirolisis pada batch pengujian utama disajikan pada Tabel 4.

Tabel 4. Neraca massa produk pirolisis pada batch pengujian utama

Komponen	Dasar perhitungan	Massa (kg)	Persentase massa (%)
Bahan baku plastik	Massa awal	10,000	100,00
Kondensat cair	10,35 L x 0,7944 kg/L	8,221	82,21
Residu padat	Hasil penimbangan	0,002	0,02
Gas atau nonkondensabel	Selisih massa	1,777	17,77
Total	Akumulasi produk	10,000	100,00

Catatan: Fraksi gas atau nonkondensabel dihitung berdasarkan selisih massa karena gas belum ditangkap dan belum dianalisis secara langsung pada tahap validasi awal prototipe.

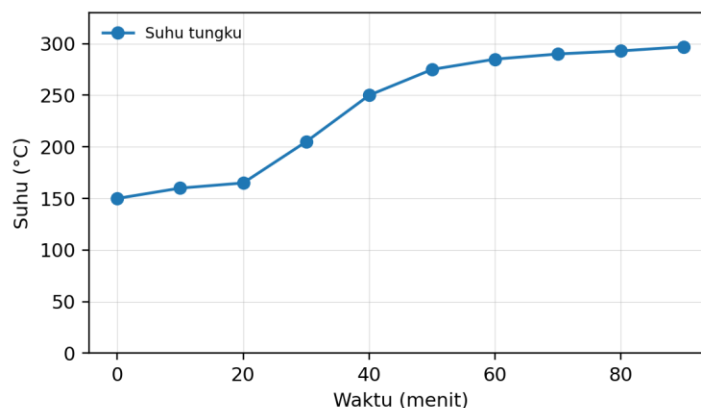
Bahan baku plastik dan hasil kondensat cair yang diperoleh dari proses pengujian ditampilkan pada Gambar 8. Rujukan visual ini membantu memperjelas perubahan bentuk bahan dari plastik campuran menjadi kondensat cair setelah proses pemanasan dan pendinginan berlangsung.



Gambar 8. Bahan baku plastik dan hasil kondensat

Kondensat cair berwarna kuning kecoklatan dan dapat terbakar saat diuji secara sederhana. Residu padat berwarna hitam kebiruan, yang menunjukkan adanya sisa karbonisasi dari proses dekomposisi termal plastik.

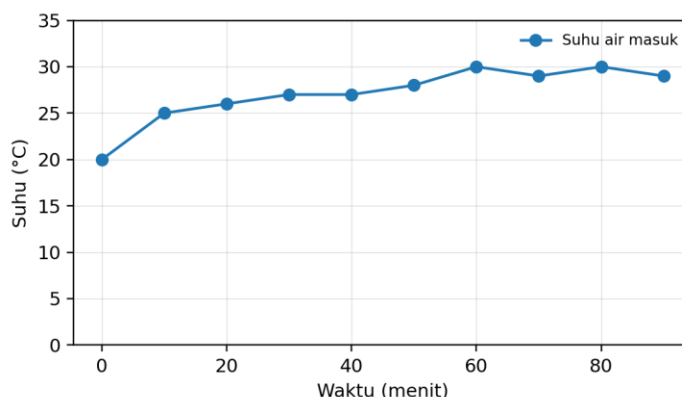
Perubahan temperatur menjadi indikator penting karena proses pirolisis sangat dipengaruhi oleh kestabilan panas. Maqsood et al. (2021) menjelaskan bahwa temperatur mengontrol mekanisme perengkahan dan distribusi produk pada pirolisis berbagai jenis plastik. Gambar 9 menunjukkan sebaran suhu tungku selama 90 menit pengamatan.



Gambar 9. Sebaran suhu tungku selama proses eksperimen

Suhu tungku meningkat dari 150 °C pada awal pengamatan menjadi 297 °C pada menit ke-90. Kenaikan ini menunjukkan bahwa burner mampu menghasilkan panas bertahap untuk mendukung perubahan plastik dari padat menjadi cair, uap, dan gas.

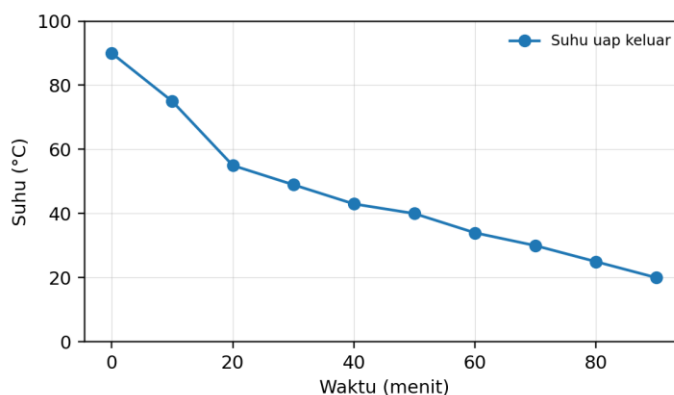
Kinerja kondensor dapat dilihat dari perubahan suhu air pendingin. Gambar 10 menunjukkan suhu air masuk kondensor selama proses berlangsung.



Gambar 10. Sebaran suhu air masuk kondensor

Suhu air masuk berada pada kisaran 20-30 °C. Perubahan suhu yang relatif rendah menunjukkan bahwa air masih dapat menyerap panas uap secara stabil selama proses kondensasi.

Selain suhu air, suhu uap yang keluar dari sistem juga menunjukkan efektivitas pendinginan. Gambar 11 memperlihatkan penurunan suhu uap selama proses eksperimen.



Gambar 11. Sebaran suhu uap keluar selama proses eksperimen

Suhu uap turun dari 90 °C menjadi 20 °C pada akhir pengamatan. Penurunan ini menunjukkan bahwa kondensor mampu mengurangi panas uap secara bertahap dan membantu pembentukan kondensat cair.

Sifat Bahan Bakar Kondensat Cair

Kondensat cair diuji untuk mengetahui sifat awal bahan bakarnya. Parameter yang diamati meliputi warna fisik, densitas, viskositas, nilai kalor, dan uji bakar sederhana. Tabel 5 membandingkan hasil kondensat dengan beberapa bahan bakar komersial. Parameter tersebut cukup untuk membaca indikasi awal potensi energi, tetapi belum cukup untuk menetapkan kelayakan pemakaian langsung pada mesin.

Tabel 5. Hasil uji sifat kondensat cair

Parameter	Kondensat cair	Premium	Solar	Kerosin
Warna fisik	Kuning kecoklatan	Kuning bening	Kuning bening	Kuning kecoklatan
Densitas (g/cm ³)	0,7944	0,70	0,8522	0,80
Viskositas (cP)	0,257	0,652	0,20-0,45	0,294-3,34
Nilai kalor (MJ/kg)	37,37	44	44	43,3
Uji bakar	Terbakar	Terbakar	Terbakar	Terbakar

Hasil pada Tabel 5 menunjukkan bahwa densitas kondensat cair berada di antara premium dan solar. Nilai kalor sebesar 37,37 MJ/kg masih lebih rendah daripada bahan bakar komersial, tetapi tetap menunjukkan potensi energi yang relevan untuk kajian bahan bakar alternatif.

Viskositas kondensat cair sebesar 0,257 cP berada dalam rentang yang mendekati solar pada data pembanding, sedangkan densitas 0,7944 g/cm³ berada di antara premium dan kerosin. Mustam et al. (2021) menegaskan bahwa perbandingan mutu minyak pirolisis perlu melihat densitas, viskositas, dan nilai kalor secara bersamaan. Susanto et al. (2024) juga melaporkan bahwa densitas, viskositas, dan nilai kalor minyak pirolisis dari sampah plastik perlu digunakan untuk membaca potensi awal bahan bakar. Nilai kalor 37,37 MJ/kg menunjukkan potensi energi yang masih relevan, meskipun lebih rendah daripada premium, solar, dan kerosin yang digunakan sebagai pembanding. Javed et al. (2023) menunjukkan bahwa produk cair dari beberapa jenis plastik memiliki nilai kalor yang dapat mendekati bahan bakar konvensional, tetapi karakteristik tersebut sangat bergantung pada bahan baku. Karena bahan PITARA berupa plastik campuran PP, PE, HDPE, dan plastik sejenis, variasi struktur polimer dapat menjelaskan perbedaan mutu produk cair yang dihasilkan.

Temuan ini sejalan dengan kajian Rijadi et al. (2025) yang menunjukkan bahwa temperatur dan waktu proses memengaruhi mutu minyak pirolisis LDPE. Pada prototipe PITARA, temperatur reaktor dipertahankan pada kisaran 200-300 °C dan suhu tungku meningkat sampai sekitar 297 °C pada fase pengamatan awal. Rentang ini cukup untuk memulai dekomposisi termal plastik, tetapi kontrol temperatur yang belum otomatis dapat menyebabkan distribusi produk belum stabil. Maqsood et al. (2021) menjelaskan bahwa mekanisme perengkahan plastik berbeda menurut jenis polimer, sehingga plastik campuran cenderung menghasilkan komposisi produk yang lebih beragam. Kondisi ini memperkuat kebutuhan analisis kimia lanjutan sebelum minyak pirolisis diklaim setara dengan bahan bakar komersial.

Dari sisi desain, integrasi reaktor, burner, dan kondensor berpengaruh langsung terhadap rendemen. Kondensor vertikal pipa ganda membantu pendinginan uap dan aliran kondensat dengan gaya gravitasi, sedangkan burner berbahan bakar ganda memberi fleksibilitas sumber panas. Prurapark et al. (2020) menunjukkan bahwa kinerja kondensor menjadi faktor penting dalam pemisahan produk cair pada unit pirolisis bergerak. Pada studi ini, penurunan suhu uap keluar dari 90 °C menjadi 20 °C menunjukkan bahwa kondensor bekerja dalam menurunkan panas uap. Namun, fraksi gas atau nonkondensabel sebesar 17,77% yang dihitung berdasarkan selisih massa menunjukkan bahwa sistem penangkapan gas masih perlu dikembangkan agar neraca massa dan potensi energi gas dapat dinilai lebih akurat.

Secara praktis, desain burner berbahan bakar ganda memberi fleksibilitas pada penggunaan sumber panas. Namun, sistem masih memiliki keterbatasan pada kontrol temperatur, pengukuran laju uap, penangkapan gas, dan analisis komposisi kimia kondensat. Palmay et al. (2022) menunjukkan bahwa komposisi bahan plastik sangat memengaruhi sifat produk cair pirolisis. Yang et al. (2022)

menegaskan bahwa pengembangan teknologi konversi termokimia perlu memperhatikan pemilihan proses, efisiensi energi, dan selektivitas produk. Sunaryo et al. (2024) menunjukkan bahwa pengujian bahan bakar berbasis minyak pirolisis perlu dilanjutkan sampai tahap performa mesin dan emisi. Effendy et al. (2021) menunjukkan bahwa pengujian bahan bakar alternatif pada mesin perlu memperhatikan performa dan opasitas asap, sedangkan Bhowmik et al. (2025) menekankan pentingnya evaluasi performa dan emisi ketika minyak pirolisis plastik dicampurkan dengan bahan bakar mesin diesel. Karena itu, hasil PITARA harus dibaca sebagai validasi awal prototipe, bukan bukti akhir bahwa produk siap digunakan langsung sebagai bahan bakar kendaraan. Cakupan karakterisasi produk dan kebutuhan pengujian lanjutan disajikan pada Tabel 6 untuk menegaskan batas validasi awal pada studi ini.

Tabel 6. Cakupan karakterisasi produk dan kebutuhan pengujian lanjutan

Aspek karakterisasi	Status pada studi ini	Arah pengujian lanjutan
Densitas	Sudah diuji	Dibandingkan dengan standar bahan bakar yang relevan
Viskositas	Sudah diuji	Diuji pada beberapa temperatur operasi bahan bakar
Nilai kalor	Sudah diuji	Dikonfirmasi dengan pengujian ulang dan replikasi batch
Uji bakar sederhana	Sudah dilakukan	Dilanjutkan dengan flash point dan titik nyala standar
Komposisi kimia	Belum diuji	Analisis GC-MS untuk mengetahui fraksi hidrokarbon
Kadar air, abu, sulfur, dan residu karbon	Belum diuji	Pengujian mutu bahan bakar sebelum uji mesin
Performa dan emisi mesin	Belum diuji	Uji mesin diesel atau spark-ignition sesuai karakter produk

Catatan: Tabel ini menunjukkan bahwa karakterisasi produk pada studi ini masih bersifat awal dan perlu dilanjutkan sebelum produk direkomendasikan untuk penggunaan rutin.

Kontribusi Ilmiah Desain PITARA

Kontribusi ilmiah desain PITARA terletak pada penyajian prototipe pirolisis plastik campuran yang mengevaluasi desain alat, parameter operasi, neraca massa, dan karakteristik awal kondensat dalam satu rangkaian analisis. Beberapa studi sebelumnya telah membahas pengaruh jenis plastik, temperatur, atau potensi minyak pirolisis, tetapi studi ini menempatkan integrasi reaktor stainless steel 10 kg, burner berbahan bakar ganda, dan kondensor vertikal pipa ganda sebagai objek evaluasi teknik. Dengan demikian, artikel ini memberi nilai akademik berupa model validasi awal prototipe yang dapat direplikasi dan ditingkatkan pada riset pirolisis skala kecil.

Kontribusi praktisnya adalah menyediakan rancangan yang dapat dikembangkan untuk pengolahan plastik campuran bernilai daur ulang rendah. Namun, kontribusi tersebut masih berada pada tahap validasi awal. Pengembangan ilmiah berikutnya perlu menguji pengaruh variasi temperatur, variasi jenis plastik, rasio bahan baku, laju pemanasan, desain kondensor, komposisi kimia produk, serta performa dan emisi mesin. Tahapan tersebut penting agar PITARA tidak hanya menjadi prototipe yang mampu menghasilkan kondensat cair, tetapi juga menjadi dasar teknologi konversi energi yang aman, terukur, dan sesuai standar bahan bakar.

KESIMPULAN

Studi ini berhasil merancang dan membuat alat pirolisis tabung bertingkat PITARA untuk mengolah sampah plastik campuran menjadi kondensat cair. Alat terdiri atas tiga komponen utama, yaitu reaktor stainless steel berkapasitas 10 kg, burner berbahan bakar ganda, dan kondensor tipe pipa ganda. Uji kinerja menghasilkan 10,35 L kondensat cair dari 10 kg plastik kering dan bersih, dengan residu padat sekitar 2 g. Kondensat cair memiliki densitas 0,7944 g/cm³, viskositas 0,257 cP, nilai kalor 37,37 MJ/kg, dan dapat terbakar, sehingga berpotensi menjadi bahan bakar alternatif setelah pemurnian dan pengujian lanjutan. Pengembangan berikutnya perlu menambahkan kontrol temperatur otomatis, analisis komposisi kimia, uji emisi, serta uji performa mesin agar kelayakan teknis dan keselamatan penggunaan dapat dinilai lebih kuat.

DAFTAR PUSTAKA

- Antelava, A., Jablonska, N., Constantinou, A., Manos, G., Salaudeen, S. A., Dutta, A., & Al-Salem, S. M. (2021). Energy potential of plastic waste valorization: A short comparative assessment of pyrolysis versus gasification. *Energy & Fuels*, 35(5), 3558–3571. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.0c04017>
- Bhowmik, M., Deb, M., & Sastry, G. R. K. (2025). Performance and emission assessment of an indirect ignition diesel engine fuelled with waste plastic pyrolysis oil and ethanol blends. *Frontiers in Thermal Engineering*, 5, 1548806. <https://doi.org/10.3389/fther.2025.1548806>
- Effendy, M., Surono, A., Saputra, E., & Nugraha, N. A. (2021). Performance and smoke opacity of compression-ignition engine using used-waste oil. *Case Studies in Thermal Engineering*, 26, 101063. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2021.101063>
- Hanaseta, E., Maharani, M. D. D., Handayani, L., & Ariwibowo, F. B. P. (2024). Edukasi teknologi pirolisis untuk pengolahan sampah di kawasan wisata Hutan Bambu Bekasi. *Jurnal Pengabdian Nasional Indonesia*, 5(2), 410–417. <https://doi.org/10.35870/jpni.v5i2.731>
- Javed, N., Muhammad, S., Iram, S., Ramay, M. W., Jaffri, S. B., Damak, M., Fekete, G., Varga, Z., Székács, A., & Aleksza, L. (2023). Analysis of fuel alternative products obtained by the pyrolysis of diverse types of plastic materials isolated from a dumpsite origin in Pakistan. *Polymers*, 15(1), 24. <https://doi.org/10.3390/polym15010024>
- Kabeyi, M. J. B., & Olanrewaju, O. A. (2023). Review and design overview of plastic waste-to-pyrolysis oil conversion with implications on the energy transition. *Journal of Energy*, 2023, 1821129. <https://doi.org/10.1155/2023/1821129>
- Maithomklang, S., Wathakit, K., Sukjit, E., Sawatmongkhon, B., & Srisertpol, J. (2022). Utilizing waste plastic bottle-based pyrolysis oil as an alternative fuel. *ACS Omega*, 7(24), 20542–20555. <https://doi.org/10.1021/acsomega.1c07345>
- Maqsood, T., Dai, J., Zhang, Y., Guang, M., & Li, B. (2021). Pyrolysis of plastic species: A review of resources and products. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 159, 105295. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2021.105295>
- Mustam, M., Ramdani, N., & Syaputra, I. (2021). Perbandingan kualitas bahan bakar dari pengolahan sampah plastik menjadi bahan bakar minyak dengan metode pirolisis. *EduMatSains: Jurnal Pendidikan, Matematika Dan Sains*, 6(1), 219–230. <https://doi.org/10.33541/edumatsains.v6i1.2998>

- Nofendri, Y., & Haryanto, A. (2021). Perancangan alat pirolisis sampah plastik menjadi bahan bakar. *Jurnal Kajian Teknik Mesin*, 6(1), 1–11. <https://doi.org/10.52447/jktm.v6i1.4454>
- Novarini, N., Kurniawan, S., Rusdianasari, R., & Bow, Y. (2021). Kajian karakteristik dan energi pada pirolisis limbah plastik low density polyethylene (LDPE). *Jurnal Teknik Kimia Dan Lingkungan*, 5(1), 61–70. <https://doi.org/10.33795/jtkl.v5i1.190>
- Palmay, P., Haro, C., Huacho, I., Barzallo, D., & Bruno, J. C. (2022). Production and analysis of the physicochemical properties of the pyrolytic oil obtained from pyrolysis of different thermoplastics and plastic mixtures. *Molecules*, 27(10), 3287. <https://doi.org/10.3390/molecules27103287>
- Papari, S., Bamdad, H., & Berruti, F. (2021). Pyrolytic conversion of plastic waste to value-added products and fuels: A review. *Materials*, 14(10), 2586. <https://doi.org/10.3390/ma14102586>
- Prurapark, R., Owjaraen, K., Saengphrom, B., Limthongtip, I., & Tongam, N. (2020). Effect of temperature on pyrolysis oil using high-density polyethylene and polyethylene terephthalate sources from mobile pyrolysis plant. *Frontiers in Energy Research*, 8, 541535. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2020.541535>
- Rijadi, D. R., Rhofita, E. I., & Auvaria, S. W. (2025). Pengaruh temperatur dan waktu proses terhadap kualitas minyak pirolisis limbah plastik low density polyethylene. *Scientific Journal of Mechanical Engineering Kinematika*, 10(1), 70–80. <https://doi.org/10.20527/sjmekinematika.v10i1.326>
- Sari, M. M., Septiariva, I. Y., Rofiah, R., Suryawan, I. W. K., & Suhardono, S. (2024). Potensi ekonomi pirolisis sampah plastik untuk pengelolaan berkelanjutan: Studi kasus plastik pembungkus paket. *Jurnal Ilmu Lingkungan*, 22(4), 941–950. <https://doi.org/10.14710/jil.22.4.941-950>
- Sunaryo, S., Suyitno, S., Arifin, Z., & Setiyo, M. (2024). Performance and emission of a spark-ignition engine using gasoline-plastic pyrolysis oil blends. *Mechanical Engineering for Society and Industry*, 4(1), 68–81. <https://doi.org/10.31603/mesi.11278>
- Susanto, H., Aji, B. S., Solikhah, M. D., Nugroho, B. A., Mawardi, R., Susilawati, H. L., Cahyono, T., Wahyuni, T., Sasongko, N. A., & Martini, T. (2024). Fuel characteristics of pyrolysis oil from plastic waste: A case study of Banjarnegara Waste Bank. *Evergreen*, 11(3), 2404–2414. <https://doi.org/10.5109/7236883>
- Wijayanti, W., Musyaroh, M., & Sasongko, M. N. (2022). Low-density polyethylene plastic waste to liquid fuel using pyrolysis method: An effect of temperatures on the oil yields physicochemical properties. *Journal of Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems*, 10(3), 1090402. <https://doi.org/10.13044/j.sdewes.d9.0402>
- Yang, R.-X., Jan, K., Chen, C.-T., Chen, W.-T., & Wu, K. C.-W. (2022). Thermochemical conversion of plastic waste into fuels, chemicals, and value-added materials: A critical review and outlooks. *ChemSusChem*, 15(11), e202200171. <https://doi.org/10.1002/cssc.202200171>
- Yaqoob, H., Ali, H. M., & Khalid, U. (2025). Pyrolysis of waste plastics for alternative fuel: A review of key factors. *RSC Sustainability*, 3, 208–218. <https://doi.org/10.1039/D4SU00504J>
- Yasir, M., Siregar, Z. H., & Mawardi, M. (2024). Desain dan konsep alat pirolisis sampah rumah tangga dengan kajian kelayakan ekonomi. *Abdimas Indonesian Journal*, 4(2), 135–142. <https://doi.org/10.59525/aij.v4i2.405>