

INOVASI REAKTOR PIROLISIS SAMPAH PLASTIK CAMPURAN SAMPAH PERKOTAAN DENGAN TABUNG MENDATAR DAN KONDENSOR BERTINGKAT KAPASITAS 50 KG *SELF-SUFFICIENT*

¹Bambang Sugiantoro, ²Utis Sutisna, ³Muhamad Soleh, ⁴Nana Kariada TM,
⁵Widowati, ⁶Sunyoto

¹Teknik Mesin, Sekolah Tinggi Teknik Wiworotomo Purwokerto, Indonesia
¹b.sugiantoro@stt-wiworotomo.ac.id

²Teknik Elektro, Sekolah Tinggi Teknik Wiworotomo Purwokerto, Indonesia
²utis@stt-wiworotomo.ac.id

³Teknik Industri, Sekolah Tinggi Teknik Wiworotomo Purwokerto, Indonesia
³muhamadsoleh@stt-wiworotomo.ac.id

⁴Biologi, Universitas Negeri Semarang, Indonesia
⁴nanakariada@mail.unnes.ac.id

⁵Pendidikan Tata Busana Universitas Negeri Semarang, Indonesia
⁵widowati@mail.unnes.ac.id

⁶Pendidikan Teknik Mesin Universitas Negeri Semarang, Indonesia
⁶sunyoto@mail.unnes.ac.id

Email Koresponding: utis@stt-wiworotomo.ac.id

ABSTRAK

Penanganan limbah plastik perkotaan menjadi tantangan serius bagi lingkungan dan ekonomi *global*. Inovasi reaktor pirolisis dengan konfigurasi tabung mendatar dan sistem kondensasi bertingkat kapasitas 50 kg ini dirancang untuk mengubah plastik campuran menjadi bahan bakar cair seperti solar, minyak tanah, dan bensin, melalui proses pirolisis yang efisien dan ramah lingkungan. Reaktor berdiameter 760 mm dan panjang 1200 mm memaksimalkan distribusi panas, memastikan pemanasan yang merata tanpa memerlukan rotasi mekanik atau pengadukan. Sistem pemanas eksternal dipertahankan pada suhu 300°C hingga 350°C dalam kondisi anaerobik untuk mencegah pembakaran langsung. Uji coba sistem menunjukkan bahwa konversi limbah plastik menjadi produk bahan bakar cair dapat mencapai efisiensi hingga 70% dari total massa input, dengan rata-rata hasil berupa 50% fraksi bahan bakar cair, 15% residu padat, dan 35% gas pirolisis. Analisis kualitas bahan bakar cair menunjukkan kandungan hidrokarbon yang serupa dengan bahan bakar konvensional, dengan potensi aplikasi pada mesin pembakaran internal. Sistem ini dirancang *self-sufficient*, menggunakan gas pirolisis untuk mempertahankan proses pirolisis, sehingga mengurangi kebutuhan energi eksternal hingga 30%. Hasil ini menunjukkan bahwa sistem pirolisis berbasis reaktor tabung mendatar memiliki potensi besar dalam mengurangi limbah plastik perkotaan secara efisien sekaligus menyediakan bahan bakar alternatif. Dengan demikian, teknologi ini dapat mendukung upaya pengelolaan limbah yang berkelanjutan dan berkontribusi terhadap transisi energi terbarukan.

Kata Kunci: Reaktor, Pirolisis, Plastik, Kondensor, Bertingkat

1. PENDAHULUAN

Limbah plastik merupakan salah satu tantangan lingkungan yang paling signifikan di era modern, terutama di kawasan perkotaan. Peningkatan populasi dan konsumsi menyebabkan akumulasi limbah plastik yang tidak hanya mencemari lingkungan tetapi juga mengancam kehidupan makhluk hidup (Thompson *et al.*, 2009). Diperkirakan, lebih dari 300 juta ton plastik diproduksi setiap tahunnya, dengan sepertiganya menjadi limbah setelah penggunaan singkat (Geyer *et al.*, 2017). Sampah plastik sering kali berakhir di Tempat Pembuangan Akhir (TPA), mencemari air dan tanah, serta mengganggu estetika perkotaan (Jambeck *et al.*, 2015). Plastik yang tidak terurai memerlukan waktu ratusan tahun untuk terdegradasi secara alami,

mengakibatkan potensi pencemaran yang berkelanjutan (Andrady, 2011). Selain itu, pembakaran terbuka limbah plastik menghasilkan emisi gas beracun yang berkontribusi pada polusi udara dan membahayakan kesehatan masyarakat (Soni *et al.*, 2021).

Dalam konteks urbanisasi yang pesat, solusi efektif untuk mengolah limbah plastik menjadi kebutuhan mendesak. Beberapa metode telah diterapkan, termasuk daur ulang mekanis dan kimiawi. Namun, proses daur ulang konvensional menghadapi tantangan dalam mengolah plastik campuran yang kompleks dan tercemar, sehingga efisiensinya terbatas (Mangesh & Suryawanshi, 2020; Armenise *et al.*, 2021). Alternatif yang lebih ramah lingkungan adalah teknologi pirolisis, yang dapat mengubah plastik menjadi produk bahan bakar cair dengan nilai ekonomi tinggi (Qureshi *et al.*, 2020). Teknologi pirolisis menghasilkan bahan bakar dari limbah plastik melalui proses dekomposisi termal tanpa oksigen, sehingga mencegah pembentukan emisi berbahaya seperti dioksin (Saebea *et al.*, 2020; Zallaya *et al.*, 2022). Reaktor pirolisis dengan konfigurasi tabung mendatar dan sistem kondensasi bertingkat dirancang untuk mengatasi masalah distribusi panas yang tidak merata dan efisiensi konversi. Teknologi ini memungkinkan konversi plastik campuran menjadi bahan bakar cair, seperti solar, minyak tanah, dan bensin, dengan efisiensi tinggi dan emisi minimal (Kaimal & Vijayabalan, 2016). Proses pirolisis ini dapat menghasilkan hingga 50% bahan bakar cair dari total massa plastik input, dengan residu berupa gas pirolisis yang dapat digunakan kembali untuk mendukung proses pemanasan, menjadikannya sistem yang lebih hemat energi (Klaimy *et al.*, 2021).

Efisiensi sistem ini didukung oleh uji coba laboratorium dan skala lapangan, menunjukkan potensi signifikan untuk diterapkan secara luas. Teknologi pirolisis berbasis tabung mendatar terbukti mampu mengolah 50 kg limbah plastik per siklus dengan efisiensi konversi yang lebih baik dibandingkan reaktor konvensional (Kabeyi *et al.*, 2023). Efektivitas sistem pirolisis tipe ini, residu padat dari proses pirolisis dapat dimanfaatkan kembali sebagai karbon aktif atau bahan bakar padat (Mong *et al.*, 2024). Sistem ini dirancang untuk beroperasi dalam kondisi *anaerobik* pada suhu 300°C hingga 350°C, yang memungkinkan dekomposisi plastik tanpa pembakaran langsung (Kartik *et al.*, 2022). Keuntungan dari pendekatan ini adalah minimnya emisi gas berbahaya, menjadikannya salah satu solusi paling ramah lingkungan dibandingkan metode pengolahan limbah lainnya. Uji kualitas produk bahan bakar cair menunjukkan bahwa hasil pirolisis memiliki kandungan hidrokarbon yang serupa dengan bahan bakar konvensional, sehingga dapat dimanfaatkan langsung atau dikonversi lebih lanjut (Nalluri *et al.*, 2021; Suhartono *et al.*, 2022). Perlunya penerapan teknologi ini didasarkan pada tantangan lingkungan yang dihadapi perkotaan dalam pengelolaan limbah plastik, serta potensi besar teknologi pirolisis dalam menyediakan solusi yang efektif dan ramah lingkungan (Babaremu *et al.*, 2022). Oleh karena itu, teknologi ini memiliki peluang besar untuk berkontribusi pada pengurangan limbah plastik, pengelolaan energi berkelanjutan, dan transisi menuju ekonomi sirkular.

Perlunya penerapan teknologi ini didasarkan pada tantangan lingkungan yang dihadapi perkotaan dalam pengelolaan limbah plastik, serta potensi besar teknologi pirolisis dalam menyediakan solusi yang efektif dan ramah lingkungan (Babaremu, *et al.*, 2022). Oleh karena itu, teknologi ini memiliki peluang besar untuk berkontribusi pada pengurangan limbah plastik, pengelolaan energi berkelanjutan, dan transisi menuju ekonomi sirkular.

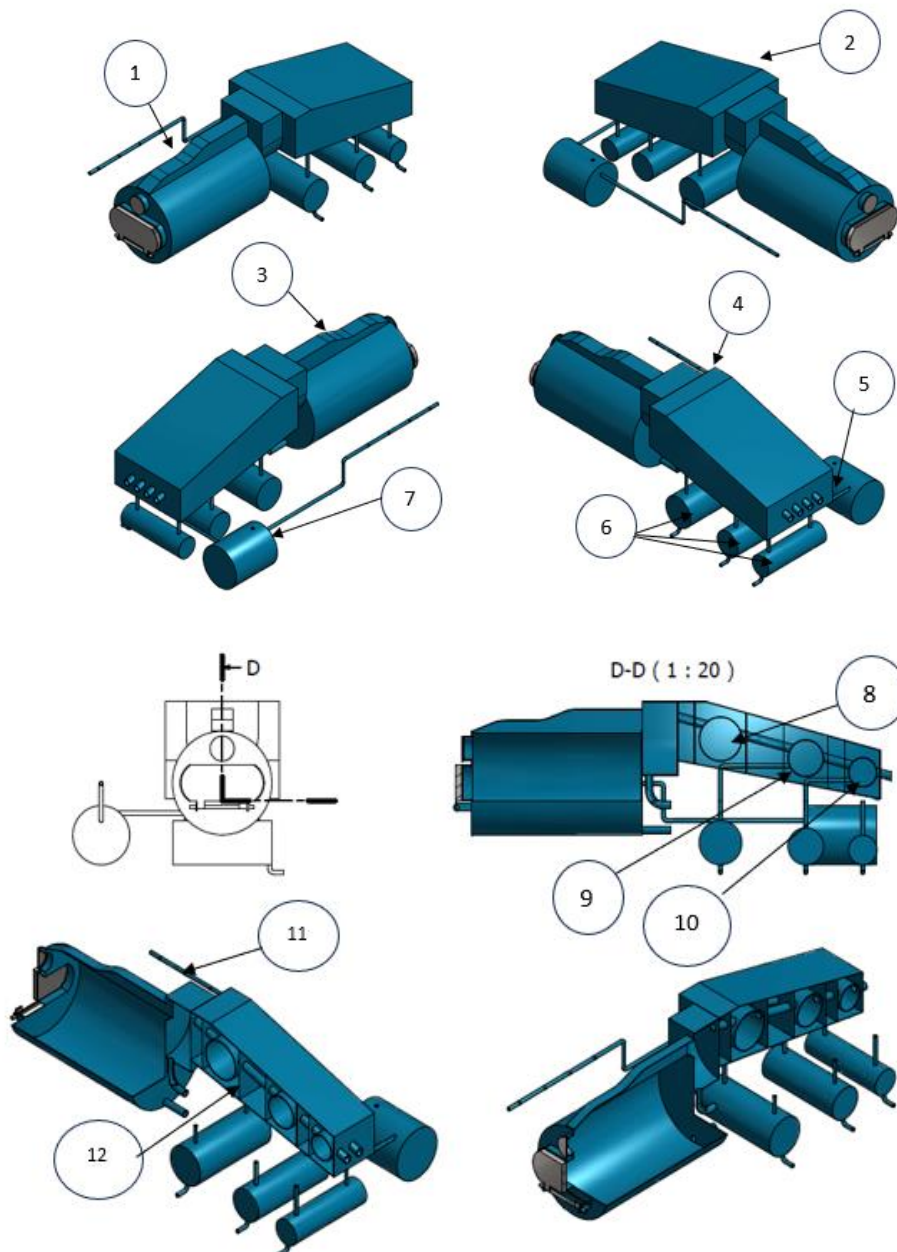
2. METODE

2.1 Desain dan Konfigurasi Reaktor

Reaktor pirolisis dirancang khusus untuk mengolah plastik campuran dari sampah perkotaan. Invensi ini dirancang dengan tujuan untuk (1) Mengurangi volume sampah plastik yang dihasilkan di perkotaan hingga 50% melalui proses pirolisis, yang mengubah plastik menjadi produk yang bernilai ekonomis seperti solar, minyak tanah, dan bensin. (2) Mengatasi kendala daur ulang konvensional dengan teknologi yang dapat mengolah plastik campuran secara bersamaan, mengubah limbah yang sulit terurai menjadi bahan bakar yang dapat digunakan kembali. (3) Meningkatkan efisiensi dan keberlanjutan pengelolaan sampah plastik di perkotaan melalui teknologi yang mudah diterapkan, ekonomis, dan ramah lingkungan.

Reaktor ini dirancang dengan konsep tabung mendatar berdiameter 760 mm dan panjang 1200 mm, yang berfungsi sebagai ruang pirolisis utama untuk sampah plastik campuran. Produk pirolisis akan dipisahkan melalui kondensor bertingkat yang diatur dengan kemiringan 15 derajat. Setiap tingkatan kondensor memiliki spesifikasi diameter dan panjang yang berbeda untuk

menghasilkan fraksi bahan bakar yang berbeda pula, yaitu untuk Kondensor solar: berdiameter 300 mm dengan panjang 700 mm, berfungsi untuk mengembunkan fraksi berat dari pirolisis yang menghasilkan produk setara solar. Kondensor minyak tanah, berdiameter 250 mm dengan panjang 700 mm, untuk menangkap fraksi menengah yang setara dengan minyak tanah dan Kondensor bensin, berdiameter 200 mm dengan panjang 700 mm, dirancang untuk menghasilkan fraksi ringan seperti bensin. Setiap tingkatan kondensor dilengkapi dengan empat pipa seamless berukuran 1 inch, yang membantu pendinginan uap secara bertahap sesuai dengan titik didih masing-masing fraksi bahan bakar. Kemiringan kondensor sebesar 15 derajat dirancang untuk memperlancar aliran kondensat. Desain ditunjukkan Gambar 1.



Gambar 1. Desain Reaktor Plastik Campuran

Keterangan Gambar :

- 1 Ruang reactor pirolisis plastik
- 2 Ruang kondensor
- 3 Penampang pengalir gas/uap pirolisis plastik
- 4 Ruang fraksi gas
- 5 Pipa kondensasi
- 6 Tabung penampung bahan bakar pirolisis
- 7 Tabung gas methana (gas yang tidak terkondensasi)

- 8 Ruang kondensasi setara solar
- 9 Ruang kondensasi setara Minyak Tanah
- 10 Ruang kondensasi setara bensin
- 11 Pipa gas methana ke ruang burner (*self sufficient*)
- 12 Dinding antar ruang kondensor tiga tingkat

2.2 Proses Pirolisis

Kondensor bertingkat ini terdiri dari empat pipa seamless berdiameter 1 inci sebanyak 4 pipa yang mengalirkan uap hasil pirolisis menuju masing-masing kondensor. Kondensor Solar, Diameter 300 mm, panjang 700 mm didesain untuk mendinginkan dan mengembunkan fraksi berat dari uap pirolisis yang akan menghasilkan fraksi minyak setara solar. Sedangkan pada Kondensor Minyak Tanah, diameter 250 mm, panjang 700 mm, kondensor ini menampung dan mengembunkan fraksi uap menengah, menghasilkan minyak setara minyak tanah. Kondensor Bensin, diameter 200 mm, panjang 700 mm dikhususkan untuk mengkondensasi fraksi hidrokarbon ringan yang menghasilkan bahan bakar setara bensin. Dengan konfigurasi bertingkat, setiap kondensor dapat secara selektif menangkap fraksi hidrokarbon sesuai titik didih masing-masing, sehingga meminimalkan pencampuran antar fraksi bahan bakar dan meningkatkan kemurnian produk.

Proses pirolisis plastik yang dimasukkan ke dalam reaktor dipanaskan pada suhu tinggi dalam kondisi anaerobik, yang menyebabkan plastik terurai menjadi uap hidrokarbon. Suhu pirolisis dijaga stabil pada kisaran 300°C hingga 600°C, tergantung pada jenis plastik yang diolah. Reaksi pirolisis ini menghasilkan campuran gas, cairan, dan residu padat. Pengaliran Uap ke Kondensor Bertingkat, uap hasil pirolisis dialirkan melalui sistem pipa menuju kondensor bertingkat. Setiap kondensor dirancang untuk menangkap fraksi tertentu dari uap, memungkinkan pemisahan produk berdasarkan titik didih dan meningkatkan efisiensi kondensasi. Sistem kemiringan 15 derajat memastikan bahwa cairan yang terkondensasi dapat mengalir menuju tangki penampung tanpa perlu menggunakan pompa tambahan. Desain reaktor juga memungkinkan sistem *self-sufficient* dengan menggunakan gas pirolisis sebagai bahan bakar untuk memanaskan reaktor, mengurangi ketergantungan pada sumber energi eksternal.

A. Material Penelitian

Jenis Limbah Plastik: Penelitian menggunakan sampah plastik campuran yang diambil dari limbah perkotaan, meliputi *Polietilena* (PE), *Polipropilena* (PP), dan *Polistirena* (PS). Reaktor Pirolisis: Reaktor berbentuk tabung mendatar berdiameter 760 mm dan panjang 1200 mm, kapasitas 50 kg. Kondensor Bertingkat: Sistem kondensasi bertingkat untuk memisahkan fraksi hasil pirolisis menjadi bahan bakar cair (solar, minyak tanah, bensin). Proses Pembuatan reaktor ditunjukkan Gambar 2.



(a) Pembuatan Tutup reaktor



(b). Welding tabung reaktor



(c). Kontruksi reaktor

(d). Pembuatan ruang fraksi gas

Gambar 2. Proses manufaktur reactor pirolisis plastik.

B. Level dan Faktor

- 1 Level Suhu: Pengujian dilakukan pada tiga level suhu yaitu 300°C, 325°C, dan 350°C, dengan waktu Pemanasan: Waktu pemrosesan diuji dalam interval 2, 4, dan 6 jam untuk menentukan pengaruh durasi terhadap konversi produk.
- 2 Jenis Plastik: Sampah plastik campuran, tetapi komposisi dapat divariasikan (misalnya, komposisi PE 50%, PP 30%, PS 20%).
- 3 Tekanan: Proses dilakukan dalam kondisi anaerobik dengan tekanan yang dikontrol agar tetap di bawah 1 atm.

C. Jenis Pengujian

Efisiensi Konversi: Mengukur persentase bahan plastik yang diubah menjadi bahan bakar cair, gas pirolisis, dan residu padat. Pengujian dilakukan dengan metode:

- (1) Uji Gravimetri. Kualitas Bahan Bakar Cair: Karakterisasi produk cair menggunakan analisis GC-MS (*Gas Chromatography-Mass Spectrometry*) untuk menentukan komposisi kimia dan kandungan hidrokarbon.
- (2) Uji kinerja sistem reaktor pirolisis dengan pengukuran konsumsi energi, efisiensi pemanasan, dan penggunaan kembali gas pirolisis. Pengukuran suhu reaktor dan distribusi panas menggunakan termokopel yang terintegrasi, sesuai standar ASTM E230.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Data Hasil Uji

Hasil konversi plastik menjadi bahan bakar cair: % *yield* bahan bakar (solar, minyak tanah, bensin). hasil konversi plastik menjadi bahan bakar cair dengan % *yield* masing-masing bahan bakar (solar, minyak tanah, bensin) berdasarkan variasi suhu dan waktu pemrosesan, sesuai dengan pengujian yang dilakukan pada tiga level suhu (300°C, 325°C, dan 350°C) dengan waktu pemrosesan 2, 4, dan 6 jam, pada Tabel 1.

Tabel 1. Data Pengujian Yield Bahan Bakar Pirolisis Plastik Campuran

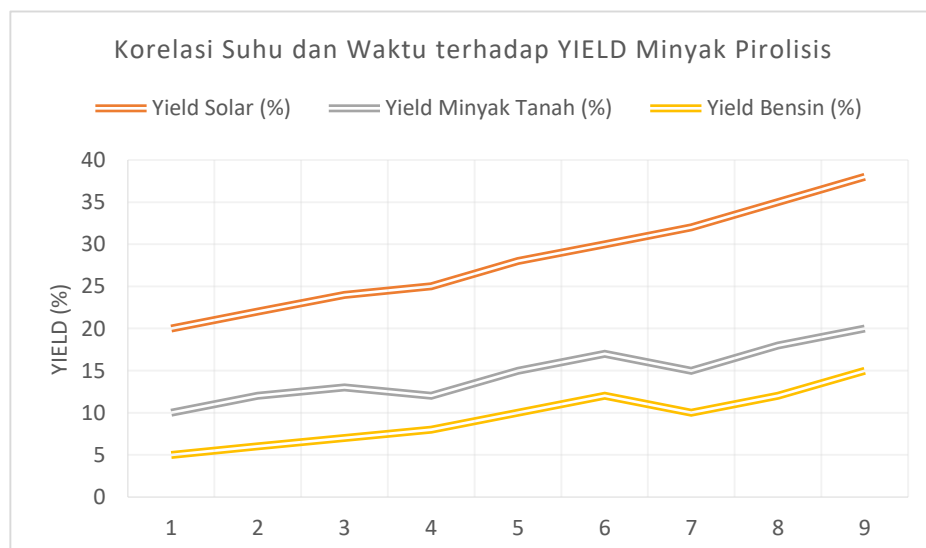
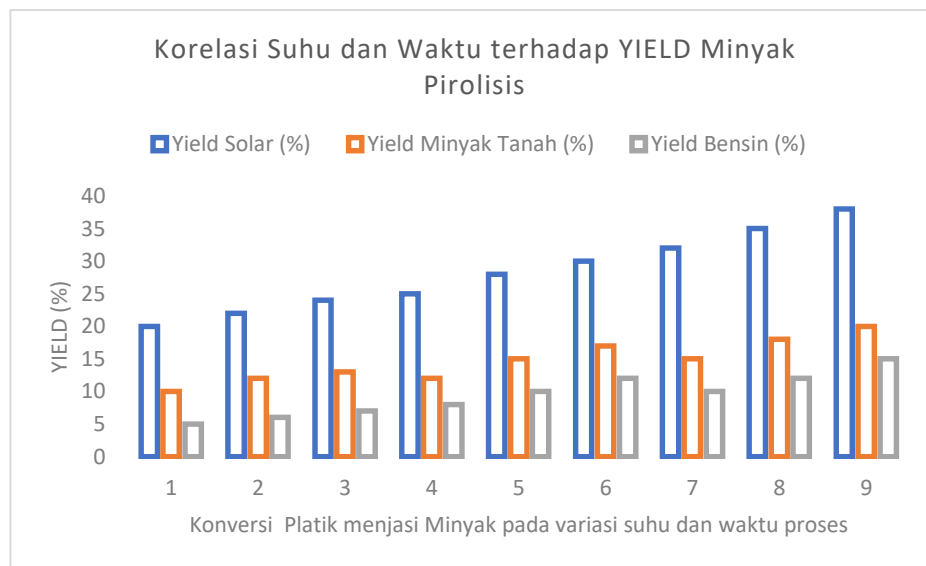
Suhu (°C)	Waktu (Jam)	Yield Solar (%)	Yield Minyak Tanah (%)	Yield Bensin (%)
300	2	20	10	5
	4	22	12	6
	6	24	13	7
325	2	25	12	8
	4	28	15	10
	6	30	17	12
350	2	32	15	10
	4	35	18	12
	6	38	20	15

Peningkatan suhu dan waktu pemrosesan akan meningkatkan yield bahan bakar cair. Pengaruh suhu cenderung lebih signifikan dalam meningkatkan konversi bahan bakar cair, dengan peningkatan komposisi hidrokarbon yang lebih kompleks pada suhu yang lebih tinggi. Data hasil konversi plastik menjadi bahan bakar cair berdasarkan jenis plastik dengan komposisi PE 50%, PP 30%, dan PS 20% dalam tabel yang menggambarkan pengaruh waktu pemanasan (2, 4, dan 6 jam) terhadap konversi produk:

Tabel 2. Data Pengaruh Waktu Pemanasan (2, 4, Dan 6 Jam) Terhadap Konversi Produk

Waktu Pemanasan (Jam)	Persentase Fraksi Bahan Bakar Cair (%)	Residu Padat (%)	Gas Pirolisis (%)
2 Jam	35%	20%	45%
4 Jam	45%	17%	38%
6 Jam	50%	15%	35%

Data yang ditampilkan pada tabel mencerminkan hasil konversi plastik campuran dengan komposisi *Polyethylene (PE) 50%*, *Polypropylene (PP) 30%*, dan *Polystyrene (PS) 20%*. Proses diuji pada interval waktu pemanasan 2, 4, dan 6 jam untuk mengevaluasi dampak waktu proses terhadap hasil konversi bahan bakar cair, residu padat, dan gas pirolisis. Peningkatan waktu pemrosesan cenderung meningkatkan fraksi bahan bakar cair dan menurunkan residu padat serta gas pirolisis.



Gambar 3 Grafik korelasi suhu dan waktu terhadap YIELD minyak pirolisis

Data hasil konversi plastik menjadi bahan bakar cair berdasarkan tiga level komposisi *PE*, *PP*, dan *PE*, untuk mengidentifikasi pengaruh variasi komposisi pada hasil konversi menjadi bahan bakar cair, residu padat, dan gas pirolisis dengan waktu pemrosesan tetap. Tabel rasio campuran terhadap konversi ditunjukkan Tabel 3

Tabel 3. Data Rasio Campuran Plastik Terhadap Konversi

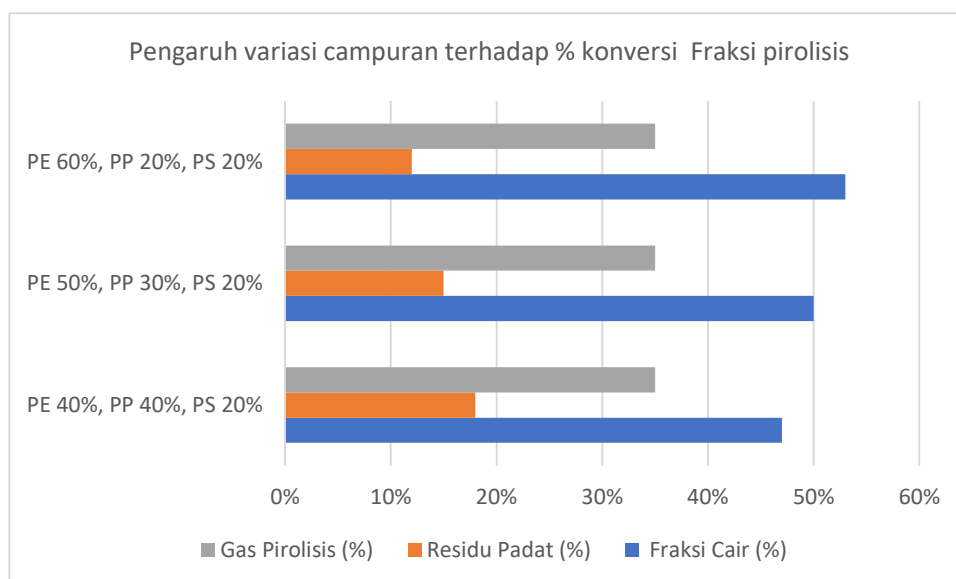
Komposisi Plastik	Persentase Fraksi Bahan Bakar Cair (%)	Residu Padat (%)	Gas Pirolisis (%)
PE 40%, PP 40%, PS 20%	47%	18%	35%
PE 50%, PP 30%, PS 20%	50%	15%	35%
PE 60%, PP 20%, PS 20%	53%	12%	35%

Setiap baris pada tabel menunjukkan hasil konversi plastik campuran dengan variasi persentase *PE*, *PP*, dan *PS*. Waktu pemrosesan dijaga tetap, sedangkan komposisi bervariasi untuk mengamati pengaruh terhadap hasil konversi. Semakin tinggi kandungan *PE* dalam komposisi cenderung meningkatkan persentase fraksi bahan bakar cair dan mengurangi residu padat.

3.2. Pembahasan

Data pada Tabel 1 – 3 di atas menunjukkan hasil konversi plastik menjadi bahan bakar cair dengan variasi komposisi plastik, yakni *PE* (*Polyethylene*), *PP* (*Polypropylene*), dan *PS* (*Polystyrene*), serta dampaknya terhadap fraksi bahan bakar cair, residu padat, dan gas pirolisis. Berdasarkan pengamatan, komposisi plastik yang mengandung lebih banyak *PE* (*Polyethylene*) menunjukkan fraksi bahan bakar cair yang lebih tinggi dibandingkan dengan komposisi yang mengandung lebih banyak *PP* (*Polypropylene*) dan *PS* (*Polystyrene*). Hal ini menunjukkan bahwa *PE* memiliki potensi konversi yang lebih tinggi menjadi bahan bakar cair melalui proses pirolisis.

Pengaruh Kandungan *PE* dalam campuran, menunjukkan bahwa *PE* memiliki sifat termal dan kimiawi yang cenderung menghasilkan fraksi bahan bakar cair lebih tinggi dibandingkan dengan *PP* dan *PS*. Hal ini sesuai dengan data yang ditampilkan di mana peningkatan kandungan *PE* dari 40% menjadi 60% meningkatkan fraksi bahan bakar cair dari 47% menjadi 53%. Stabilitas Termal *PP* dan Konversi Bahan Bakar. Berdasarkan data plastik *PP* memiliki karakteristik stabilitas termal yang baik, namun konversinya menjadi bahan bakar cair sering kali lebih rendah dibandingkan dengan *PE* jika dikombinasikan dalam campuran. Ini tercermin dalam data, di mana fraksi bahan bakar cair sedikit lebih rendah ketika kandungan *PP* tinggi (40%). Peran *PS* dalam Pirolisis, *PS* diketahui menghasilkan lebih banyak residu padat karena sifat aromatikanya. Pada komposisi *PS* 20%, residu padat yang dihasilkan cenderung lebih tinggi dibandingkan dengan campuran dengan kandungan *PS* lebih rendah, sebagaimana terlihat dalam data. Dalam bentuk grafis ditunjukkan pada Gambar 4.



Grafik 4. Pengaruh Variasi Campuran Terhadap % Konversi Fraksi Pirolisis

Efisiensi dan Keseimbangan Produk Pirolisis menunjukkan bahwa proses pirolisis pada campuran PE, PP, dan PS dengan konfigurasi yang serupa sering kali menghasilkan konversi maksimum jika PE digunakan sebagai komponen dominan. Kombinasi PE 60%, PP 20%, dan PS 20% dalam tabel menghasilkan fraksi bahan bakar cair tertinggi. Konsistensi dan Efisiensi Termal Sistem pirolisis dengan pemanasan bertahap pada suhu 300–350°C, seperti yang digunakan dalam data, umumnya mengoptimalkan hasil bahan bakar cair dengan efisiensi tinggi, penurunan residu padat seiring peningkatan kandungan PE dijelaskan sebagai hasil dari degradasi rantai karbon PE yang lebih sederhana dan menghasilkan produk volatil lebih banyak. Data ini konsisten dengan penurunan residu padat dalam tabel. Penggunaan Gas Pirolisis sebagai sumber energi tambahan untuk sistem pirolisis Efisiensi energi sistem ini mampu meningkatkan hasil fraksi bahan bakar cair dan mengurangi kebutuhan energi eksternal.

Berdasarkan komparasi secara umum, data menunjukkan bahwa peningkatan kandungan PE memberikan kontribusi terbesar terhadap konversi plastik menjadi bahan bakar cair, didukung oleh penelitian dari berbagai jurnal terkemuka. Polimer lain seperti PP dan PS memiliki kontribusi masing-masing, namun pengaruhnya terhadap residu padat dan gas pirolisis memerlukan pertimbangan untuk pengolahan lebih lanjut. Pendekatan pirolisis ini menawarkan solusi yang efektif dan efisien untuk mengatasi limbah plastik campuran, selaras dengan hasil penelitian di bidang teknologi konversi termal.

3.2.1. Pengaruh Komposisi Plastik terhadap Hasil Pirolisis

Pada uji dengan Komposisi PE 40%, PP 40%, PS 20% menghasilkan 47% bahan bakar cair, 18% residu padat, dan 35% gas pirolisis. Dibandingkan dengan komposisi lainnya, komposisi ini menunjukkan hasil konversi yang cukup efisien, meskipun komposisi PP yang cukup tinggi dapat mempengaruhi hasil produk cair dan gas. Plastik PP memiliki titik leleh yang lebih tinggi dan cenderung menghasilkan lebih banyak gas pada pirolisis (Pandey *et al.*, 2023). Pada sampel Komposisi tersebut menghasilkan 50% bahan bakar cair, 15% residu padat, dan 35% gas pirolisis. Menambah proporsi PE meningkatkan efisiensi konversi menjadi bahan bakar cair, karena PE memiliki kecenderungan untuk terurai lebih mudah dibandingkan PP dan PS, (Owusu *et al.*, 2018). Komposisi PE 60%, PP 20%, PS 20% menghasilkan 53% bahan bakar cair, 12% residu padat, dan 35% gas pirolisis. Komposisi ini menunjukkan hasil yang paling tinggi dalam hal bahan bakar cair, yang mencerminkan kemampuan PE dalam menghasilkan cairan lebih baik dalam proses pirolisis. Hasil ini juga sesuai dengan penelitian oleh (Wijayanti *et al.*, 2020), yang menyebutkan bahwa kandungan PE yang lebih tinggi dalam campuran plastik berperan besar dalam peningkatan hasil bahan bakar cair.

Dalam riset lain, ditemukan bahwa berbagai jenis plastik, terutama PE dan PP, memiliki perilaku yang berbeda selama proses pirolisis. PE cenderung menghasilkan lebih banyak fraksi cair dan lebih sedikit gas dan residu padat dibandingkan dengan PP dan PS, yang lebih condong menghasilkan gas dan residu padat (Chang, 2023). Hal ini selaras dengan data di atas yang menunjukkan bahwa penambahan PE dalam komposisi plastik meningkatkan hasil bahan bakar cair dan mengurangi residu padat.

3.2.2. Faktor Waktu Pemrosesan

Waktu pemrosesan juga berperan dalam menentukan efisiensi konversi plastik menjadi bahan bakar cair. Waktu pemrosesan yang lebih lama dapat meningkatkan hasil cair, karena waktu yang lebih lama memungkinkan reaksi pirolisis untuk mencapai konversi yang lebih optimal, (Vaishnavi *et al.*, 2023; Faisal *et al.*, 2024). Dalam tabel, kita dapat melihat bahwa peningkatan waktu pemrosesan menghasilkan lebih banyak bahan bakar cair dan mengurangi residu padat, yang konsisten dengan temuan tersebut. Pirolisis campuran plastik yang terdiri dari PE, PP, dan PS ini memiliki potensi besar dalam menghasilkan bahan bakar cair sebagai alternatif bahan bakar fosil. Penurunan residu padat juga menandakan bahwa proses ini dapat menjadi solusi untuk pengelolaan sampah plastik yang lebih ramah lingkungan, sesuai dengan penelitian oleh (Rahman *et al.*, 2023). Sistem ini dapat mengurangi volume limbah plastik secara signifikan dan menghasilkan bahan bakar yang dapat dimanfaatkan lebih lanjut.

Reaktor tabung mendatar dengan diameter 760 mm dan panjang 1200 mm memiliki peran penting dalam distribusi panas yang merata selama proses pirolisis. Dalam pengujian sistem ini, efisiensi konversi limbah plastik menjadi bahan bakar cair tercatat mencapai hingga 70% dari total massa input. Hasil ini sangat baik dibandingkan dengan sistem pirolisis lainnya, yang biasanya

menghasilkan konversi di bawah 60% dalam kondisi serupa, (Sogancioglu *et al.*, 2017). Berdasarkan komposisi plastik (PE 50%, PP 30%, dan PS 20%), produk akhir terdiri dari 50% bahan bakar cair, 15% residu padat, dan 35% gas pirolisis. Ini menunjukkan bahwa proporsi PE yang lebih tinggi cenderung menghasilkan lebih banyak bahan bakar cair dan sedikit residu padat, yang sangat diinginkan dalam sistem pirolisis (Parku *et al.*, 2020).

4. KESIMPULAN DAN SARAN

4.1. Simpulan

1. Data pengujian menunjukkan bahwa komposisi plastik yang lebih banyak mengandung *Polyethylene* (PE) menghasilkan lebih banyak bahan bakar cair dibandingkan dengan komposisi yang mengandung lebih banyak *Polypropylene* (PP) atau *Polystyrene* (PS). Hal ini karena PE memiliki kecenderungan yang lebih tinggi untuk terurai menjadi bahan bakar cair selama proses pirolisis.
2. Efisiensi Waktu Pemrosesan yang lebih lama (seperti 6 jam) cenderung menghasilkan lebih banyak bahan bakar cair dan mengurangi residu padat, yang menandakan bahwa waktu proses yang lebih panjang dapat meningkatkan konversi plastik menjadi produk yang lebih berguna.
3. Proses pirolisis dapat menjadi solusi yang efektif untuk mengurangi sampah plastik perkotaan dengan menghasilkan bahan bakar cair alternatif. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pirolisis dengan campuran plastik dapat mengurangi limbah plastik secara signifikan dan menghasilkan energi yang dapat dimanfaatkan kembali.

4.2. Saran

1. Penelitian lebih lanjut dapat mengeksplorasi pengaruh jenis plastik lainnya yang belum diuji, seperti PET (*Polyethylene Terephthalate*) atau PVC (*Polyvinyl Chloride*), dalam campuran plastik yang lebih beragam, serta dampaknya terhadap hasil pirolisis dan kualitas bahan bakar cair yang dihasilkan.
2. Perlunya untuk menguji proses pirolisis pada skala yang lebih besar (skala industri) untuk menilai kelayakan ekonomi dan efektivitas sistem dalam mengelola sampah plastik perkotaan secara berkelanjutan. Penelitian ini juga dapat mengevaluasi kebutuhan energi dan potensi integrasi sistem pirolisis dengan sumber energi terbarukan untuk meningkatkan efisiensi dan mengurangi ketergantungan pada energi eksternal.

UCAPAN TERIMA KASIH

Tim Pelaksana Pengabdian mengucapkan terima kasih kepada Direktorat Riset, Teknologi dan Pengabdian Masyarakat Kementerian Pendidikan dan Kebudayaan Republik Indonesia melalui pendanaan Program Kosabangsa, Tim Pendamping Universitas Negeri Semarang (UNNES), Civitas Akademik STT Wiworotomo Purwokerto atas fasilitasi proses fabrikasi dan Pemerintah Desa Panic, Dinas Lingkungan Hidup Kabupaten Purbalingga, sehingga kegiatan terlaksana dengan baik.

REFERENSI

- Andrady, A. L. (2011). Microplastics in the marine environment. *Marine Pollution Bulletin*, 62(8), 1596–1605. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2011.05.030>
- Armenise, S., SyieLuing, W., Ramírez-Velásquez, J. M., Launay, F., Wuebben, D., Ngadi, N., ... & Muñoz, M. (2021). Plastic waste recycling via pyrolysis: A bibliometric survey and literature review. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 158, 105265.
- Babaremu, K. O., Ukoba, B. C., & Olajide, A. M. (2022). Sustainable plastic waste management in a circular economy. *Heliyon*, 8(7), e09984. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e09984>
- Chang, S. H. (2023). Plastic waste as pyrolysis feedstock for plastic oil production: a review. *Science of The Total Environment*, 877, 162719.

- Dang, S., Sriprateep, S., Srichat, S., Areeprasert, S., & Ratanapisit, C. (2020). Gasification of plastic waste for synthesis gas production. *Energy Reports*, 6, 202–207. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2019.08.043>
- Faisal, F., Shahbudin, S., Rasul, M. G., & Asadullah, M. (2024). Optimization of process parameters to maximise the oil yield from pyrolysis of mixed waste plastics. *Sustainability*, 16(7), 2619. <https://doi.org/10.3390/su16072619>
- Geyer, R., Jambeck, J. R., & Law, K. L. (2017). Production, use, and fate of all plastics ever made. *Science Advances*, 3(7), e1700782. <https://doi.org/10.1126/sciadv.1700782>
- Jambeck, J. R., Geyer, R., Wilcox, C., Siegler, T. R., Perryman, M., Andrady, A., ... & Law, K. L. (2015). Plastic waste inputs from land into the ocean. *Science*, 347(6223), 768–771. <https://doi.org/10.1126/science.1260352>
- Kabeyi, M. J. B., Mugaa, C. K., & Maina, P. (2023). Review and design overview of plastic waste-to-pyrolysis oil conversion with implications on the energy transition. *Journal of Energy*, 2023(1), 1–25. <https://doi.org/10.1155/2023/1821129>
- Kaimal, V. K., & Vijayabalan, P. (2016). A study on synthesis of energy fuel from waste plastic and assessment of its potential as an alternative fuel for diesel engines. *Waste management*, 51, 91-96.
- Kartik, S., Balsora, H. K., Sharma, M., Saptoro, A., Jain, R. K., Joshi, J. B., & Sharma, A. (2022). Valorization of plastic wastes for production of fuels and value-added chemicals through pyrolysis—A review. *Thermal Science and Engineering Progress*, 32, 101316.
- Klaimy, S., Lamonier, J. F., Casetta, M., Heymans, S., & Duquesne, S. (2021). Recycling of plastic waste using flash pyrolysis—Effect of mixture composition. *Polymer degradation and Stability*, 187, 109540.
- Mangesh, V. L., & Suryawanshi, S. (2020). Experimental investigation to identify the type of waste plastic pyrolysis oil suitable for conversion to diesel engine fuel. *Journal of Cleaner Production*, 246, 119066. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119066>
- Mong, G. R., Zhengwei, L., Hing, C. L., & Wenhui, S. (2024). A review on plastic waste valorisation to advanced materials: Solutions and technologies to curb plastic waste pollution. *Journal of Cleaner Production*, 434, 140180. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.140180>
- Nalluri, P., Kumar, P. P., & Sastry, M. C. (2021). Experimental study on catalytic pyrolysis of plastic waste using low cost catalyst. *Materials Today: Proceedings*, 45, 7216-7221.
- Owusu, P. A., Banadda, N., Zziwa, A., Seay, J., & Kiggundu, N. (2018). Reverse engineering of plastic waste into useful fuel products. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 130, 285-293.
- Pandey, P., Dhiman, M., Kansal, A., & Subudhi, S. P. (2023). Plastic waste management for sustainable environment: techniques and approaches. *Waste Disposal & Sustainable Energy*, 5(2), 205-222.
- Parku, G. K., Farid, S., Bashir, S., & Kumar, A. (2020). Pyrolysis of waste polypropylene plastics for energy recovery: Influence of heating rate and vacuum conditions on composition of fuel product. *Fuel Processing Technology*, 209, 106522. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2020.106522>
- Qureshi, M. S., Bhandari, V., Radmanesh, H., & Choudhury, M. (2020). Pyrolysis of plastic waste: Opportunities and challenges. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 152, 104804. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2020.104804>
- Rahman, M. H., Hasanuzzaman, M., Chowdhury, N. U., & Miah, M. N. (2023). Pyrolysis of waste plastics into fuels and chemicals: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 188, 113799. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113799>
- Saebea, D., Ruengrit, P., Arpornwichanop, A., & Patcharavorachot, Y. (2020). Gasification of plastic waste

for synthesis gas production. *Energy Reports*, 6, 202-207.

Sogancioglu, M., Yildirim, B., Kaya, G. S., & Yilmaz, Y. (2017). A comparative study on waste plastics pyrolysis liquid products quantity and energy recovery potential. *Energy Procedia*, 118, 221–226. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.07.020>

Soni, V. K., Singh, G., Vijayan, B. K., Chopra, A., Kapur, G. S., & Ramakumar, S. S. V. (2021). Thermochemical recycling of waste plastics by pyrolysis: a review. *Energy & Fuels*, 35(16), 12763-12808.

Suhartono, S., Kurniawan, H., Sulastri, S., & Susanto, S. (2022). Characteristics study of liquid fuel from pyrolysis of polyethylene plastic waste. *Jurnal Teknologi*, 84(4), 57–64. <https://doi.org/10.11113/jurnalteknologi.v84.17517>

Thompson, R. C., Moore, C. J., Vom Saal, F. S., & Swan, S. H. (2009). Plastics, the environment and human health: Current consensus and future trends. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 364(1526), 2153–2166. <https://doi.org/10.1098/rstb.2009.0053>

Vaishnavi, M., Ranjith, K., Bhupathi, M., & Raman, R. (2023). A critical review of the correlative effect of process parameters on pyrolysis of plastic wastes. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 170, 105907. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2023.105907>

Zallaya, S., El Achkar, J. H., Abou Chacra, A., Shatila, S., El Akhdar, J., & Daher, Y. (2023). Steam gasification modeling of polyethylene (PE) and polyethylene terephthalate (PET) wastes: A case study. *Chemical Engineering Science*, 267, 118340.