

Konversi Energi Limbah Plastik PET Menggunakan Katalis Zeolit Alam Menjadi Bahan Bakar Minyak
Energy Conversion of PET Plastic Waste Using Natural Zeolite Catalysts Into Fuel Oil

Maulana Nur Reza¹⁾, Mokh. Hairul Bahri²⁾, Asroful Abidin³⁾

¹Mahasiswa Prodi Teknik Mesin Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Jember
email: maulananurreza09@gmail.com

²Dosen Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Jember
email: mhairulbahri@unmuhjember.ac.id

³Dosen Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Jember
Email: asrofulabidin@unmuhjember.ac.id

Abstrak

Timbulan sampah plastik mengalami peningkatan yang drastis. Hal tersebut terjadi seiring meningkatnya jumlah penduduk. Sampah plastik umumnya dikubur dalam tanah atau dibakar di udara bebas, hal tersebut mengakibatkan degradasi unsur hara tanah dan polusi udara. Pada penelitian ini limbah plastik PET ditambah katalis zeolit alam dengan variasi (0%, 5%, 10%, 15%) akan melalui proses pirolisis dimana proses ini melibatkan pemanasan dengan adanya sedikit oksigen. Penambahan zeolit alam akan mempengaruhi terhadap hasil uji GCMS. Pertama, bahan baku plastik Polyethylene terephthalate murni seberat 3 kg membutuhkan waktu 235 menit dan berlangsung sampai menit ke 265 menit dengan suhu 450°C, dimana suhu tersebut minimal agar bahan bakar dapat menetes pada output alat incinerator. Kedua, bahan baku plastik PET - zeolit 5% seberat 2,8 kg membutuhkan waktu 225 menit dan berlangsung sampai menit ke 255 menit. ketiga, bahan baku plastik PET - zeolit 10% seberat 2,7 kg membutuhkan waktu 217 menit dan berlangsung sampai menit ke 247 menit. keempat, bahan baku plastik PET - zeolit 15% seberat 2,5 kg membutuhkan waktu 213 menit dan berlangsung sampai menit ke 243 menit. Semakin banyak penambahan katalis ZA pada proses pirolisis maka meningkat laju proses perolisisnya.

Keywords: GCMS, Pirolisis, Sampah Plastik PET, Zeolit Alam.

Abstract

The generation of plastic waste has increased drastically. This happens as the population increases. Plastic waste is generally buried in the ground or burned in the open air, this results in degradation of soil nutrients and air pollution. In this research, PET plastic waste plus natural zeolite catalyst with variations (0%, 5%, 10%, 15%) will go through a pyrolysis process where this process involves heating in the presence of a small amount of oxygen. The addition of natural zeolite will affect the GCMS test results. First, pure Polyethylene terephthalate plastic raw material weighing 3 kg takes 235 minutes and lasts up to 265 minutes at a temperature of 450°C, which is the minimum temperature so that the fuel can drip at the output of the incinerator. Second, PET plastic raw material - 5% zeolite weighing 2.8 kg takes 225 minutes and lasts until the 255th minute. third, PET plastic raw material - 10% zeolite weighing 2.7 kg took 217 minutes and lasted until the 247th minute. fourth, PET plastic raw material - 15% zeolite weighing 2.5 kg takes 213 minutes and lasts until the 243rd minute. The more ZA catalyst added to the pyrolysis process, the higher the rate of the perolysis process.

Keywords: GCMS, Pyrolysis, PET Plastic Waste, Natural Zeolite.

1. PENDAHULUAN

Permasalahan sampah di Indonesia merupakan permasalahan yang belum terselesaikan. Pada saat yang sama, jumlahnya juga semakin meningkat. Meningkatnya sampah disebabkan oleh aktivitas manusia. Sekitar 60-70% sampah yang dihasilkan manusia merupakan sampah organik, dan sisanya sekitar 30-40% sampah anorganik. Komponen sampah non-organik terbesar kedua sebesar 14% adalah sampah plastik (Purwaningrum, 2016).

Penumpukan sampah plastik tidak dapat diterima. Mengubur sampah plastik di bawah tanah bukanlah solusi yang baik, apalagi mengingat sampah plastik sulit terurai secara alami dan proses pembakarannya menghasilkan senyawa yang berbahaya bagi manusia. Ada beberapa cara untuk membuang sampah plastik selain menimbun atau membakar sampah plastik. Mengurangi jumlah penggunaan kantong plastik dengan menggantinya dengan bahan pengemas (kain) dan kain pembungkus, serta memperbaiki cara pembuangan sampah plastik (Nasution, 2015)

Proses pirolisis, sebagai metode daur ulang sampah plastik, melibatkan penggunaan perangkat yang dikenal sebagai insinerator. Keunggulan dari instalasi insinerasi yang diperbarui dengan teknologi modern adalah kemampuannya untuk menghancurkan sampah dengan cepat dan terkendali tanpa memerlukan lahan yang luas. Pirolisis memiliki kemampuan mengubah limbah menjadi bahan bakar. Tujuan penelitian ini adalah untuk meneliti dampak variasi jenis plastik dan penambahan katalis terhadap hasil pirolisis, khususnya dalam memproduksi bahan bakar dari limbah plastik PET. Proses pirolisis melibatkan langkah-langkah seperti pemotongan sampel, pencampuran dengan zeolit sesuai parameter yang ditetapkan, pemanasan dalam insinerator, pengumpulan hasil pirolisis, dan analisis sifat-sifat bahan bakar seperti kepadatan, viskositas, titik nyala, nilai kalor, dan lainnya.

Eksperimen pirolisis dengan zeolit sebagai katalis menunjukkan bahwa semakin tinggi suhu pemanasan, semakin banyak minyak yang dihasilkan, serta semakin banyak zat yang terurai menjadi gas dan cairan (minyak).

Penambahan zeolit bervariasi dalam penelitian ini, yaitu 0% (murni), 5%, 10%, dan 15%. Tanpa penambahan katalis, volume maksimum yang dihasilkan pada suhu 350 °C adalah 10 ml, sedangkan volume minimum pada suhu 300 °C adalah 4 ml. Dengan penambahan katalis, volume maksimum meningkat menjadi 12 ml pada suhu 350 °C, sementara volume minimum adalah 6 ml pada suhu 300 °C.

(Limbah et al., 2018). Namun, tidak ada uji pemanasan, densitas, viskositas, atau uji fokus yang dilakukan sebagai bagian dari penelitian yang dilakukan. Pengujian ini hanya memerlukan pengecekan waktu pirolisis dan mengetahui kandungan bahan kimia pada minyak pirolisis. Hal ini membuat perbedaan antara minyak pirolisis murni dan zeolit tambahan.

Tujuan dari penelitian ini adalah menangani masalah sampah, khususnya sampah plastik yang sulit terurai dan menjadi permasalahan sehari-hari. Harapannya, penelitian ini dapat membantu mengurangi masalah sampah plastik di masa mendatang dan memberikan manfaat kepada masyarakat dengan menyediakan bahan bakar alternatif yang dihasilkan dari sampah plastik. Hasil yang diinginkan dari penelitian ini adalah pemanfaatan sampah plastik sebagai opsi bahan bakar alternatif yang berpotensi menjadi solusi untuk masa depan.

2. TINJAUAN PUSTAKA

A. Plastik

Plastik adalah suatu materi yang dihasilkan dari nafta, yang diperoleh melalui proses penyulingan minyak bumi. Materi plastik memiliki ikatan kimia yang sangat kokoh, dan banyak produk konsumen yang umumnya terbuat dari plastik. Namun, karena sifatnya yang tidak dapat diurai secara alami (non-biodegradable), plastik yang telah digunakan kemudian menjadi limbah sulit terurai oleh mikroorganisme tanah, sehingga menimbulkan pencemaran lingkungan. (Wahyudi et al., 2018).

Berbagai metode dapat digunakan untuk mengatasi permasalahan sampah plastik, dan salah satunya adalah melalui proses daur ulang sampah plastik. (Azzaki et al., 2022). Kurangnya kesadaran masyarakat tentang risiko yang

terkait dengan penggunaan plastik bekas dalam berbagai sektor masih menjadi masalah. Partikel plastik menjadi penyebab utama pencemaran lingkungan, terutama tanah dan air, karena sulit untuk terurai. Proses degradasi alami plastik memakan waktu bertahun-tahun, sehingga dibutuhkan pertimbangan yang teliti dan penggunaan yang bijaksana dalam mengelola plastik bekas tersebut. (Decy Arwini, 2022)

B. Polyethylene Terephthalate

Polyethylene terephthalate, yang sering disebut sebagai PET, PETE, atau dengan kode daur ulang #1, adalah salah satu jenis polimer termoplastik yang sangat umum digunakan di pasar. PET merupakan termoplastik yang transparan dan semi-kristal dengan kekakuan tinggi, kekuatan mekanik yang baik, serta ketahanan kimia yang kuat. Berkat sifat mekanis dan ketahanan kimianya yang luar biasa, PET banyak digunakan dalam berbagai aplikasi seperti botol minuman ringan dan air, serat sintesis, kaset video dan audio, film fotografi, kemasan makanan, dan berbagai produk lainnya.

Pada tahun 2016, permintaan akan PET mencapai 8.400 kiloton dan diproyeksikan akan terus tumbuh sekitar 6,9% antara tahun 2017 dan 2025 sebagai respons terhadap pertumbuhan populasi global. Meskipun PET memberikan manfaat yang besar dalam kehidupan sehari-hari, masalah muncul ketika limbah PET tidak dikelola dengan baik karena waktu degradasi produk akhir dari PET di lingkungan alamiah memakan waktu sangat lama, yakni sekitar 300 hingga 450 tahun. Hal ini dapat menimbulkan dampak serius pada lingkungan (Utomo & Susi Arfiana, 2023).

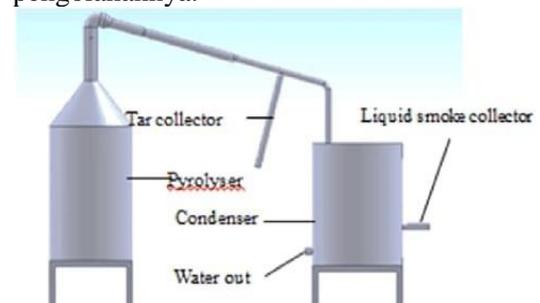
PET pada dasarnya adalah film yang lembut, transparan, dan fleksibel dengan ketahanan benturan dan sobek yang sangat baik. Para ahli mengatakan sampah plastik PET perlu dipecah menjadi bahan bakar diesel atau bensin melalui proses yang disebut pirolisis, yang menggunakan panas untuk memutus rantai karbon. (Salamah & Maryudi, 2019)

C. Pirolisis

Teknik pirolisis melibatkan pemanasan tanpa adanya sumber oksigen lain. Selama pirolisis, bahan baku dipanaskan tanpa terkena api secara langsung, sehingga gas sisa tidak mengandung zat berbahaya bagi lingkungan dan hampir tidak ada residu yang dihasilkan. Proses pirolisis terjadi karena adanya api yang menentukan suhunya. Api memanaskan reaktor dan terjadi reaksi. Reaksi yang terjadi adalah zat yang dipanaskan melebur pada suhu tertentu tergantung zatnya. Setelah zat melebur, terjadi penguapan dan uap masuk ke kondensor yang berfungsi mengubah fasa pada uap/gas menjadi cair. Dalam kondensor ini, uap dalam reaktor diubah secara bertahap menjadi cairan pada suhu tertentu untuk menghasilkan cairan yang diinginkan (Riupassa & Baharuddin, 2018). Pirolisis adalah sistem pemanas yang tidak menggunakan oksigen. Dalam proses pirolisis, energi panas mendorong oksidasi dan memecah molekul karbon. (Rahmadanty, 2022).

D. Insinerator

Insinerator merupakan sistem pengelolaan limbah yang beroperasi dengan prinsip insinerasi, di mana proses insinerasi limbah digunakan untuk mengubah limbah secara kimia, mengalami transformasi kimia dalam pengolahannya.



Gambar 1. Skema Insinerator.

Sumber: Sematic Scholar, 2024.

Pembakaran sampah adalah proses transformasi limbah padat menjadi bentuk gas, cair, dan padat melalui pelepasan energi panas. Kelebihan dari insinerasi adalah pengurangan volume limbah secara signifikan (>65%). Teknologi insinerator adalah metode penghilangan limbah yang menggunakan pembakaran pada suhu tinggi, yang dianggap aman bagi lingkungan dan mudah serta aman

dalam pengoperasiannya, karena emisi yang dihasilkan bersahabat dengan lingkungan. Penerapan insinerator dapat memenuhi standar yang ditetapkan oleh Kementerian Lingkungan Hidup sebagaimana diatur dalam Kep.MenLH No.13/MENLH/3/1995.(Dewi et al., 2020)

E. Uji Kandungan

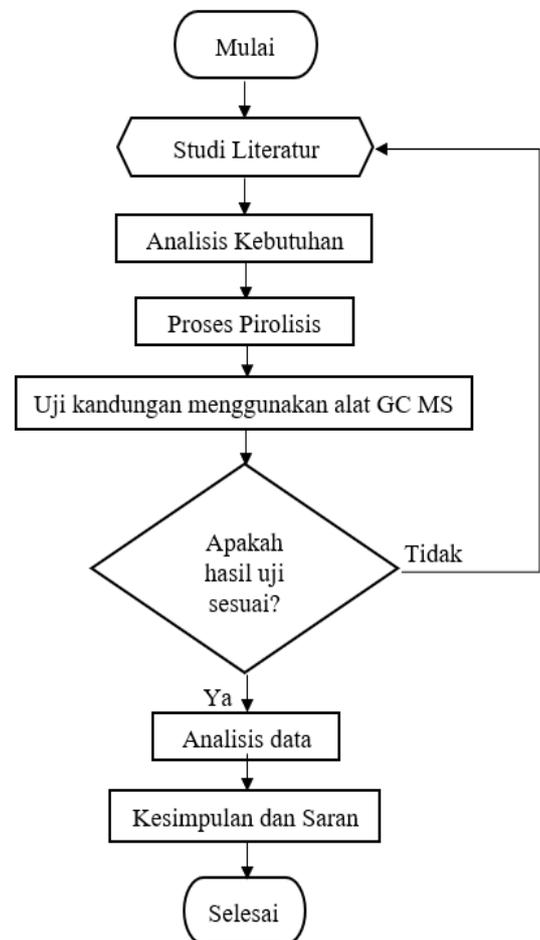
GC-MS (gas chromatography-mass spectrometry) adalah sebuah perangkat yang digunakan untuk mengidentifikasi berbagai senyawa dalam sampel yang dianalisis dengan menggunakan teknik kromatografi gas-cair dan spektrometri massa. Metode GC-MS merupakan jenis analisis struktur yang digunakan untuk menetapkan massa atau berat molekul suatu senyawa melalui proses fragmentasi. Keunggulan dari analisis senyawa menggunakan GC-MS adalah sensitivitasnya yang tinggi terhadap senyawa yang mudah menguap.(Indriani et al., 2023). Teknik GC-MS memanfaatkan kromatografi gas untuk memisahkan sampel, diikuti dengan analisis menggunakan MS (spektrometri massa). Metode GC-MS menonjol karena sensitivitasnya yang tinggi, membolehkan pemisahan senyawa campuran dan analisis beragam senyawa, termasuk pada tingkat konsentrasi yang rendah(Diva Candraningrat et al., 2021).

3. METODE PENELITIAN

Penelitian ini dilakukan di Dinas Lingkungan Jember, sementara pengujian bahan bakar dari plastik PET (Polyethylene terephthalate) dikerjakan di Politeknik Negeri Jember menggunakan alat GCMS. Proses ini melibatkan beberapa langkah; awalnya persiapan peralatan dan bahan (termasuk alat Pirolisis Incinerator, labu ukur, alat pemantik api, stopwatch, kompor, blower, gunting, wadah, GCMS), diikuti dengan tahap pirolisis saat pengujian bahan bakar dengan GCMS. Metode penelitian ini melibatkan analisis kualitatif dan kuantitatif. Peneliti bertujuan untuk mengubah energi limbah plastik PET menjadi bahan bakar minyak menggunakan zeolit alam sebagai katalis.

Dalam penelitian ini, plastik PET (Polyethylene terephthalate) yang digunakan

berasal dari sampah botol plastik yang dibuang oleh masyarakat dan dikumpulkan. Botol plastik tersebut kemudian dibersihkan dengan mencucinya dan mengeringkannya sebelum dipotong menjadi potongan kecil untuk memudahkan proses pelelehan. Selanjutnya, plastik akan diproses melalui pirolisis untuk mengurangi emisi pencemaran udara. Setelah tahap pirolisis selesai, produknya berupa bahan bakar dari plastik PET yang akan diuji menggunakan alat GC-MS (gas chromatography-mass spectrometry). Rencana penelitian ini direpresentasikan dalam diagram alir penelitian (Gambar 2)



Gambar 2.Diagram Alir Penelitian
Sumber: Arsip Peneliti, 2024

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Data Waktu Hasil Pembuatan Bahan Bakar Plastik Polyethylene terephthalate

Tabel 1 menunjukkan hasil perbandingan variasi jumlah penambahan campuran zeolit alam yang merupakan bahan baku pembuatan bahan bakar plastik polietilen tereftalat, dan waktu produksi bahan bakar plastik *Polyethylene terephthalate*

Tabel 1. Tabel pengujian waktu pembuatan bahan bakar plastik *Polyethylene terephthalate*

No	Massa (kg)	T-1 (Menit)	T-2 (Menit)	Suhu (°C)	Hasil (ml)	Keterangan
1	3	235	265	450	30	PET Murni
2	2,8	225	255	450	30	+Zeolit 5%
3	2,7	217	247	450	30	+Zeolit 10%
4	2,5	213	243	450	30	+Zeolit 15%

Sumber: Hasil Penelitian, 2024

Tabel 1 menunjukkan hasil pengujian waktu produksi bahan bakar plastik polietilen tereftalat dibandingkan dengan variasi jumlah penambahan zeolit alam sebagai campuran yang merupakan bahan baku produksi bahan bakar plastik *Polyethylene terephthalate*, yaitu:

Pertama, massa bahan baku plastik polietilen tereftalat murni seberat 3 kg membutuhkan waktu 235 menit pada suhu 450 °C, suhu minimum pembuangan bahan bakar di saluran keluar insinerator, dan berlangsung hingga 265 menit.

Kedua, massa bahan baku plastik polietilen tereftalat murni seberat 2,8 kg membutuhkan waktu 225 menit dan disimpan pada suhu 450°C hingga 255 menit.

Ketiga, massa bahan baku plastik polietilen tereftalat murni seberat 2,7 kg disimpan pada suhu 450°C selama 247 menit dalam periode 217 menit.

Keempat, massa bahan baku plastik polietilen tereftalat murni seberat 2,5 kg membutuhkan waktu 213 menit dan disimpan pada suhu 450°C hingga 243 menit.

B. Data Hasil Pengujian Alat GCMS

a.) Bahan Bakar Plastik PET Murni

Berdasarkan hasil pengujian menggunakan alat GCMS, bahan bakar plastik PET murni terbukti mengandung dua senyawa paling melimpah (lihat Tabel 2).

Tabel 2 Bahan bakar plastik *Polyethylene terephthalate* murni

No	Nama	Area%
1	Hexane, 3-methyl	9.71
2	2-Hepten-4-one, 2-methyl	6.96

Sumber: Hasil Penelitian, 2024

Hasil dari kesimpulan tabel diatas menunjukkan bahwa ada 2 unsur senyawa kimia tertinggi dalam minyak pirolisis plastik PET murni yakni :

- Hexane, 3-methyl memiliki 9,71% Area.
- 2-Hepten-4-one, 2-methyl memiliki 6,96% Area.

b.) Bahan Bakar Plastik PET + Zeolit 5%

Berdasarkan hasil pengujian menggunakan alat GCMS diketahui bahwa bahan bakar plastik PET + zeolit 5% mengandung dua senyawa kimia tertinggi yang tercantum pada Tabel 3.

Tabel 3. Bahan bakar plastik *Polyethylene terephthalate* + Zeolit 5%

No	Nama	Area%
1	1-Isopropyl 2,2dimethylpropylideneamine	9.11%
2	HEXANE, 1-(HEXYLOXY)- 3-METHYL	6.65%

Sumber: Hasil Penelitian, 2024

Kesimpulan dari tabel diatas menunjukkan bahwa ada 2 unsur senyawa kimia tertinggi dalam minyak pirolisis plastik PET + Zeolit 5% yakni :

- 1-Isopropyl
2,2dimethylpropylideneamine memiliki 9,11 Area%.
- HEXANE, 1-(HEXYLOXY)-3METHYL memiliki 6,65 Area%.

C. Bahan Bakar plastik PET + Zeolit 10%

Berdasarkan hasil pengujian dengan alat GCMS terlihat bahwa bahan bakar plastik PET + zeolit 10% mengandung dua senyawa terbanyak seperti pada Tabel 4.

Tabel 4. Bahan bakar plastik *Polyethylene terephthalate* + Zeolit 10%

No	Nama	Area%
1	Hexane, 3-methyl	9.64%
2	2-Hepten-4-one, 2-methyl	6.83%

Sumber: Hasil Penelitian, 2024

Kesimpulan dari tabel diatas menunjukkan bahwa ada 2 unsur senyawa kimia tertinggi dalam minyak pirolisis plastik PET + Zeolit 10% yakni :

- Hexane, 3-methyl memiliki 9,64% Area.
- 2-Hepten-4-one, 2-methyl memiliki 6,83% Area.

D. Bahan Bakar Plastik PET + Zeolit 15%

Analisis hasil pengujian dengan menggunakan alat GCMS menunjukkan bahwa bahan bakar plastik PET + zeolit 15% memiliki dua kandungan senyawa kimia terbanyak seperti pada Tabel 5.

Tabel 5 Bahan bakar plastik *Polyethylene terephthalate* + Zeolit 15%

No	Nama	Area%
1	Isoamyl phenylacetate	9.29%
2	HEXANE, 1-(HEXYLOXY)-3-METHYL	6.65%

Sumber: Hasil Penelitian, 2024

Kesimpulan dari tabel diatas menunjukkan bahwa ada 2 unsur senyawa kimia tertinggi dalam minyak pirolisis plastik PET + Zeolit 15% yakni :

- Isoamyl phenylacetate memiliki 9,29% Area.
- HEXANE,1-(HEXYLOXY)-3 METHYL memiliki 6,65% Area.

E. Perbandingan Fisik Visual Bahan Bakar *Polyethylene terephthalate*

Berdasarkan hasil penelitian yang dilakukan, perbandingan visual dan fisik antara bahan bakar limbah plastik PET murni dan bahan bakar yang dicampur dengan zeolit alam menunjukkan warna yang berbeda, dan semakin banyak zeolit alam yang ditambahkan maka

warnanya pun berubah semakin kuat. Bahan bakar plastik PET murni, atau yang ditambahkan zeolit alami, memiliki bau yang sangat menyengat. Proses pirolisis sampah plastik PET mempunyai interval waktu yang berbeda-beda, dan semakin banyak zeolit alam yang ditambahkan maka semakin cepat pula proses pirolisisnya. Dengan menambahkan katalis zeolit alam, waktu pirolisis menjadi lebih efektif. Umumnya warna bahan bakar resin PET cenderung kuning hingga jingga, namun bila ditambahkan katalis zeolit alam dalam jumlah besar, warnanya dapat berubah menjadi warna kehijauan seperti pada bahan bakar partalit, seperti terlihat pada Gambar 3.



Gambar 3. Sampel bahan bakar
 Sumber: Dok. Pribadi, 2024

Gambar diatas menunjukkan bahan bakar *Polyethylene terephthalate* diantaranya :

1. Dari sampel 1, warna minyak pirolisis plastik PET murni berwarna oranye terang, mirip dengan warna Pertamina Turbo.
2. Telah kami jelaskan bahwa dengan penambahan zeolit 5%, warna bahan bakar plastik PET menjadi seperti bahan bakar premium, namun warna kuningnya menjadi lebih pekat dan mendekati oranye.
3. Warna bahan bakar ini digambarkan kuning, mirip dengan bahan bakar premium.
4. Sebelumnya bahan bakar plastik PET dengan penambahan zeolit 15% digambarkan memiliki warna kuning kehijauan mirip partalit.

5. Kesimpulan Dan Saran

A. Kesimpulan

Berdasarkan Analisa data dan pembahasan diatas, maka diperoleh Kesimpulan sebagai berikut;

1. Penambahan katalis ZA menyebabkan waktu pirolisis semakin efektif.
2. Hasil uji GCMS menunjukkan adanya 3 senyawa kimia ada 3 unsur senyawa kimia yang memiliki persentase terbesar yaitu, Hexane, 3-methyl, Isoamyl phenylacetate, dan 1-Isopropyl.
3. Berdasarkan perbandingan indikator warna pada cairan minyak PET menunjukkan bahwa kualitas warna yang semakin hijau disebabkan semakin banyak penambahan katalis ZA.

B. Saran

1. Diperlukan penelitian lebih lanjut mengenai kinerja mesin bila menggunakan bahan bakar polietilen tereftalat murni atau dengan penambahan zeolit alam.
2. Bagi penelitian selanjutnya, jenis plastik lain dapat digunakan untuk mengurangi jumlah sampah plastik yang semakin meningkat dari waktu ke waktu.

6. DAFTAR PUSTAKA

- Azzaki, D. A., Jati, D. R., Sulastri, A., Irsan, R., & Jumiati, J. 2022. Analisis Pemanfaatan Sampah Plastik dengan Metode Buang, Pisah, dan Untung Menggunakan Sistem Barcode. *Jurnal Ilmu Lingkungan*, 20(2), 252–262. <https://doi.org/10.14710/jil.20.2.252-262>
- Decy Arwini, N. P. 2022. Sampah Plastik Dan Upaya Pengurangan Timbulan Sampah Plastik. *Jurnal Ilmiah Vastuwidya*, 5(1), 72–82. <https://doi.org/10.47532/jiv.v5i1.412>
- Dewi, R., Hadinata, F., Sriwijaya, U., Palembang, K., & Selatan, S. 2020. Sistem pengolahan sampah domestik dengan menggunakan incinerator drum bekas. *Seminar Nasional AVoER XII 2020, November*, 891–896. <http://ejournal.ft.unsri.ac.id/index.php/avoer/article/view/303/237>
- Diva Candraningrat, I. D. A. A., Santika, A. A. G. J., Dharmayanti, I. A. M. S., & Prayascita, P. W. 2021. Review Kemampuan Metode Gc-Ms Dalam Identifikasi Flunitrazepam Terkait Dengan Aspek Forensik Dan Klinik. *Jurnal Kimia*, 15(1), 12. <https://doi.org/10.24843/jchem.2021.v15.i01.p03>
- Indriani, S., Isdaryanti, I., Agustia, M., Poleuleng, A. B., Syahra, N. J., & Prastiyo, Y. B. 2023. ANALISIS GC-MS (GASS CROMATOGRAPHY-MASS SPECTROMETRY) TERHADAP BATANG KELAPA SAWIT (*Elaeis guineensis* Jaq.). *Agroplanta: Jurnal Ilmiah Terapan Budidaya Dan Pengelolaan Tanaman Pertanian Dan Perkebunan*, 12(2), 147–155. <https://doi.org/10.51978/agro.v12i2.527>
- Limbah, P., Menjadi, P., Bakar, B., Menggunakan, D., Pirolisis, M., Pembimbing, D., & Setiawan, I. B. 2018. *Tugas Akhir-Tk 145501*.
- Nasution, R. S. 2015. Berbagai Cara Penanggulangan Limbah Plastik. *Elkawnie: Journal of Islamic Science and Technology*, 1(1), 97–104. <https://jurnal.ar-raniry.ac.id/index.php/elkawnie/article/view/522>
- Purwaningrum, P. 2016. Upaya Mengurangi Timbulan Sampah Plastik Di Lingkungan. *Indonesian Journal of Urban and Environmental Technology*, 8(2), 141–147. <https://doi.org/10.25105/urbanenvirotech.v8i2.1421>
- Rahmadanty, N. 2022. Pirolisis Sampah Plastik Jenis Low Density Polyethylene (LDPE) menggunakan Katalis Pasir Merapi sebagai Alternatif Bahan Bakar Minyak (BBM). *Tugas Akhir*, 1–39. <https://dspace.uin.ac.id/handle/123456789/41527>
- Riupassa, H., & Baharuddin, M. N. 2018. Pemanfaatan Limbah Plastik Melalui Proses Pirolisis Sebagai Bahan Bakar Alternatif. *Jurnal Teknik Mesin*, 7(1), 44–52. <http://ojs.ustj.ac.id/mesin/article/view/404>
- Salamah, S., & Maryudi, M. 2019. Recycle Limbah Plastik Jenis PET (Polyethylene Terephthalate) dengan Proses Pirolisis dengan katalis Silika-Alumina. *Jurnal Rekayasa Kimia & Lingkungan*, 14(1), 104–111. <https://doi.org/10.23955/rkl.v14i1.11954>
- Utomo, L. W., & Susi Arfiana, dan. 2023. Pemanfaatan Limbah Plastik Daur Ulang dari Polietilen Tereftalat (PET) Sebagai Bahan Tambahan dalam Pembuatan

Nanokomposit, Semen Mortar, dan Aspal.
Jurnal Teknologi Lingkungan Lahan Basah, 11(1), 164–179.

Wahyudi, J., Prayitno, H. T., Astuti, A. D., Perencanaan, B., Daerah, P., & Pati, K. 2018. Pemanfaatan limbah plastik sebagai bahan baku pembuatan bahan bakar. *Jurnal Litbang Vol. XIV*(1), 58–67. <https://media.neliti.com/media/publications/271770-pemanfaatan-limbah-plastik-sebagai-bahan-d2c72e6c.pdf>