

PENGOLAHAN SAMPAH PLASTIK MENJADI BAHAN BAKAR CAIR DENGAN METODE PIROLISIS DI TPS3R-UIKA BOGOR

Sahrul Sidik¹, Budi Susetyo², Rosmawaty Anwar³

^{1,2,3}Universitas Ibn Khaldun Bogor

Email: sahruls.ling@gmail.com

Abstrak: Akumulasi sampah plastik global menuntut solusi inovatif yang tidak hanya mampu mengurangi timbunan limbah, tetapi juga menghasilkan nilai tambah secara ekonomis. Teknologi pirolisis menjadi salah satu pendekatan strategis dalam mengonversi sampah plastik menjadi bahan bakar cair. Teknologi pirolisis terbukti berpotensi sebagai solusi waste-to-energy yang berkelanjutan dan mendukung konsep ekonomi sirkular. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi kinerja dua tipe reaktor pirolisis, yaitu pirolisis cepat (fast pyrolysis) dan pirolisis lambat (slow pyrolysis), dalam mengolah plastik LDPE dan HDPE, serta menentukan model reaktor yang paling sesuai untuk diterapkan di Tempat Pengolahan Sampah Reduce, Reuse, Recycle (TPS3R). Metode eksperimental kuantitatif digunakan dengan mengamati bahan volumen baku, parameter suhu operasi, waktu proses, massa dan volume minyak pirolisis, serta nilai yield. Hasil penelitian menunjukkan bahwa reaktor pirolisis cepat dengan kapasitas 9,1 kg LDPE pada suhu 400 °C selama 45 menit menghasilkan minyak pirolisis sebesar 4,83 kg (hanya 53,08%). Sementara itu, reaktor pirolisis lambat yang mengolah 5,2 kg HDPE pada suhu 350°C selama 206 menit menghasilkan minyak sebesar 2,35 kg (45,19%). Temuan ini menegaskan bahwa suhu operasi berperan krusial dalam proses degradasi termal polimer dan pembentukan fraksi cair. Pirolisis cepat unggul dalam kapasitas dan kecepatan proses meskipun perlu penyempurnaan agar perolehan minyak lebih banyak melalui pengaturan suhu yang lebih optimal, sedangkan pirolisis lambat menunjukkan efisiensi konversi yang lebih tinggi meskipun kapasitas tampung bahan bakunya relatif rendah dan waktunya lebih lama. Untuk skala komunal, direkomendasikan integrasi keunggulan kedua sistem setelah dilakukan penyempurnaan dan optimalisasi kinerjanya pada pengoperasian suhu optimal 300 - 450 °C agar perolehan minyak maksimal.

Kata Kunci: Bahan Bakar Cair, Pirolisis, Sampah Plastik, TPS3R, Waste-To-Energy.

Abstract: The global accumulation of plastic waste demands innovative solutions that not only reduce environmental burdens but also generate economic value. Pyrolysis technology offers a strategic approach for converting plastic waste into liquid fuel and has demonstrated strong potential as a sustainable waste-to-energy solution supporting the circular economy. This study evaluates the performance of two pyrolysis reactor types fast pyrolysis and slow pyrolysis in processing LDPE and HDPE plastics, and identifies the most suitable reactor configuration for application at community-based Reduce, Reuse, Recycle (TPS3R) facilities. A quantitative experimental method was employed by analyzing feedstock volume, operating temperature, processing time, pyrolysis oil mass and volume, and yield. The results show that the fast

pyrolysis reactor processed 9,1 kg of LDPE at 400 °C for 45 minutes, producing 4.83 kg of pyrolysis oil with a yield of 53,08%. In contrast, the slow pyrolysis reactor processed 5.2 kg of HDPE at 350 °C for 206 minutes, yielding 2,35 kg of oil with a significantly higher yield of 45,25%. These findings confirm that operating temperature plays a critical role in polymer thermal degradation and liquid fraction formation. Fast pyrolysis excels in processing capacity and speed but requires further optimization to improve oil yield, while slow pyrolysis achieves higher conversion efficiency despite lower throughput and longer processing time. For communal scale applications, an integrated system combining the strengths of both reactors, optimized at operating temperatures of 300 - 450 °C, is recommended to maximize oil production.

Keywords: *Plastic Waste, Pyrolysis, Liquid Fuel, Fast Pyrolysis, Slow Pyrolysis.*

PENDAHULUAN

Penumpukan sampah plastik merupakan tantangan lingkungan global yang serius, mendorong pencarian solusi yang transformatif dan kreatif. Sifat unik plastik, seperti bobot ringan, kekuatan, ketahanan korosi, dan efektivitas biaya, telah meluas penggunaannya. Namun, ketidakmampuannya terurai secara alami berujung pada akumulasi masif di lingkungan. Konsekuensi negatifnya membahayakan ekosistem dan kesehatan manusia secara luas. Dalam konteks global, peningkatan volume produksi plastik tidak diimbangi oleh sistem manajemen limbah yang memadai. Akibatnya, mayoritas limbah plastik berakhir di tempat pembuangan akhir (TPA), mencemari badan air, atau terakumulasi di lingkungan terbuka (Roychand et al., 2025; Yaqoob, 2025).

Peningkatan jumlah sampah plastik sangat erat kaitannya dengan laju pertumbuhan populasi, perubahan pola konsumsi masyarakat, dan meluasnya penggunaan produk-produk kemasan. Di Indonesia, isu pengelolaan sampah plastik tetap menjadi tantangan substantif dalam upaya pelestarian lingkungan. Data yang dihimpun oleh Sistem Informasi Pengelolaan Sampah Nasional (SIPSN) dari Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan mengindikasikan bahwa total timbulan sampah nasional mencapai sekitar 31,46 juta ton setiap tahunnya. Dari jumlah tersebut, sampah plastik merupakan komponen yang signifikan, mencapai 20,57% dari total volume. Dengan demikian, diperkirakan setiap tahunnya Indonesia menghasilkan kurang lebih 6,27 juta ton sampah plastik. Namun, ironisnya, hanya sebagian kecil dari volume sampah plastik tersebut yang berhasil dikelola secara efektif melalui mekanisme daur ulang.

Dua tipe polimer plastik yang paling sering ditemui dalam aktivitas keseharian adalah LDPE (*Low Density Polyethylene*) dan HDPE (*High Density Polyethylene*). LDPE umumnya digunakan dalam aplikasi seperti kantong belanja, film kemasan, dan berbagai macam wadah yang fleksibel. Sementara itu, HDPE lebih banyak diaplikasikan untuk pembuatan botol detergen, sistem perpipaan, dan wadah kaku lainnya (Peacock, 2000). Kedua jenis plastik ini memiliki karakteristik molekuler berupa rantai karbon hidrokarbon yang panjang, yang membuatnya sulit untuk diuraikan oleh organisme biologis. Meskipun demikian, struktur tersebut memberikan potensi besar untuk dikonversi menjadi energi melalui proses dekomposisi termal yang dikenal sebagai pirolisis.

Metode konvensional untuk mengelola sampah plastik, yaitu melalui penimbunan di TPA, menghadapi sejumlah keterbatasan signifikan. Keterbatasan ini mencakup kebutuhan akan lahan yang ekstensif dan potensi timbulnya kontaminasi terhadap tanah serta sumber air tanah. Di sisi lain, daur ulang mekanis hanya dapat diterapkan secara efisien pada jenis plastik yang bersih dan telah terpilah dengan baik. Banyak jenis sampah plastik pascakonsumsi yang sulit untuk didaur ulang secara mekanis akibat kontaminasi dengan material lain. Situasi ini menuntut eksplorasi terhadap teknologi pengolahan alternatif yang lebih efisien dan mampu mengatasi tantangan tersebut (Shareefdeen, 2024).

Salah satu pendekatan teknologi yang terus dikembangkan sebagai alternatif untuk mengolah sampah plastik adalah melalui proses pirolisis. Pirolisis, sebagai metode dekomposisi termal dalam kondisi tanpa oksigen (anaerobik), terbukti efektif dalam mengolah sampah plastik. Proses ini memecah senyawa organik kompleks pada suhu tinggi (umumnya antara 300–900 °C) untuk menghasilkan minyak pirolisis (fase cair), gas sintesis, dan residu padat berupa arang (char). Fenomena ini selaras dengan temuan (Abnisa et al., 2013; Al-salem et al., 2017) yang juga mengidentifikasi fraksi-fraksi produk serupa. Minyak yang diperoleh dari pirolisis plastik memiliki kandungan energi yang tinggi, menjadikannya kandidat potensial sebagai bahan bakar alternatif atau bahan baku esensial dalam industri petrokimia (Abnisa et al., 2013). Konsep dasar pirolisis plastik beroperasi melalui mekanisme pemutusan rantai karbon (*cracking*) yang diinduksi oleh energi panas yang dialirkan ke dalam struktur polimer. Teknologi ini dianggap mampu tidak hanya mengurangi volume sampah plastik secara drastis, tetapi juga menghasilkan produk bernilai ekonomis tinggi berupa bahan bakar cair dan prekursor industri petrokimia. Berbagai studi sebelumnya telah menunjukkan potensi

besar teknologi pirolisis dalam mendukung prinsip ekonomi sirkular dan pengembangan sistem konversi sampah menjadi energi (*waste-to-energy*) (Shareefdeen, 2024).

Kajian-kajian terdahulu secara konsisten menunjukkan bahwa suhu operasi memegang peranan paling krusial dalam menentukan kuantitas dan karakteristik kualitas produk pirolisis. Pada rentang suhu 300 - 500 °C, polimer plastik mengalami dekomposisi yang paling signifikan, menghasilkan dominasi produk cair (minyak). Selain itu, durasi waktu yang dialami bahan di dalam reaktor (waktu tinggal) juga turut memengaruhi tingkat konversi dan proporsi produk yang dihasilkan. Oleh karena itu, pemahaman mendalam mengenai interrelasi antara suhu, waktu, dan keluaran produk menjadi faktor penentu utama keberhasilan operasional reaktor pirolisis.

Kinerja optimal dari proses pirolisis sangat dipengaruhi oleh faktor desain reaktor dan kondisi operasional yang diterapkan. Parameter-parameter kunci yang mendeterminasi efisiensi proses mencakup laju pemanasan (*heating rate*), periode waktu material dan uap pirolisis berada di dalam reaktor (*residence time*), serta temperatur operasional. Berdasarkan klasifikasi parameter-parameter tersebut, teknologi pirolisis secara garis besar dapat dibedakan menjadi dua kategori: pirolisis cepat (*fast pyrolysis*) dan pirolisis lambat (*slow pyrolysis*) (Wojciech, 2024; Yaashikaa et al., 2020). Perbedaan dalam karakteristik operasional antara kedua tipe ini berpotensi menghasilkan distribusi produk dan efisiensi pengolahan yang berbeda. Telah terbukti bahwa suhu, waktu tinggal, serta tipe reaktor merupakan faktor-faktor yang sangat menentukan perolehan minyak, gas, dan arang selama proses pirolisis berlangsung (Yaqoob, 2025).

Penelitian yang secara komparatif membandingkan efektivitas mesin pirolisis cepat (*fast pyrolysis*) dan mesin pirolisis lambat (*slow pyrolysis*) pada skala komunal masih tergolong minim. Keterbatasan ini terasa lebih signifikan, terutama dalam konteks implementasi pada sistem pengelolaan sampah yang berbasis TPS3R dan kawasan yang didedikasikan untuk edukasi lingkungan. Oleh karena itu, penelitian ini diinisiasi dengan tujuan untuk menganalisis secara rinci karakteristik operasional, volume produksi bahan bakar cair, nilai yield produk berupa minyak, tingkat efisiensi pengolahan, serta potensi aplikasi kedua jenis mesin pirolisis tersebut dalam mendukung upaya pengurangan volume sampah plastik dan pencegahan degradasi lingkungan.

Menimbang berbagai latar belakang yang telah diuraikan di atas, penelitian ini bertujuan untuk mencari model reaktor pirolisis yang sesuai untuk diterapkan pada TPS 3R sehingga

dapat mendukung pengelolaan sampah plastik secara efektif dan berkelanjutan. Penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi ilmiah yang berarti dalam bidang pengelolaan sampah plastik dan teknologi lingkungan.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini merupakan penelitian eksperimental komparatif (*comparative experimental research*) yang bertujuan membandingkan kinerja dua *prototype* reaktor pirolisis dalam mengolah sampah plastik. Pendekatan yang digunakan adalah kuantitatif dengan analisis data pengukuran massa produk, suhu operasi, dan waktu proses. Data dianalisis secara deskriptif komparatif.

A. Lokasi dan Waktu Penelitian

Penelitian dilakukan di TPS 3R Universitas Ibn Khaldun Bogor pada bulan Mei-Juni 2026.

B. Alat dan Bahan

- Alat:
 - Reaktor pirolisis kapasitas 25 kg (Reaktor 1) dan 5,2 kg (Reaktor 2) beserta perlengkapannya.
 - Termometer/thermocouple untuk pengukuran suhu.
 - Stopwatch/timer.
 - Wadah penampung minyak.
 - Timbangan analitik kapasitas 50 kg.
 - Ember dan wadah es batu (sistem pendingin Reaktor 1).
- Bahan:
 - Bahan baku plastik LDPE (kantong plastik/kresek/asoy) untuk Reaktor 1.
 - Bahan baku plastik HDPE (botol, wadah rigid) untuk Reaktor 2.
 - Solar/diesel (bahan bakar Reaktor 1): 3 liter per uji coba.
 - Gas LPG 3 kg (bahan bakar Reaktor 2).
 - Es batu 5 balok (pendingin Reaktor 1).
 - Air (pendingin Reaktor 2).

C. Prosedur Penelitian**a.) Prosedur Uji Reaktor 1 (*Fast Pyrolysis*)**

1. Persiapan bahan baku: Plastik LDPE ditimbang sebanyak 9,1 kg dan dimasukkan ke dalam reaktor.
2. Persiapan sistem pendingin: 5 balok es batu disiapkan dalam wadah pendingin yang terhubung dengan saluran kondensasi.
3. Penyalaan: 3 liter solar disiapkan sebagai bahan bakar. Proses pemanasan dimulai.
4. Pencatatan data: Suhu dan waktu dicatat setiap interval tertentu hingga mencapai 400°C.
5. Pengumpulan produk: Minyak yang menetes dari kondensor dikumpulkan dan ditimbang.
6. Penghentian proses: Setelah 45 menit operasi pada suhu 400°C, proses dihentikan dan produk akhir ditimbang.

b.) Prosedur Uji Reaktor 2 (*Slow Pyrolysis*)

1. Persiapan bahan baku: Plastik HDPE ditimbang seberat 5,2 kg per uji coba.
2. Reaktor dioperasikan pada tiga variasi suhu: 250°C, 300°C, dan 350°C.
3. Bahan bakar gas LPG 3 kg digunakan untuk pemanasan. Gas hasil pirolisis disalurkan kembali ke sistem pembakaran (recirculation).
4. Setiap variasi suhu dilakukan tiga kali pengulangan (replikasi) untuk memperoleh data yang representatif.
5. Sistem pendingin menggunakan air mengalir melalui kondensor.
6. Minyak yang dihasilkan pada setiap percobaan dikumpulkan dan ditimbang. Proses berlangsung selama 206 menit.

D. Parameter yang Diamati

Parameter yang diamati meliputi: bahan baku (kg), massa minyak (kg) yang dihasilkan per uji coba, yield minyak (%), laju kenaikan suhu (°C/menit), konsumsi bahan bakar pemanas (solar/LPG), dan neraca energi (energi input vs energi produk).

E. Teknik Analisis Data

Proses degradasi plastik dengan teknik *Polymer Thermal Degradation* dirumuskan sebagai berikut:



Analisis kinerja reaktor pirolisis hanya difokuskan pada hasil bahan bakar cair saja, sedangkan gas dan arang belum diperhitungkan. Data dianalisis menggunakan statistik deskriptif (nilai rata-rata, standar deviasi, koefisien variasi) untuk menilai konsistensi data Reaktor 2. Perbandingan kinerja kedua reaktor dilakukan secara kuantitatif berdasarkan yield minyak, efisiensi energi, dan kapasitas produksi. Analisis neraca energi dilakukan untuk mengevaluasi kebutuhan energi proses dan energi yang terkandung dalam minyak pirolisis yang dihasilkan (Shareefdeen, 2024; Yaqoob, 2025). formula menggunakan Persamaan energi panas sebagai berikut:

$$Q = m . c . \Delta T$$

Di mana:

Q = Energi panas yang dibutuhkan (kj

M = Massa Bahan yang dipanaskan (kg)

C = Kalor jenis bahan (kj/kg°C)

ΔT = Perubahan suhu (°C)

Perubahan suhu dihitung menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$\Delta T = T_2 - T_1$$

Di mana:

T_2 = Suhu akhir proses pirolisis (°C)

T_1 = Suhu awal bahan baku (°C)

Energi yang terkandung dalam minyak pirolisis dihitung menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$E_o = m_o \times HHV$$

Di mana:

E_o = Energi minyak pirolisis (MJ)

m_o = Massa minyak pirolisis yang dihasilkan (kg)

HHV = Nilai kalor minyak pirolisis (*Higher Heating Value*)

Selanjutnya, efisiensi pemanfaatan energi dievaluasi menggunakan rasio pengembalian energi (*Energy Return Ration/ERR*) formula ditujukan pada persamaan sebagai berikut:

$$ERR = \frac{E_o}{Q_{total}}$$

Di mana:

ERR = *Energy Return Ration*

E_o = Energi yang terkandung dalam minyak pirolisis (MJ)

Q_{total} = Total energi yang digunakan selama proses pirolisis

Nilai ERR yang besar dari 1 menunjukkan bahwa energi yang dihasilkan dari minyak pirolisis lebih besar dibandingkan energi yang digunakan selama proses pirolisis, sehingga proses tersebut layak secara energetik.

HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Karakteristik Bahan Baku Plastik

Bahan baku yang digunakan dalam penelitian ini adalah plastik LDPE dan HDPE yang diperoleh dari pengumpulan sampah plastik di TPS 3R. Plastik LDPE yang digunakan berupa kantong plastik / plastik kresek / plastik asoy, sedangkan plastik HDPE berupa tutup botol. Sebelum dimasukkan ke reaktor, plastik dicacah menjadi potongan kecil berukuran 2 cm untuk memperluas area kontak dan mempercepat transfer panas. Adapun karakteristik plastik LDPE dan HDPE disajikan pada tabel 1.

Tabel 1 Karakteristik Fisikokimia Bahan Baku Plastik

Parameter	LDPE	HDPE	Satuan
Densitas	0,910 - 0,940	0,941 - 0,965	g/cm ³
Titik leleh	105 - 115	130 - 140	°C
Nilai kalor (LHV)	44 - 46	46 - 48	MJ/kg
Kadar Karbon (C)	85,7	85,6	%
Kadar Hidrogen (H)	14,3	14,4	%
Berat molekul	50.000 - 300.000	200.000 - 500.000	g/mol

Parameter	LDPE	HDPE	Satuan
Kristalinitas	40 - 60	70 - 80	%

Sumber: Diadaptasi dari (Peacock, 2000) dan (Brydson, 2017)

Berdasarkan Tabel 1 menunjukkan penyajian karakteristik fisikokimia LDPE dan HDPE, menunjukkan bahwa HDPE memiliki nilai kalor dan titik leleh yang lebih tinggi, yang berpengaruh pada kebutuhan energi dan distribusi produk pirolisis.

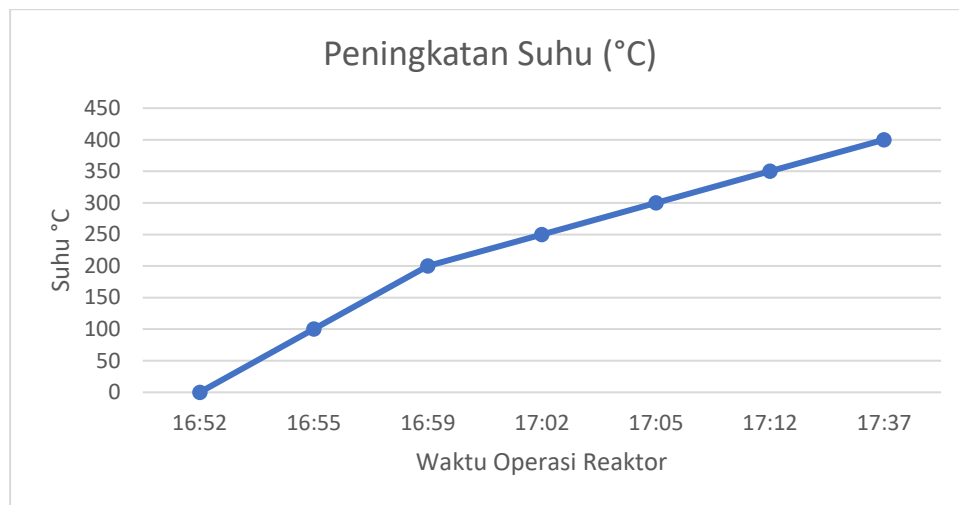
1. Kinerja Reaktor Pirolisis 1 (*Fast Pyrolysis*)

Reaktor 1, dikategorikan sebagai reaktor pirolisis cepat, beroperasi dengan 9,1 kg plastik LDPE, menggunakan 3 liter solar sebagai bahan bakar, dan sistem pendingin es batu. Kinerja reaktor disajikan pada tabel 2.

Tabel 2. Data Kinerja Reaktor 1 (Fast Pyrolysis)

No.	Parameter	Nilai/Keterangan
1	Kapasitas Bahan Baku	9,1 kg (LDPE)
2	Bahan Bakar Pemanas	3 Liter Solar
3	Suhu Operasi Optimal	400°C
4	Waktu Operasi	45 menit
5	Massa Minyak Dihasilkan	4,83 kg
6	Yield Minyak	53,08%

Data pada Tabel 2 menunjukkan masa volume bahan baku 9,1 kg dengan jenis plastik LDPE melalui bahan bakar pemanas dengan solar 3 liter pada suhu kenaikan temperatur yang bertahap hingga mencapai 400°C dalam 45 menit menghasilkan masa minyak 4,83 kg dengan yield minyak 53,08%. Fase pemanasan awal (0-100°C) berlangsung cepat (33,3°C/menit), diikuti penurunan laju karena energi digunakan untuk pelelehan dan dekomposisi awal. Pada rentang 300-400°C, degradasi termal lebih intensif, dengan laju kenaikan suhu melambat (4,0°C/menit pada 350-400°C). Produksi minyak dimulai pada ~350°C dan optimal pada 400°C, menghasilkan 4,83 kg minyak dengan *yield* 53,08%. Rentang 350-400°C efektif untuk konversi LDPE menjadi bahan bakar cair. Laju kenaikan suhu disajikan pada Gambar 1.



Gambar 1. Grafik Kenaikan Suhu Reaktor 1 terhadap Waktu Operasi

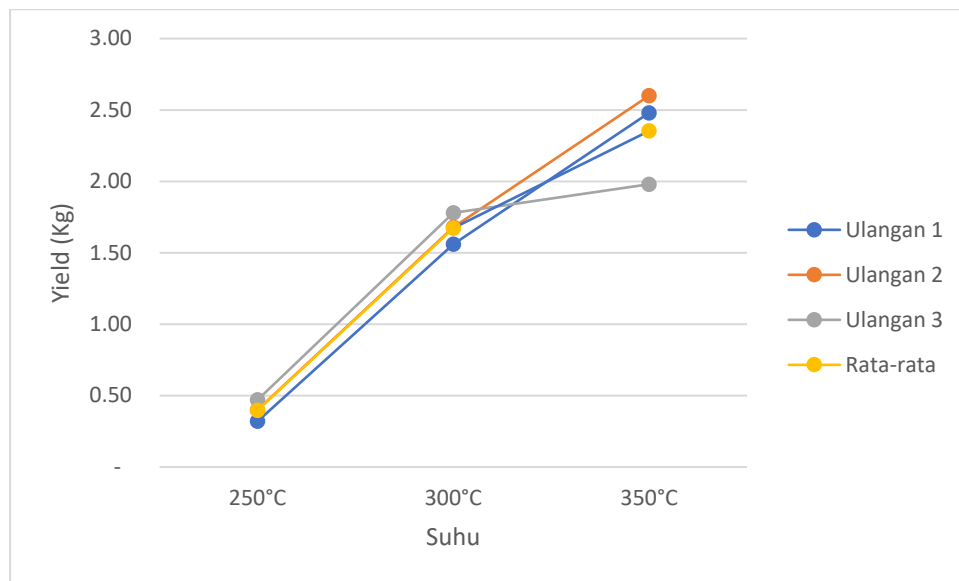
2. Kinerja Reaktor Pirolisis 2 (*Slow Pyrolysis*)

Reaktor 2, dikategorikan sebagai reaktor pirolisis lambat, beroperasi dengan 5,2 kg plastik HDPE menggunakan LPG sebagai bahan bakar. Pengukuran saat uji coba dilakukan pada suhu 250°C, 300°C, dan 350°C dengan tiga replikasi. Data hasil produksi minyak disajikan pada Tabel 3.

Tabel 3. Hasil Produksi Minyak Reaktor Pirolisis

Suhu	Hasil Minyak (Kg)			
	Ulangan 1	Ulangan 2	Ulangan 3	Rata-rata
250°C	0,32	0,40	0,47	0,40
300°C	1,56	1,68	1,78	1,67
350°C	2,48	2,60	1,98	2,35

Data pada Tabel 3 menunjukkan peningkatan yield minyak seiring kenaikan suhu. Yield tertinggi (45,19 %) diperoleh pada 350°C. laju kenaikan suhu pada pengaruh produksi minyak pirolisis dapat Gambar 2.



Gambar 2. Grafik Kenikan Hasil Minyak (Oil Yield) Pirolisis berdasarkan Suhu

Untuk mengetahui apakah perbedaan perlakuan suhu pembakaran memberikan pengaruh yang nyata terhadap hasil minyak pirolisis, dilakukan analisis ragam (ANOVA) satu faktor. Hasil analisis ragam disajikan pada Tabel 4.

Tabel 4. Tabel Analisis Ragam (ANOVA) Pengaruh Suhu Pembakaran terhadap Hasil Minyak Pirolisis

Sumber Keragaman (SK)	Derajat Bebas (DB)	Jumlah Kuadrat (JK)	Kuadrat Tengah (KT)	F Hitung	F Tabel 5%	F Tabel 1%
Perlakuan	2	5,93	2,96	71,11**	5,14	10,92
Galat	6	0,25	0,04	-	-	-
Total	8	6,18	-	-	-	-

Keterangan: ** = berbeda sangat nyata pada taraf uji 1%

Berdasarkan Tabel 4. menunjukkan bahwa suhu operasi berpengaruh sangat nyata terhadap hasil minyak pirolisis HDPE ($F_{hitung} = 71,11 > F_{tabel\ 1\%}$). Peningkatan suhu hingga rentang optimum meningkatkan intensitas *cracking termal*, menghasilkan lebih banyak fraksi cair. Data konsistensi (CV 6,6-14,0%) menunjukkan stabilitas operasi pada suhu 300°C lebih baik dibandingkan 350°C.

3. Pengaruh Suhu dan Waktu terhadap Produk

Analisis gabungan kedua reaktor merangkum pengaruh suhu:

- <100°C: Penguapan air bebas.
- 100–200°C: Pelelehan polimer, dekomposisi awal.
- 200–300°C: Degradasi rantai polimer dimulai, produk cair sedikit.
- 300–400°C: Produksi minyak masif (dominan cair).
- >400°C: Cracking sekunder, produksi gas meningkat.

Reaktor 1 (LDPE) menunjukkan suhu onset produksi minyak pada 350°C dan optimal pada 400°C, sedangkan Reaktor 2 (HDPE) menunjukkan efektivitas mulai pada 300-350°C. Perbedaan ini kemungkinan terkait dengan perbedaan jenis plastik (LDPE lebih mudah terdegradasi pada suhu lebih rendah).

4. Perbandingan Kinerja Kedua Reaktor dan Neraca Energi

Hasil Penelitian menunjukkan kinerja masing-masing Reaktor Pirolisis yang diuji sebagaimana disajikan pada Tabel 5.

Tabel 5. Perbandingan Kinerja 2 Reaktor Pirolisis

No.	Uraian	Reaktor 1 (LDPE)	Reaktor 2 (HDPE)
1	Bahan Baku (Kg)	9,1	5,2
2	Suhu Max	400	350
3	Suhu Awal	30	30
4	Kapasitas Panas (KJ/Kg.K)	2,3	2,1
5	Waktu Operasi (Jam)	0,75	3,32
6	Yield	4,83	2,35
7	Q (Energi u/ memanaskan)		
	dalam satuan KJ	7744,1	3494,4
	dalam satuan MJ	7,74	3,49
8	Q-Total (MJ)	12,91	5,82
9	Nilai kalor minyak pirolisis LDPE (MJ)	42	42
10	Energi Minyak Pirolisis (MJ)	202,86	98,70
11	Ratio Energy (Energy Return Ratio, ERR)	15,72	16,95

Berdasarkan tabel perhitungan neraca energi, kinerja pirolisis LDPE dan HDPE sama-sama menunjukkan hasil yang sangat positif, namun dengan karakteristik keunggulan yang berbeda. Pada LDPE, massa bahan baku yang diproses lebih besar (9,1 kg) dan suhu operasi lebih tinggi (400 °C), sehingga energi pemanasan (Q-total) juga lebih besar, yaitu 12,91 MJ. Yield minyak pirolisis LDPE mencapai 4,83 kg dengan energi minyak sebesar 202,86 MJ. Hal ini menghasilkan *Energy Return Ratio* (ERR) sebesar 15,72, yang menandakan bahwa energi yang dihasilkan jauh melebihi energi yang digunakan. LDPE unggul dalam produktivitas energi absolut, cocok untuk sistem yang menargetkan volume dan total energi keluaran yang besar.

Sebaliknya, HDPE beroperasi pada suhu maksimum yang lebih rendah (350 °C) dan dengan massa bahan baku lebih kecil (5,2 kg), sehingga kebutuhan energi pemanasan juga lebih rendah (Q-total 5,82 MJ). Meskipun yield minyak HDPE lebih kecil (2,35 kg) dan energi minyak 98,70 MJ, rasio pengembalian energi (ERR) justru lebih tinggi, yaitu 16,95. Ini menunjukkan bahwa pirolisis HDPE lebih efisien secara energi, karena menghasilkan energi relatif lebih besar dibandingkan energi yang dikonsumsi. Dengan demikian dapat dikatakan, pirolisis LDPE unggul dari sisi output energi total, sedangkan pirolisis HDPE lebih unggul dari sisi efisiensi energi. Keduanya layak secara teknis dan energetik, serta sangat prospektif untuk diterapkan pada skala TPS3R sebagai teknologi waste-to-energy yang berkelanjutan.

B. Implikasi untuk Pengembangan Teknologi

Hasil penelitian menunjukkan bahwa kedua tipe reaktor memiliki keunggulan yang berbeda dan dapat menjadi dasar dalam pengembangan teknologi pirolisis untuk pengelolaan sampah plastik pada skala komunal. Reaktor pirolisis cepat (fast pyrolysis) memiliki keunggulan dalam kapasitas pengolahan bahan baku yang lebih besar dan waktu proses yang lebih singkat, sehingga sesuai untuk diterapkan pada TPS3R yang menerima timbunan sampah plastik dalam jumlah besar. Sebaliknya, reaktor pirolisis lambat (slow pyrolysis) menunjukkan efisiensi energi yang lebih tinggi melalui penerapan sistem gas recirculation dan kontrol temperatur yang lebih stabil.

Berdasarkan hasil tersebut, pengembangan reaktor pirolisis skala komunal sebaiknya mengintegrasikan keunggulan kedua sistem, yaitu kapasitas reaktor yang lebih besar, penggunaan sistem kondensasi yang efektif, serta pemanfaatan kembali gas hasil pirolisis

sebagai sumber energi pemanas. Integrasi tersebut berpotensi meningkatkan efisiensi energi, menurunkan kebutuhan bahan bakar eksternal, dan meningkatkan perolehan produk cair.

Selain aspek teknis, penerapan teknologi pirolisis pada TPS3R juga berpotensi mendukung konsep ekonomi sirkular melalui pemanfaatan sampah plastik yang sebelumnya tidak memiliki nilai ekonomis menjadi produk bahan bakar cair yang bernilai guna. Dengan demikian, teknologi pirolisis dapat menjadi salah satu alternatif strategi pengelolaan sampah plastik yang berkelanjutan sekaligus mendukung program waste-to-energy pada tingkat masyarakat.

Selain itu, pengembangan reaktor pirolisis pada skala TPS3R perlu mempertimbangkan aspek efisiensi termal dan keberlanjutan energi sistem. Pemanfaatan gas non-kondensabel hasil pirolisis sebagai bahan bakar tambahan untuk proses pemanasan berpotensi menurunkan konsumsi bahan bakar eksternal dan meningkatkan efisiensi energi keseluruhan. Penerapan sistem pemulihan panas (heat recovery) dan pengendalian temperatur secara otomatis juga dapat meningkatkan kestabilan proses, kualitas produk minyak pirolisis, serta menekan biaya operasional dalam jangka panjang.

Model reaktor yang direkomendasikan untuk TPS3R adalah reaktor berkapasitas sedang hingga besar yang dilengkapi sistem recirculation gas dan kondensor berbasis pendingin air. Konfigurasi tersebut dinilai mampu mengakomodasi kebutuhan pengolahan sampah plastik pada skala komunal dengan mempertimbangkan aspek kapasitas, efisiensi energi, kemudahan operasi, dan keberlanjutan sistem.

KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian mengenai pengolahan sampah plastik menjadi bahan bakar cair dengan metode pirolisis menggunakan mesin pirolisis lambat dan mesin pirolisis cepat, maka dapat disimpulkan sebagai berikut:

1. Mesin pirolisis cepat (Reaktor 1) mampu mengolah sampah LDPE dengan kapasitas 9,1 kg per proses pada suhu 400°C selama 45 menit, menghasilkan minyak pirolisis sebanyak 4,83 kg dengan yield sebesar 53,08%.
2. Mesin pirolisis lambat (Reaktor 2) mampu mengolah sampah plastik HDPE dengan kapasitas 5,2 kg per proses. Peningkatan temperatur operasi dari 250°C hingga 350°C terbukti meningkatkan produksi minyak pirolisis. Hasil eksperimen menunjukkan yield

minyak tertinggi sebesar 45,19% pada suhu 350°C (rata-rata dari tiga replikasi). Angka yield yang lebih tinggi (61,4%) pada literatur lain seringkali dilaporkan sebagai potensi konversi teoritis atau hasil pada kondisi operasi yang berbeda, yang perlu dibandingkan secara hati-hati.

3. Temperatur operasi berpengaruh signifikan terhadap jumlah minyak pirolisis yang dihasilkan. Peningkatan temperatur hingga kondisi optimum mempercepat degradasi rantai polimer, sehingga meningkatkan yield minyak.
4. Perbandingan kedua mesin menunjukkan bahwa mesin pirolisis cepat memiliki kapasitas pengolahan lebih besar, sedangkan mesin pirolisis lambat memiliki yield minyak per kg bahan baku yang jauh lebih tinggi pada kondisi operasi yang diuji. Mesin pirolisis lambat juga menunjukkan keunggulan dalam pengendalian temperatur dan kestabilan proses (berdasarkan data replikasi).
5. Teknologi pirolisis berpotensi mengurangi timbunan sampah plastik dan menghasilkan bahan bakar cair bernilai guna, mendukung konsep *waste-to-energy* dan pengelolaan lingkungan yang berkelanjutan.
6. Kedua mesin pirolisis memiliki potensi penerapan pada skala komunal (TPS 3R, kawasan edukasi lingkungan), dengan pemilihan teknologi disesuaikan kapasitas dan kondisi operasional.

Saran

Berdasarkan hasil penelitian, beberapa saran yang dapat diberikan adalah sebagai berikut:

1. Perlu dilakukan penelitian lanjutan mengenai karakteristik kualitas minyak pirolisis yang dihasilkan, meliputi nilai kalor, densitas, viskositas, titik nyala (*flash point*), dan komposisi kimia menggunakan analisis laboratorium.
2. Kajian pengaruh variasi temperatur yang lebih luas, waktu tinggal (*residence time*), dan laju pemanasan terhadap distribusi produk pirolisis perlu dilakukan.
3. Analisis efisiensi energi secara lebih rinci, termasuk perhitungan energi input, energi output, dan efisiensi termal masing-masing mesin pirolisis, sangat disarankan.
4. Pengembangan sistem kondensasi yang lebih efektif dapat meningkatkan jumlah minyak pirolisis yang terkondensasi dan produktivitas proses.

5. Pemanfaatan gas hasil pirolisis sebagai sumber energi tambahan untuk pemanasan reaktor perlu dikembangkan guna meningkatkan efisiensi operasional.
6. Kajian ekonomi dan analisis kelayakan usaha perlu dilakukan untuk mengetahui potensi penerapan teknologi pirolisis pada skala masyarakat, TPS 3R, maupun industri kecil dan menengah.
7. Pengembangan teknologi pirolisis di TPS 3R Universitas Ibn Khaldun Bogor perlu terus dilakukan sebagai sarana edukasi lingkungan, penelitian, dan percontohan pengelolaan sampah plastik berbasis ekonomi sirkular.
8. Pemerintah daerah dan pengelola persampahan dapat mempertimbangkan pemanfaatan teknologi pirolisis sebagai alternatif pengelolaan sampah plastik yang berorientasi pada pengurangan limbah dan pemanfaatan energi terbarukan.

DAFTAR PUSTAKA

- Abnisa, F., Daud, W. M. A. W., & Sahu, J. N. (2013). *Pyrolysis of Mixtures of Palm Shell and Polystyrene : An Optional Method to Produce a High-Grade of Pyrolysis Oil*. 00(00), 1–8. <https://doi.org/10.1002/ep>
- Al-salem, S. M., Antelava, A., Constantinou, A., Manos, G., & Dutta, A. (2017). *A review on thermal and catalytic pyrolysis of plastic solid waste Tons per Annum*. 197(1408), 177–198.
- Brydson, T. J. A. (2017). *Dedication Brydson 's Plastics Materials*. Elsevier.
- Peacock, A. J. (2000). *Handbook of Polyethylene, Structures, Properties, and Application* (S. C. Donald E. Hudgin (Clemson University (Ed.); 1st ed.). Marcel Dekker, Inc. <https://books.google.co.id/books?id=OPuWyxwJwJwC&lpg=PP1&hl=id&pg=PP8#v=onepage&q&f=false>
- Roychand, R., Adeel, M., Mohan, Z., & Tuan, J. (2025). A Comprehensive Review on the Thermochemical Treatment of Plastic Waste to Produce High Value Products for Different Applications. In *Materials Circular Economy*. Springer Nature Singapore. <https://doi.org/10.1007/s42824-024-00157-2>
- Shareefdeen, Z. (2024). *applied sciences Management of Plastic Wastes through Recent Advanced Pyrolysis Processes*.
- Wojciech, J. (2024). Comprehensive Review of Biomass Pyrolysis : Conventional and. *MDPI: Energies*, 17. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/en17205082>

- Yaashikaa, P. R., Kumar, P. S., Varjani, S., & Saravanan, A. (2020). A critical review on the biochar production techniques , characterization , stability and applications for circular bioeconomy. *Biotechnology Reports*, 28, e00570. <https://doi.org/10.1016/j.btre.2020.e00570>
- Yaqoob, H. (2025). *Sustainability Pyrolysis of waste plastics for alternative fuel : a review of key factors*. 208–218. <https://doi.org/10.1039/d4su00504j>.