RANCANG BANGUN REAKTOR PIROLISIS BERBASIS PEMANAS KOMPOR OLI BEKAS DENGAN KAPASITAS 5 KG

Nurul Muhibil Arif [1], Ahmad Ali Imron [2], Avit Aprilyanto [3],
[1),2)] Politeknik Angkatan Darat, Kota Batu, Jawa Timur
[3)] Universitas PGRI Semarang, Kota Semarang, Jawa tengah
E-mail: muhibilarif01@gmail.com

ABSTRAK

Peningkatan volume limbah plastik dan oli bekas menimbulkan tantangan lingkungan yang signifikan sekaligus membuka peluang pemanfaatan sebagai sumber energi alternatif. Penelitian ini bertujuan merancang dan membangun reaktor pirolisis sistem batch kapasitas 5 kg berbasis pemanas kompor oli bekas untuk mengonversi limbah plastik menjadi produk bernilai energi. Reaktor dirancang menggunakan material stainless steel SS304 dengan mempertimbangkan ketahanan termal, kekuatan mekanik, dan ketahanan korosi pada suhu operasi hingga 400°C. Metode penelitian meliputi perancangan mekanik, analisis termal, perhitungan kebutuhan kalor, analisis efisiensi pembakaran, serta evaluasi keamanan struktur. Hasil menunjukkan volume total reaktor sebesar 0,0348 m³ dengan massa struktur sekitar 8,32 kg. Total kebutuhan energi sistem mencapai ±8.115 kJ yang mencakup pemanasan bahan baku, pemanasan material reaktor, dan energi proses pirolisis. Sistem kompor oli bekas mampu menghasilkan daya panas efektif hingga 8,5 kW dengan efisiensi pembakaran mencapai 85%. Analisis struktural menunjukkan tegangan dinding sebesar 6,01 MPa dengan faktor keamanan 34,9, sehingga desain dinilai aman untuk skala laboratorium. Penelitian ini membuktikan bahwa integrasi reaktor pirolisis dengan kompor oli bekas dapat menjadi solusi ekonomis dan aplikatif dalam pengolahan limbah plastik sekaligus pemanfaatan limbah oli sebagai bahan bakar alternatif.

Keyword : Pirolisis, limbah plastik, kompor oli bekas, reaktor batch, energi alternatif.

2.1 PENDAHULUAN

Peningkatan konsumsi plastik global secara signifikan telah menyebabkan akumulasi limbah yang sulit terurai secara alami dan berpotensi mencemari lingkungan dalam jangka panjang [1]. Plastik jenis poliolefin seperti HDPE, LDPE, dan PP mendominasi limbah domestik maupun industri karena penggunaannya yang luas pada sektor kemasan, rumah tangga, dan manufaktur [2]. Di sisi lain, limbah oli bekas dari kendaraan dan industri juga terus meningkat serta berisiko mencemari tanah dan air apabila tidak dikelola secara tepat (Mohan et al., 2006).

Teknologi pirolisis merupakan salah satu metode termokimia yang efektif dalam mengonversi limbah plastik menjadi produk seperti minyak pirolisis, gas sintetis, dan char melalui pemanasan tanpa oksigen [3]. Proses ini dinilai lebih fleksibel dibandingkan insinerasi karena menghasilkan produk bernilai ekonomis serta menurunkan volume limbah secara signifikan [4]. Reaktor batch banyak digunakan pada skala laboratorium karena konstruksinya sederhana, biaya pembuatan rendah, serta mudah dikontrol untuk penelitian awal [5].

Efektivitas sistem pirolisis sangat dipengaruhi oleh desain reaktor, distribusi panas, efisiensi pembakaran, dan pemilihan material konstruksi [6]. Stainless steel SS304 umum digunakan karena memiliki ketahanan korosi tinggi, stabilitas termal baik, dan kekuatan mekanik memadai pada suhu menengah [7]. Selain itu, penggunaan kompor oli bekas sebagai sumber panas eksternal dapat menekan biaya operasional sekaligus memanfaatkan limbah energi sekunder secara lebih produktif.

Penelitian ini berfokus pada rancang bangun reaktor pirolisis kapasitas 5 kg berbasis pemanas kompor oli bekas dengan pendekatan analisis teknik meliputi kebutuhan kalor, performa termal, keamanan struktur, dan efisiensi sistem. Kebaruan penelitian terletak pada integrasi antara pengolahan limbah plastik dan pemanfaatan oli bekas sebagai sumber energi dalam satu sistem laboratorium ekonomis.

2.1.1 Permasalahan Limbah Plastik di Indonesia

Indonesia termasuk negara dengan kontribusi limbah plastik yang cukup besar di dunia. Peningkatan konsumsi produk berbahan plastik menyebabkan akumulasi limbah yang sulit terurai secara alami. Pengolahan limbah plastik secara konvensional seperti pembakaran terbuka dapat menghasilkan emisi berbahaya sehingga diperlukan metode pengolahan yang lebih ramah lingkungan seperti pirolisis.

2.1.2 Pemanfaatan Oli Bekas

Oli bekas kendaraan bermotor masih memiliki kandungan hidrokarbon yang tinggi sehingga dapat dimanfaatkan kembali sebagai bahan bakar alternatif. Pemanfaatan oli bekas sebagai sumber energi pada sistem pirolisis dapat mengurangi limbah B3 sekaligus menekan biaya operasional.

2.2 TINJAUAN PUSTAKA

Pirolisis merupakan proses dekomposisi termal material organik pada temperatur tinggi tanpa oksigen. Pada proses ini, plastik dipanaskan hingga mengalami pemutusan rantai polimer dan menghasilkan minyak, gas, serta residu padat. Temperatur operasi pirolisis umumnya berada pada rentang 300–500°C.

2.2.1 Reaktor Pirolisis

Reaktor pirolisis berfungsi sebagai tempat berlangsungnya proses dekomposisi termal plastik. Pada penelitian ini digunakan reaktor tipe batch berbentuk silinder vertikal berbahan stainless steel karena tahan terhadap temperatur tinggi dan korosi.

2.2.2 Perpindahan panas

Perpindahan panas dalam reaktor pirolisis terjadi melalui konduksi, konveksi, dan aliran gas pirolisis. Konduksi terjadi melalui dinding reaktor, sedangkan konveksi terjadi setelah plastik mencair dan membantu distribusi panas menjadi lebih merata. Aliran gas pirolisis juga membantu pencampuran panas di dalam reaktor.

2.2.3 Kebutuhan kalor

Kebutuhan kalor pada proses pirolisis terdiri dari kalor pemanasan bahan, kalor pemanasan reaktor, dan energi reaksi pirolisis. Secara umum dapat dinyatakan sebagai:

$$Q_{total} = Q_{bahan} + Q_{reaktor} + Q_{pirolisis}$$

2.2.4 Energi Pembakaran Oli Bekas

Energi panas diperoleh dari pembakaran oli bekas menggunakan burner dan blower. Oli bekas memiliki nilai kalor tinggi sehingga mampu digunakan sebagai bahan bakar alternatif untuk proses pirolisis. Energi pembakaran dapat dihitung menggunakan persamaan:

$$Q_{fuel} = m_{fuel} \times HV$$

2.2.5 Efisiensi Sistem

Efisiensi sistem menunjukkan kemampuan alat dalam memanfaatkan energi hasil pembakaran untuk proses pirolisis. Efisiensi dipengaruhi oleh distribusi panas, desain burner, isolasi termal, dan suplai udara pembakaran.

2.2.6 Tegangan Dinding Reaktor

Analisis tegangan dilakukan untuk memastikan reaktor aman digunakan pada temperatur operasi tinggi. Tegangan dinding reaktor silinder dapat dihitung dengan persamaan:

$$\sigma = \frac{Pr}{t}$$

2.2.7 Karakteristik Material SS304

Stainless steel SS304 memiliki kandungan kromium dan nikel yang tinggi sehingga mampu memberikan ketahanan korosi yang baik pada temperatur menengah hingga tinggi. Material ini juga memiliki kemampuan fabrikasi dan pengelasan yang baik sehingga banyak digunakan pada sistem perpindahan panas dan bejana proses industri.

2.2.8 Pengaruh Temperatur terhadap Produk Pirolisis

Temperatur operasi sangat mempengaruhi distribusi produk pirolisis. Temperatur rendah cenderung menghasilkan residu padat lebih tinggi, sedangkan temperatur tinggi meningkatkan produksi gas dan minyak pirolisis. Pada rentang 400–500°C umumnya diperoleh fraksi cair yang paling optimal untuk plastik jenis HDPE dan LDPE.

2.2.9 Pengaruh Waktu Tinggal

Waktu tinggal material di dalam reaktor mempengaruhi tingkat dekomposisi rantai polimer. Semakin lama waktu tinggal, maka proses pemutusan rantai molekul berlangsung lebih sempurna. Namun waktu tinggal yang terlalu lama dapat meningkatkan pembentukan gas dan menurunkan yield minyak.

2.3 METODE PENELITIAN

2.3.1 Jenis Penelitian

Penelitian ini menggunakan metode eksperimen rancang bangun dengan pendekatan kuantitatif melalui analisis desain mekanik, termal, dan performa operasional.

2.3.2 Tahapan Penelitian

1. Identifikasi kebutuhan kapasitas reaktor (5 kg/batch).
2. Pemilihan material SS304.
3. Perhitungan volume dan dimensi reaktor.
4. Analisis kebutuhan energi termal.
5. Perancangan sistem kompor oli bekas.
6. Analisis blower dan suplai udara.
7. Evaluasi kekuatan struktur.
8. Pengujian performa sistem.

2.3.3 Spesifikasi Utama Reaktor

Tabel 1. Spesifikasi utama reaktor pirolisis

Parameter	Nilai
Kapasitas bahan baku	5 kg
Material	SS304
Diameter tabung	36 cm
Tinggi tabung	50 cm
Ketebalan material	2 mm
Sistem operasi	Batch
Suhu operasi maksimum	400°C
Sumber panas	Kompor oli bekas

Caption: Dimensi dan spesifikasi dasar reaktor dirancang untuk operasi pirolisis skala laboratorium.

2.3.4 Persamaan Dasar

Volume silinder:

$V = \pi r^2 h$

Kebutuhan kalor:

$Q = mc\Delta T$

Tegangan dinding:

$\sigma = Pr/t$

Faktor keamanan:

$SF = \sigma_{izin} / \sigma_{kerja}$

2.3.5 Diagram Alir Penelitian

Tahapan penelitian dimulai dari studi literatur, perancangan desain reaktor, perhitungan kebutuhan kalor, fabrikasi alat, pengujian performa sistem, hingga evaluasi hasil penelitian. Diagram alir penelitian digunakan untuk mempermudah proses analisis dan memastikan tahapan penelitian berjalan sistematis.

2.3.6 Proses Fabrikasi Reaktor

Proses fabrikasi dimulai dari pemotongan material SS304 sesuai dimensi desain, kemudian dilakukan pembentukan tabung silinder dan pengelasan sambungan. Setelah itu dilakukan pemasangan saluran gas, dudukan reaktor, burner, serta sistem kondensor. Tahap akhir berupa pengujian kebocoran dan pemeriksaan kualitas sambungan las.

2.3.7 Instrumen Pengujian

Instrumen yang digunakan dalam penelitian meliputi thermocouple untuk pengukuran temperatur, blower untuk suplai udara pembakaran, timbangan digital untuk pengukuran massa bahan, dan stopwatch untuk pengukuran waktu proses. Instrumen pengukuran dipilih sesuai kebutuhan pengujian termal dan operasional sistem.

2.4 HASIL DAN PEMBAHASAN

2.4.1 Hasil Perancangan Reaktor

Perhitungan desain menunjukkan volume efektif total reaktor sebesar 0,0348 m^3 yang memadai untuk kapasitas bahan baku 5 kg plastik cacah. Massa total struktur diperkirakan sebesar 8,32 kg berdasarkan dimensi tabung dan sifat densitas SS304.

2.4.2 Analisis Kebutuhan Energi

Tabel 2. Distribusi kebutuhan energi sistem

Komponen Energi	Nilai (kJ)
Pemanasan bahan baku	2.200
Pemanasan reaktor	915
Energi pirolisis	5.000
Total	8.115

Total kebutuhan kalor merupakan akumulasi energi pemanasan awal dan energi reaksi pirolisis.

Grafik 1. Distribusi kebutuhan energi

1. Pemanasan bahan baku: 27%
2. Pemanasan reaktor: 11%
3. Proses pirolisis: 62%

Interpretasi: Energi terbesar dibutuhkan pada tahap dekomposisi termal plastik, sehingga kestabilan pembakaran menjadi faktor utama performa sistem.

2.4.3 Kinerja Kompor Oli Bekas

Sistem pembakaran menggunakan blower untuk meningkatkan atomisasi bahan bakar dan suplai oksigen. Hasil pengujian menunjukkan:

Tabel 3. Kinerja sistem pembakaran

Parameter	Nilai
Konsumsi oli	1,2 L/jam
Daya panas efektif	8,5 kW
Efisiensi pembakaran maksimum	85%
Suhu dasar tungku	±400°C

Kinerja kompor menunjukkan kemampuan memadai untuk mendukung proses pirolisis skala laboratorium.

Grafik 2. Hubungan potensiometer blower terhadap efisiensi pembakaran

1. Kecepatan rendah: efisiensi rendah
2. Kecepatan optimal: efisiensi tertinggi
3. Kecepatan berlebih: efisiensi menurun akibat turbulensi berlebih

Interpretasi: Pengaturan suplai udara sangat menentukan stabilitas nyala dan efisiensi panas.

2.4.4 Analisis Kekuatan Struktur

Berdasarkan tekanan operasi rendah dan temperatur kerja, tegangan maksimum dinding reaktor sebesar 6,01 MPa masih jauh di bawah batas izin material SS304.

Tabel 4. Analisis struktural reaktor

Parameter	Nilai
Tegangan kerja	6,01 MPa
Tegangan izin SS304	>200 MPa
Faktor keamanan	34,9

Caption: Nilai faktor keamanan tinggi menunjukkan desain aman untuk penggunaan laboratorium.

2.4.5 Pembahasan Umum

Integrasi kompor oli bekas dengan reaktor pirolisis menunjukkan potensi besar sebagai teknologi tepat guna dengan biaya operasional rendah. Penggunaan limbah oli sebagai bahan bakar mendukung efisiensi ekonomi, sementara pengolahan limbah plastik menjadi minyak pirolisis memberikan nilai tambah energi. Sistem ini cocok dikembangkan sebagai prototipe pendidikan, penelitian terapan, maupun skala UMKM.

2.4.6 Analisis Waktu Pemanasan

Berdasarkan hasil pengujian sistem, waktu yang dibutuhkan untuk mencapai temperatur operasi 400°C berkisar antara 45–60 menit tergantung kestabilan pembakaran dan suplai udara blower. Pada tahap awal, kenaikan temperatur berlangsung lambat karena energi masih digunakan untuk memanaskan dinding reaktor dan material plastik. Setelah plastik mulai mencair, perpindahan panas secara konveksi menjadi lebih dominan sehingga distribusi temperatur lebih merata dan laju pemanasan meningkat.

2.4.7 Analisis Perpindahan Panas

Perpindahan panas dalam reaktor terjadi melalui kombinasi konduksi, konveksi, dan radiasi panas dari tungku. Konduksi berlangsung melalui dinding SS304 menuju bahan plastik, sedangkan

konveksi terjadi setelah plastik mengalami fase cair. Selain itu, gas hasil pirolisis membantu pencampuran temperatur di dalam reaktor sehingga proses dekomposisi berlangsung lebih merata.

2.4.8 Efisiensi Sistem Pemanas

Efisiensi sistem pemanas dipengaruhi oleh kualitas atomisasi oli bekas, suplai udara blower, dan desain ruang bakar. Hasil pengamatan menunjukkan bahwa penggunaan blower dengan kecepatan menengah menghasilkan nyala api paling stabil dan temperatur tertinggi. Kehilangan panas terbesar terjadi pada bagian dinding luar reaktor yang belum menggunakan isolasi termal tambahan.

2.4.9 Pembahasan Produk Pirolisis

Produk hasil pirolisis terdiri dari minyak pirolisis, gas non-kondensabel, dan residu karbon (char). Fraksi cair menjadi produk dominan dengan persentase rata-rata 58–62%. Minyak pirolisis memiliki potensi sebagai bahan bakar alternatif karena nilai kalor yang cukup tinggi, sedangkan char dapat dimanfaatkan sebagai bahan bakar padat tambahan.

2.4.10 Potensi Pengembangan Sistem

Sistem reaktor pirolisis berbasis kompor oli bekas memiliki potensi dikembangkan pada skala UMKM dan pendidikan. Dengan penambahan kontrol suhu otomatis, sistem kondensor yang lebih optimal, dan isolasi termal, efisiensi proses diperkirakan dapat meningkat secara signifikan. Selain itu, sistem ini dapat mendukung konsep waste to energy dalam pengolahan limbah plastik dan limbah oli bekas.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa teknologi pirolisis berbasis pemanas kompor oli bekas memiliki potensi besar sebagai solusi pengolahan limbah terpadu yang ekonomis, aplikatif, dan mudah diterapkan pada skala laboratorium maupun industri kecil.

2.4.11 Analisis Distribusi Temperatur

Distribusi temperatur pada reaktor menunjukkan bahwa bagian dasar reaktor memiliki temperatur paling tinggi karena kontak langsung dengan nyala api burner. Bagian tengah reaktor mengalami distribusi temperatur lebih stabil akibat konveksi internal material cair dan gas pirolisis. Sementara itu, bagian atas memiliki temperatur lebih rendah karena terjadi pelepasan panas menuju sistem kondensor.

2.4.12 Analisis Kehilangan Panas

Kehilangan panas pada sistem terjadi melalui dinding reaktor, sambungan pipa, dan pelepasan panas ke lingkungan sekitar. Kehilangan panas ini mempengaruhi efisiensi keseluruhan sistem sehingga diperlukan penambahan isolasi termal untuk meningkatkan performa pemanasan.

2.4.13 Analisis Keamanan Operasi

Keamanan operasi menjadi aspek penting dalam sistem pirolisis karena proses berlangsung pada temperatur tinggi dan menghasilkan gas mudah terbakar. Reaktor dilengkapi sambungan las penuh dan penutup rapat untuk mencegah kebocoran gas. Selain itu, operator diwajibkan menggunakan alat pelindung diri selama proses pengujian.

2.4.14 Analisis Lingkungan

Teknologi pirolisis memberikan dampak positif terhadap lingkungan karena mampu mengurangi volume limbah plastik dan memanfaatkan limbah oli bekas sebagai sumber energi. Dengan demikian, sistem ini mendukung pengurangan pencemaran lingkungan serta pengembangan teknologi energi alternatif berbasis limbah.

2.4.15 Analisis Ekonomi Sederhana

Penggunaan oli bekas sebagai bahan bakar memberikan keuntungan ekonomis karena biaya operasional sistem menjadi lebih rendah dibandingkan penggunaan LPG atau solar. Selain itu, hasil minyak pirolisis memiliki potensi nilai jual sehingga dapat memberikan nilai tambah pada proses pengolahan limbah.

2.4.16 Evaluasi Sistem Kondensor

Sistem kondensor berfungsi mengubah gas pirolisis menjadi minyak cair melalui proses pendinginan. Efektivitas kondensor sangat dipengaruhi oleh luas permukaan pendinginan dan laju aliran air. Semakin baik proses pendinginan, maka semakin besar fraksi cair yang dapat diperoleh.

2.4.17 Potensi Implementasi Industri

Sistem reaktor pirolisis skala laboratorium ini dapat dikembangkan menjadi sistem skala industri kecil dengan kapasitas lebih besar. Pengembangan lebih lanjut dapat dilakukan melalui otomatisasi kontrol suhu, peningkatan kapasitas burner, dan optimasi sistem perpindahan panas.

2.4.18 Analisis Efektivitas Burner

Burner berbahan bakar oli bekas menunjukkan kemampuan menghasilkan nyala api stabil pada kondisi suplai udara optimal. Efektivitas burner dipengaruhi oleh ukuran nozzle, debit bahan bakar, dan tekanan udara dari blower. Kombinasi parameter yang tepat mampu meningkatkan efisiensi pembakaran dan mempercepat pemanasan reaktor.

2.4.19 Analisis Yield Minyak Pirolisis

Yield minyak pirolisis yang dihasilkan dipengaruhi oleh temperatur operasi, jenis plastik, dan laju pemanasan. Pada temperatur optimum, proses depolimerisasi menghasilkan fraksi cair lebih tinggi dibandingkan residu padat dan gas.

2.4.20 Analisis Gas Non-Kondensabel

Gas non-kondensabel hasil pirolisis terdiri dari senyawa hidrokarbon ringan yang memiliki potensi sebagai bahan bakar tambahan. Pemanfaatan gas ini dapat meningkatkan efisiensi energi sistem apabila dilakukan sirkulasi kembali menuju burner.

2.4.21 Analisis Residu Padat (Char)

Residu padat atau char merupakan hasil samping proses pirolisis yang masih memiliki nilai kalor cukup tinggi. Char dapat dimanfaatkan sebagai

bahan bakar padat atau bahan baku karbon aktif setelah melalui proses aktivasi lanjutan.

2.4.22 Evaluasi Kinerja Sistem Keseluruhan

Secara keseluruhan sistem reaktor pirolisis menunjukkan performa yang baik pada skala laboratorium. Distribusi panas relatif merata, pembakaran stabil, dan struktur reaktor mampu bertahan pada temperatur operasi tinggi tanpa mengalami deformasi.

2.4.23 Potensi Pengembangan Penelitian

Penelitian selanjutnya dapat difokuskan pada optimasi sistem kondensor, pengembangan kontrol otomatis berbasis sensor suhu, serta analisis karakteristik produk pirolisis menggunakan pengujian laboratorium yang lebih detail seperti GC-MS.

2.5 HASIL PENELITIAN

Analisis statistik menunjukkan bahwa variasi suhu reaktor memiliki pengaruh signifikan terhadap distribusi produk, khususnya yield fraksi cair (Y_oil). Hasil uji ANOVA satu arah menunjukkan nilai $p < 0,05$, yang menandakan adanya perbedaan nyata antar kondisi suhu yang diuji. Uji lanjutan Tukey HSD mengonfirmasi bahwa perbedaan paling signifikan terjadi antara operasi pada 400 °C dan 500 °C, di mana peningkatan suhu mendorong depolimerisasi rantai polimer menjadi molekul rantai pendek yang lebih volatil. Hasil ini sejalan dengan temuan Henneberg et al. (2023) yang melaporkan bahwa pengaturan suhu reaktor merupakan variabel dominan dalam optimasi yield minyak pirolitik.

Neraca massa menunjukkan distribusi rata-rata sebesar 58–62% fraksi cair, 20–25% fraksi padat (char), dan 15–18% fraksi gas, dengan kehilangan massa <3%. Ketelitian neraca massa ini menegaskan kestabilan sistem dan minimnya volatil yang tidak terperangkap. Namun, karakterisasi gas non-kondensabel masih terbatas, sehingga disarankan pengujian lanjutan menggunakan GC-TCD/FID untuk mengidentifikasi komponen seperti H_2, CH_4, dan CO yang berperan dalam efisiensi energi proses, sebagaimana dilaporkan Zhao et al. (2024).

Karakterisasi char menunjukkan kandungan karbon tetap yang tinggi (>70%) dengan sisa mineral <10%, menjadikannya kandidat potensial sebagai adsorben atau bahan bakar padat tambahan. Hasil ini konsisten dengan literatur terbaru yang menekankan nilai ekonomi char sebagai produk samping, terutama ketika diproses menjadi biochar dengan luas permukaan yang lebih besar melalui aktivasi termal atau kimia.

Kualitas minyak pirolitik menunjukkan nilai kalor mendekati 40 MJ/kg, dengan densitas berkisar 0,8–0,9 g/mL. Namun, kandungan senyawa aromatik dan oksigen yang tinggi mengindikasikan perlunya proses upgrading seperti hidrofining agar sesuai dengan standar bahan bakar komersial (ASTM D4814 untuk bensin dan ASTM D975 untuk solar), sebagaimana dilaporkan oleh Pumpuang et al. (2024). Dengan demikian, meskipun potensi minyak pirolitik sebagai alternatif bahan bakar cair sangat menjanjikan, tahap pasca-proses tetap menjadi kebutuhan penting untuk memastikan kompatibilitas dan keamanan penggunaannya pada skala industri.

2.6 KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan

Reaktor pirolisis kapasitas 5 kg berhasil dirancang menggunakan material SS304 dengan dimensi optimal untuk skala laboratorium.

Total kebutuhan energi sistem sebesar ±8.115 kJ.

Kompor oli bekas mampu menyediakan panas efektif hingga 8,5 kW dengan efisiensi maksimum 85%.

Analisis struktural menunjukkan desain aman dengan faktor keamanan 34,9.

Sistem layak diterapkan sebagai solusi ekonomis untuk konversi limbah plastik dan pemanfaatan oli bekas.

Saran

Penambahan sistem kontrol suhu otomatis untuk kestabilan proses.

Optimalisasi desain kondensor guna meningkatkan hasil minyak.

Pengujian berbagai jenis plastik untuk evaluasi performa lebih luas.

Analisis ekonomi lanjutan untuk skala industri kecil.

DAFTAR PUSTAKA

[1] R. Geyer, J. R. Jambeck, dan K. L. Law, “Production, use, and fate of all plastics ever made,” *Sci. Adv.*, vol. 3, no. 7, pp. 1–5, 2017.

[2] J. Hopewell, R. Dvorak, dan E. Kosior, “Plastics recycling: Challenges and opportunities,” *Philos. Trans. R. Soc. B Biol. Sci.*, vol. 364, no. 1526, pp. 2115–2126, 2009.

[3] D. Mohan, C. U. Pittman Jr., dan P. H. Steele, “Pyrolysis of wood/biomass for bio-oil: A critical review,” *Energy Fuels*, vol. 20, no. 3, pp. 848–889, 2006.

[4] S. M. Al-Salem, P. Lettieri, dan J. Baeyens, “Recycling and recovery routes of plastic solid waste (PSW): A review,” *Waste Manag.*, vol. 29, no. 10, pp. 2625–2643, 2017.

[5] S. D. A. Sharuddin, F. Abnisa, W. M. A. Wan Daud, dan M. K. Aroua, “A review on pyrolysis of plastic wastes,” *Energy Convers. Manage.*, vol. 115, pp. 308–326, 2016.

[6] A. V. Bridgwater, “Review of fast pyrolysis of biomass and product upgrading,” *Biomass Bioenergy*, vol. 38, pp. 68–94, 2012.

[7] P. Basu, *Biomass Gasification, Pyrolysis and Torrefaction: Practical Design and Theory*, 3rd ed. Oxford, U.K.: Academic Press, 2018.
[8] J. R. Davis, *Stainless Steels*. Materials Park, OH, USA: ASM International, 2001.