

Pengaruh Persentase Katalis Zeolit Alam terhadap Karakteristik Minyak Hasil Pirolisis Campuran PP-LDPE

Mochammad Mashud Okta Kusuma¹, Mokh Hairul Bahri^{2*}, Asroful Abidin³

1 Program Studi Teknik Mesin, Universitas Muhammadiyah Jember; e-mail : oktakusuma24@gmail.com

2 Program Studi Teknik Mesin, Universitas Muhammadiyah Jember; e-mail : mhairulbahri@unmuhjember.ac.id

3 Program Studi Teknik Mesin, Universitas Muhammadiyah Jember; e-mail : asrofulabidin@unmuhjember.ac.id

*** Penulis korespondensi: Mokh Hairul Bahri**

Abstract: Natural zeolite is a crystalline aluminosilicate mineral that has pores and is often used as a catalyst in the pyrolysis process of plastic waste. Zeolite consists of a three-dimensional framework formed by SiO₄ and AlO₄ tetrahedrons, creating a distinctive microporous pore network with a large surface area and high adsorption capacity. This study aims to determine the effect of the percentage of natural zeolite catalyst on the combustion rate and oil density of the pyrolysis results of PP-LDPE pure mixture. This study is experimental and the process uses catalytic pyrolysis with natural zeolite catalyst in four different percentages, namely 0% (as a control), 5%, 10%, and 15% of the total mass of plastic input, where each experiment uses 3 kg of plastic as the main material. The study was conducted by heating PP and LDPE samples at a temperature of 250°C in the absence of oxygen for 120 minutes. The results of this study indicate that there is a volume variation in each catalyst mixture, indicating that increasing the pyrolysis catalyst has a positive effect on the amount of liquid fraction produced. A 15% natural zeolite catalyst yielded a maximum yield of 576 ml, equivalent to a 650% increase compared to pyrolysis without a catalyst (0%).

Keywords: Natural Zeolite, Catalyst, Pyrolysis, Combustion Rate, Density.

Abstrak: Zeolit alam adalah mineral aluminosilikat kristalin yang memiliki pori-pori dan sering dimanfaatkan sebagai katalis dalam proses pirolisis limbah plastik. Zeolit terdiri dari kerangka tiga dimensi yang dibentuk oleh tetrahedron SiO₄ dan AlO₄, menciptakan jaringan pori mikropori khas dengan luas permukaan yang luas serta kemampuan adsorpsi yang tinggi. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh persentase katalis zeolit alam terhadap laju pembakaran dan densitas minyak hasil pirolisis campuran PP-LDPE. Penelitian ini bersifat eksperimental dan prosesnya menggunakan pirolisis katalitik dengan katalis zeolit alam dalam empat persentase yang berbeda, yakni 0% (sebagai kontrol), 5%, 10%, dan 15% dari total massa plastik yang dimasukkan, di mana setiap eksperimen memanfaatkan 3 kg plastik sebagai bahan utama. Penelitian dilakukan dengan memanaskan sampel PP dan LDPE dengan suhu 250°C tanpa adanya oksigen pada waktu 120 menit. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa adanya variasi volume pada setiap pencampuran katalis, yang mengindikasikan bahwa peningkatan katalis pirolisis berpengaruh positif terhadap jumlah fraksi cair yang dihasilkan. Katalis zeolit alam dengan persentase 15% menghasilkan yield maksimum, yaitu 576 ml, yang setara dengan peningkatan 650% dibandingkan dengan pirolisis tanpa katalis (0%).

Kata kunci: Katalis, Zeolit Alam, Pirolisis, Laju Pembakaran, Densitas.

Diterima: June 22, 2026
Direvisi: June 30, 2026
Diterima: July 17, 2026
Diterbitkan: July 15, 2026
Versi sekarang: July 30, 2026



Hak cipta: © 2026 oleh penulis.
Diserahkan untuk kemungkinan publikasi akses terbuka berdasarkan syarat dan ketentuan lisensi Creative Commons Attribution (CC BY SA) (<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>)

1. Pendahuluan

Akumulasi limbah plastik di seluruh dunia telah mencapai tingkat kritis yang mengancam keseimbangan ekologi, sehingga mendorong komunitas global untuk mengevaluasi kembali pendekatan konvensional dalam pengelolaan limbah. Pertumbuhan populasi yang cepat sejalan dengan pola konsumsi masyarakat modern yang sangat bergantung pada plastik sekali pakai, sehingga menciptakan ketidakharmonisan antara volume sampah yang dihasilkan dan kapasitas pengolahan yang ada [4].

Di antara berbagai jenis plastik yang beredar, Polypropylene (PP) dan High-Density Polyethylene (HDPE) atau Low-Density Polyethylene (LDPE) mendominasi komposisi sampah rumah tangga. Hal ini disebabkan oleh sifat mekanisnya yang superior dan fleksibel, menjadikannya bahan utama untuk kemasan makanan, kantong belanja, dan wadah sehari-hari [3].

Untuk mengatasi keterbatasan termodinamika dan meningkatkan kualitas produk akhir dalam pirolisis termal, pengintegrasian katalis ke dalam reaktor merupakan langkah penting. Dalam hal ini, zeolit alam Indonesia muncul sebagai bahan katalis yang strategis karena ketersediaannya yang berlimpah dan biaya yang lebih ekonomis dibandingkan katalis sintesis berbasis aluminosilikat murni (seperti HZSM-5 atau FCC) [2].

Laju pembakaran adalah parameter penting yang menunjukkan kecepatan pelepasan energi kimia menjadi energi panas di ruang bakar. Karakteristik ini sangat dipengaruhi oleh komposisi kimia bahan bakar, adanya senyawa aromatik atau rantai bercabang dari perengkahan katalitik akan mengubah profil nyala api secara signifikan [5].

2. Tinjauan Literatur

2.1 Pirolisis

Pirolisis merupakan suatu metode dekomposisi termokimia yang terjadi pada bahan organik, khususnya limbah plastik, dalam kondisi tanpa oksigen atau anaerobik. Proses ini melibatkan pemanasan pada suhu tinggi yang menyebabkan pemecahan rantai polimer menjadi molekul-molekul yang lebih kecil tanpa melibatkan pembakaran [1].

2.2 Katalis Zeolit Alam

Pen Zeolit alam adalah mineral aluminosilikat kristalin yang memiliki pori-pori dan sering dimanfaatkan sebagai katalis dalam proses pirolisis limbah plastik. Zeolit terdiri dari kerangka tiga dimensi yang dibentuk oleh tetrahedron SiO_4 dan AlO_4 , menciptakan jaringan pori mikropori khas dengan luas permukaan yang luas serta kemampuan adsorpsi yang tinggi [2].

2.3 Sifat Plastik PP Dan LDPE

Plastik PP (Polipropilena) dan LDPE (Low Density Polyethylene) adalah jenis plastik termoplastik yang sering ditemukan dalam limbah rumah tangga, seperti gelas air mineral (PP) dan bubble wrap (LDPE). Kedua jenis plastik ini memiliki struktur kimia berbasis hidrokarbon, tetapi berbeda dalam sifat fisik dan termal, yang memengaruhi hasil pirolisis.

2.4 Laju Pembakaran

Proses pirolisis limbah plastik seperti Low-Density Polyethylene (LDPE) dan campurannya dengan Polypropylene (PP) berperan penting dalam mengonversi sampah plastik menjadi bahan bakar melalui mekanisme dekomposisi termal. Berdasarkan kajian karakteristik produknya, minyak pirolisis yang dihasilkan dari LDPE dan PP berpotensi menjadi pengganti bahan bakar fosil konvensional. Pengujian laju pembakaran terhadap minyak pirolisis berfungsi sebagai parameter utama untuk menilai kualitas serta kelayakannya sebagai bahan bakar, di mana laju pembakaran yang stabil menunjukkan potensi efisiensi penggunaannya. Pemanfaatan LDPE dan PP melalui proses pirolisis turut mendukung penerapan prinsip ekonomi sirkular dengan mengubah limbah plastik menjadi sumber energi yang terbarukan (Mayora et al., 2023).

$$\text{laju pembakaran} = \frac{\text{massa bahan terbakar(g)}}{\text{waktu pembakaran(s)}}$$

2.5 Densitas

Massa jenis atau densitas merupakan parameter krusial dalam evaluasi kualitas fisik minyak yang dihasilkan dari proses pirolisis. Parameter ini mengukur massa zat per satuan volume, umumnya diekspresikan dalam satuan gram per mililiter (g/mL) atau kilogram per liter (kg/L). Nilai densitas mencerminkan komposisi hidrokarbon pada minyak tersebut—fraksi hidrokarbon yang lebih ringan (misalnya, fraksi bensin) berkorelasi dengan densitas yang lebih rendah.

3. Metodologi

3.1 Prosedur

Penelitian ini bersifat eksperimental dan bertujuan untuk mengkonversi limbah plastik yang terdiri dari campuran Polypropylene (PP) dan Low-Density Polyethylene (LDPE) menjadi minyak pirolisis sebagai alternatif bahan bakar. Prosesnya menggunakan pirolisis katalitik dengan katalis zeolit alam dalam empat persentase yang berbeda, yakni 0% (sebagai kontrol), 5%, 10%, dan 15% dari total massa plastik yang dimasukkan, di mana setiap eksperimen memanfaatkan 3 kg plastik sebagai bahan utama. Penelitian dilakukan dengan memanaskan sampel PP dan LDPE dengan suhu 250°C tanpa adanya oksigen pada waktu 120 menit.

3.2 Alat dan Bahan

Alat : -Reaktor Pirolisis

- Fuel Gas Tank
- Gas Regulator
- Thermocoupe
- Gas Furnance
- Condensor
- Erlenmeyer Glass
- Gunting
- Stopwatch
- Pematik Api
- Timbangan Digital
- Piknometer
- Timbangan Digital Mikro
- Alat Sensor Suhu

Bahan : -Limbah Plastik

- Katalis Zeloit Alam
- Bahan pembersih (Aquades)
- Bahan Pendingin (Air Kran)

3.3 Tahapan Penelitian

3.3.1 Persiapan Sampel Sampah Plastik PP Dan LDPE

- Siapkan limbah plastik PP dan LDPE yang telah dipilah sebelumnya.
- Bersihkan limbah plastik PP dan LDPE dengan mencuci untuk menghilangkan kotoran, pasir, dan label, guna menghasilkan produk pirolisis berkualitas tinggi serta mengurangi korosi pada reaktor.
- Keringkan limbah plastik menggunakan akuades untuk menghilangkan kandungan air, sehingga tidak menurunkan efisiensi energi dan tidak memengaruhi kualitas bahan bakar.
- Potong atau hancurkan menjadi ukuran kecil dan seragam agar perpindahan panas merata serta waktu pirolisis tetap konsisten.

3.3.2 Persiapan Reaktor Dan Proses Pirolisis

- Siapkan jenis reaktor yang akan digunakan dalam penelitian.
- Masukkan limbah plastik PP dan LDPE yang telah dihancurkan ke dalam reaktor, dengan memastikan tidak terlalu penuh untuk memberikan ruang bagi ekspansi gas.
- Sebelum memulai pemanasan atau proses pirolisis, alirkan gas inert ke dalam reaktor selama beberapa menit untuk menciptakan lingkungan bebas oksigen, sehingga mencegah pembakaran yang bisa menghasilkan abu dan gas berbahaya.
- Panaskan reaktor menggunakan regulator gas dengan laju pemanasan (seperti 10-20°C per menit) yang penting untuk mengoptimalkan hasil.
- Tetapkan suhu reaktor pada tingkat 250°C
- Jaga suhu tersebut selama 120 menit, bergantung pada jumlah dan ukuran sampel bahan.
- Uap hidrokarbon yang terbentuk akan dialirkan keluar dari reaktor ke sistem kondensasi, di mana uap tersebut mengembun dan menetes ke dalam wadah sebagai cairan.
- Catat waktu saat tetesan minyak pertama kali muncul.

3.3.3 Proses Pemisah Dan Pembersih

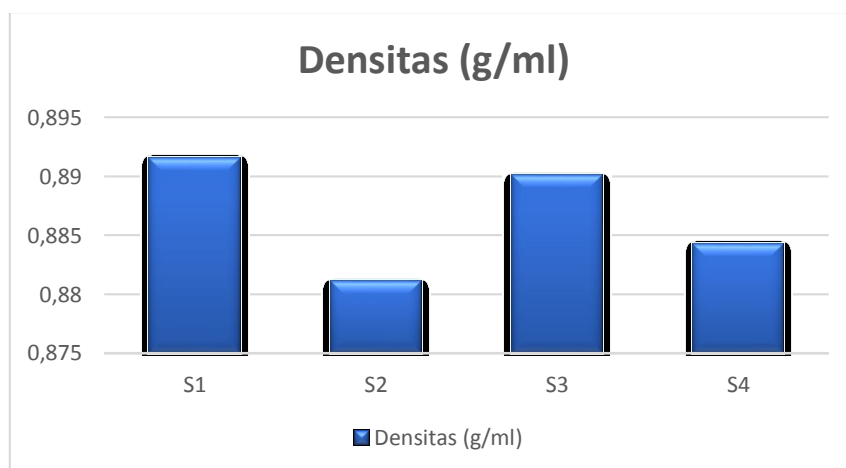
- Uap panas yang dialirkan dari sistem pendingin (kondensor), umumnya berbentuk pipa spiral yang didinginkan dengan air, di mana uap akan mengembun menjadi cairan berupa minyak pirolisis.
- Cairan minyak dikumpulkan dalam wadah penampung, sedangkan gas yang tidak terkondensasi (Non-Condensable Gas/NCG) seperti metana dan etana, dialirkan ke burner sebagai sumber energi untuk memanaskan reaktor, sehingga proses menjadi lebih mandiri dari segi energi.
- Setelah proses berakhir dan reaktor mendingin, buka reaktor lalu bersihkan residu padat (char/coke) yang tersisa di dalamnya.
- Minyak atau sampel pirolisis yang dihasilkan kemudian dilanjutkan ke tahap pengujian untuk pengumpulan data berikutnya.

3.3.4 Kode Sempel

- S1 : Plastik LDPE + Plastik PP
- S2 : Plastik LDPE + Plastik PP + Zeolit Alam 5%
- S3 : Plastik LDPE + Plastik PP + Zeolit Alam 10%
- S4 : Plastik LDPE + Plastik PP + Zeolit Alam 15%

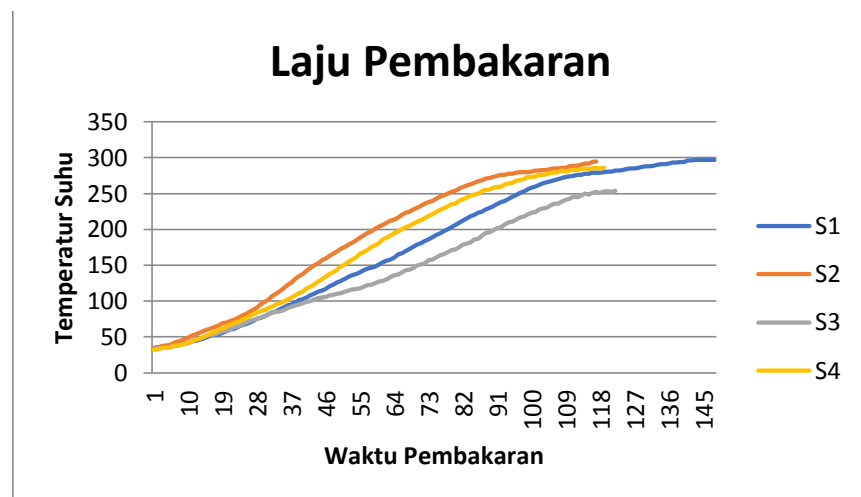
4. Hasil dan Pembahasan

Volume minyak pirolisis yang berhasil dikumpulkan adalah sebesar 76 ml untuk variasi tanpa penambahan katalis (0%), 248 ml untuk variasi dengan katalis 5%, 350 ml untuk variasi dengan katalis 10%, dan 576 ml untuk variasi dengan katalis 15%. Perbedaan volume yang cukup nyata antar setiap variasi ini secara langsung mengkonfirmasi bahwa penambahan katalis zeolit alam clinoptilolite memberikan pengaruh yang signifikan terhadap efisiensi konversi limbah bubble wrap menjadi produk cair melalui proses pirolisis.



Gambar 4.1 Hasil Data Pengujian Densitas

Berdasarkan hasil penelitian, nilai densitas minyak hasil pirolisis plastik LDPE dan PP menunjukkan kenaikan seiring dengan meningkatnya campuran katalis operasi reaktor, di mana densitas tertinggi sebesar 0,891 g/mL diperoleh pada campuran katalis 15% dan densitas terendah sebesar 0,881 g/mL dihasilkan pada campuran non katalis. Pola kenaikan densitas seiring dengan kenaikan campuran katalis ini konsisten dengan temuan dalam beberapa penelitian terdahulu.



Gambar 4.1 Grafik Hasil Uji Laju Pembakaran

Mengacu pada data yang tersaji dalam grafik laju pembakaran, seluruh sampel minyak hasil pirolisis plastik menunjukkan pola peningkatan temperatur yang konsisten seiring pertambahan waktu hingga mencapai batas temperatur maksimum tertentu, setelah mana temperatur cenderung menstabilkan diri atau mengalami reduksi. Pada sampel kontrol tanpa katalis, peningkatan temperatur berlangsung dengan intensitas yang cukup tinggi sejak tahap awal pembakaran, dengan temperatur maksimum yang terukur mencapai kisaran 297°C. Introduksi katalis pada kadar 10% menyebabkan laju peningkatan temperatur yang lebih lambat dibandingkan sampel kontrol, sekaligus menghasilkan temperatur maksimum paling rendah, yaitu sekitar 254°C. Di antara seluruh variabel yang diuji, penambahan katalis pada kadar 5% memberikan hasil yang paling unggul, ditandai dengan tercapainya temperatur maksimum tertinggi sebesar sekitar 295°C yang mengindikasikan efektivitas pembakaran yang lebih optimal. Sementara penggunaan katalis pada kadar 15% menghasilkan laju kenaikan temperatur yang relatif cepat dengan temperatur maksimum sekitar 286°C, namun angka tersebut tetap lebih rendah bila dibandingkan dengan variasi kadar 5%. Ditinjau secara komprehensif, penambahan katalis memberikan pengaruh nyata terhadap karakteristik laju pembakaran, temperatur puncak yang dapat dicapai, serta efisiensi keseluruhan proses pembakaran. Konsentrasi katalis 5% teridentifikasi sebagai parameter optimal yang menghasilkan performa termal tertinggi dan efektivitas pembakaran paling baik.

5. Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian, penambahan katalis zeolit alam pada proses pirolisis campuran plastik Polypropylene (PP) dan Low-Density Polyethylene (LDPE) terbukti berpengaruh terhadap jumlah minyak yang dihasilkan, densitas, serta karakteristik laju pembakarannya. Peningkatan persentase katalis dari 0%, 5%, 10%, hingga 15% menunjukkan kecenderungan meningkatnya volume minyak pirolisis. Penggunaan katalis sebesar 15% menghasilkan volume minyak tertinggi, yaitu 576 ml, atau meningkat sekitar 650% dibandingkan proses pirolisis tanpa penambahan katalis. Hasil pengujian juga menunjukkan bahwa peningkatan persentase katalis cenderung diikuti oleh kenaikan nilai densitas minyak pirolisis. Nilai densitas tertinggi diperoleh pada variasi katalis 15% sebesar 0,891 g/mL, sedangkan nilai terendah tercatat pada sampel tanpa katalis, yaitu sebesar 0,881 g/mL. Pada aspek laju pembakaran, penambahan katalis memberikan pengaruh terhadap karakteristik pembakaran minyak yang dihasilkan. Variasi katalis 5% menunjukkan performa pembakaran terbaik dengan temperatur maksimum mencapai sekitar 295°C, yang mengindikasikan proses pembakaran berlangsung lebih efektif dibandingkan variasi lainnya. Secara keseluruhan, zeolit alam memiliki potensi yang baik sebagai katalis dalam proses pirolisis limbah plastik PP-LDPE karena mampu meningkatkan kuantitas minyak yang dihasilkan sekaligus memperbaiki karakteristik bahan bakar yang diperoleh. Temuan ini menunjukkan bahwa pemanfaatan zeolit alam dapat menjadi salah satu alternatif untuk mengoptimalkan konversi limbah plastik menjadi sumber energi yang lebih bernilai dan berkelanjutan.

Kontribusi Penulis: Penulis Penelitian ini berkontribusi pada pengembangan teknologi konversi energi dan pengelolaan limbah plastik melalui kajian eksperimental mengenai pengaruh persentase katalis zeolit alam terhadap karakteristik minyak hasil pirolisis campuran plastik Polypropylene (PP) dan Low-Density Polyethylene (LDPE). Penelitian dilakukan secara sistematis dengan memvariasikan konsentrasi katalis sebesar 0%, 5%, 10%, dan 15% untuk mengevaluasi pengaruhnya terhadap volume minyak yang dihasilkan, nilai densitas, serta karakteristik laju pembakaran minyak pirolisis. Hasil penelitian menunjukkan bahwa peningkatan persentase katalis zeolit alam mampu meningkatkan produksi minyak pirolisis secara signifikan, dengan hasil tertinggi diperoleh pada penggunaan katalis sebesar 15%. Penambahan katalis juga memberikan pengaruh terhadap sifat fisik minyak yang dihasilkan. Di sisi lain, variasi katalis sebesar 5% menunjukkan performa pembakaran paling optimal dibandingkan variasi lainnya. Temuan ini memperkaya referensi ilmiah mengenai pemanfaatan zeolit alam sebagai katalis pada proses pirolisis limbah plastik. Selain itu, hasil penelitian dapat menjadi dasar dalam pengembangan teknologi pirolisis yang lebih efektif, ekonomis, dan berkelanjutan, sehingga berpotensi mendukung upaya pengurangan limbah plastik sekaligus menyediakan sumber energi alternatif yang memiliki nilai tambah.

Pendanaan: Studi eksperimental ini dilakukan tidak adanya dukungan dana dari pihak luar maupun lembaga tertentu. Seluruh kebutuhan penelitian dibiayai secara mandiri oleh peneliti. Selain itu, tidak terdapat konflik kepentingan dalam bentuk apa pun yang dapat memengaruhi proses penelitian, hasil pengujian, maupun interpretasi data yang diperoleh selama penelitian berlangsung.

Pernyataan Ketersediaan Data: Pada data hasil penelitian yang ada pada studi ini tersedia disimpan penulis dalam bentuk dokumentasi hasil eksperimen serta pengujian laboratorium. Data tersebut dapat digunakan untuk keperluan akademik, validasi penelitian, maupun pengembangan penelitian selanjutnya sesuai dengan kebutuhan dan permintaan yang relevan.

Ucapan Terima Kasih: Penulis menyampaikan apresiasi kepada Laboratorium Teknik Mesin Universitas Muhammadiyah Jember yang telah memberikan dukungan berupa fasilitas penelitian, akses pelaksanaan pengujian, dan arahan teknis selama proses penelitian berlangsung. Ucapan terima kasih juga ditujukan kepada para dosen, teknisi laboratorium, serta rekan-rekan yang telah memberikan bantuan, dukungan, dan berbagai saran konstruktif sehingga penelitian ini dapat terlaksana dengan baik.

Konflik Kepentingan: Penulis menegaskan bahwa penelitian ini dilakukan tanpa adanya benturan kepentingan dalam bentuk apa pun yang berpotensi memengaruhi validitas maupun objektivitas hasil penelitian yang dipublikasikan. Seluruh proses penelitian, mulai dari pelaksanaan hingga penyusunan laporan, dilakukan secara independen dan tidak dipengaruhi oleh hubungan keuangan, profesional, ataupun kepentingan pribadi dengan pihak tertentu yang dapat menimbulkan unsur keberpihakan.

Referensi

- [1] Arielle, D. T. L., Nalume, W. G., & Gilbert, Y. (2024). A review of the life cycle analysis for plastic waste pyrolysis. *Open Journal of Polymer Chemistry*, 14(3)
- [2] Bani, G. A. (2024). Kajian pemanfaatan zeolit alam Ende sebagai katalis dalam pirolisis polietilena dari sampah plastik. *Jurnal Ilmu Lingkungan*, 22(2)
- [3] Dhamayanthi, W., Puspitorini, R. Y. A., Wardani, D. K., Andini, P., Hudori, H. A., Pratama, F. E. A., & Atmajaya, A. W. W. (2024). Pemanfaatan HDPE (High Density Polyethylene) menjadi produk komersial pada KWT Meuseuraya Sidoarjo. *SEJAGAT: Jurnal Pengabdian Masyarakat*, 1(2), 47–55. <https://doi.org/10.25047/sejagat.v1i2.5143>
- [4] Hoseini, M., & Bond, T. (2022). Predicting the global environmental distribution of plastic polymers. *Environmental Pollution*, 300, 118966.
- [5] Iskandar, T., Anggraini, S. P. A., & Melinda, M. (2021). Pembuatan bahan bakar diesel dari limbah plastik HDPE dengan proses pirolisis. *Reka Buana: Jurnal Ilmiah Teknik Sipil Dan Teknik Kimia*, 6(1), 23–29. <https://doi.org/10.33366/rekabuana.v6i1.2251>
- [6] Mayora, E. M., Arifin, A., & Nugraheni, P. W. (2023). Pirolisis limbah plastik jenis low density polyethylene (LDPE) dan polypropylene (PP) menggunakan katalis zeolit alam. *Jurnal Teknologi Lingkungan Lahan Basah*, 11(3)
- [7] Cahyono, M. S., Haryono, S., & Mandala, W. W. (2021). Proses pirolisis untuk mengkonversi limbah plastik menjadi bahan bakar minyak menggunakan penyaringan adsorban (arang dan zeolit). *Jurnal Offshore: Oil, Production Facilities and Renewable Energy*, 5(2), 74–81. <https://doi.org/10.30588/jo.v5i2.993>

-
- [8] Kartika, W. (2022). Pemanfaatan sampah plastik jenis HDPE dan PET sebagai bahan baku pembuatan bahan bakar minyak alternatif menggunakan metode pirolisis dengan katalis zeolit alam. *Agroindustrial Technology Journal*, 6(2), 106–117. <https://doi.org/10.21111/atj.v6i2.8591>
- [9] Dwicaksono, A. V., Bahri, M. H., & Abidin, A. (2024). Pengaruh Zeolit Terhadap Waktu Kondensasi Pirolisis Limbah Plastik Polypropylene. *Jurnal Smart Teknologi*, 5(6), 750-756.
- [10] Zidane, A. A., & Mokh. Hairul Bahri. (2025). JURITEK : Jurnal Ilmiah Teknik Mesin , Elektro dan Komputer.
- [11] Hermanto, H., Bahri, MH, & PN, AF (2022). Pirolisis Limbah Plastik Polypropylene Dengan Tambahan Zeolit Alam. *Jurnal Cerdas Teknologi* , 3 (2), 216-223.