

Pengaruh Variasi Zeolit Clinoptilolite pada Pirolisis Limbah Plastik PP dan PE terhadap Karakteristik Minyak serta Nilai Kalor dan Viskositas

Ziddan Al Fachry ^{1*}, Mokh. Hairul Bahri ², dan Nanang Saiful Rizal ³,

¹ Teknik Mesin Universitas Muhammadiyah Jember 1; email : ziddanalfachry3@gmail.com

² Teknik Mesin Universitas Muhammadiyah Jember 2; email : mhairulbahri@unmuhjember.ac.id

³ Teknik Mesin Universitas Muhammadiyah Jember 3; email : nanangsaifulrizal@unmuhjember.ac.id

* Penulis Korespondensi : Ziddan Al Fachry

Abstract: The increasing generation of plastic waste has become a significant environmental concern due to its resistance to natural degradation and its potential to cause long-term pollution. Pyrolysis offers a promising approach for converting plastic waste into valuable liquid fuels while reducing environmental burdens. This study investigates the effect of clinoptilolite zeolite catalyst concentration on the characteristics of pyrolysis oil derived from mixed Polypropylene (PP) and Polyethylene (PE-HDPE) plastic waste. An experimental method was employed using catalyst concentrations of 0%, 5%, 10%, and 15% under a pyrolysis temperature of 550°C for 2 hours. The resulting liquid products were evaluated based on their calorific value and kinematic viscosity. The results demonstrated that catalyst addition significantly influenced fuel quality. The highest calorific value was obtained at a catalyst concentration of 5%, reaching 11,521.45 cal g⁻¹, indicating enhanced energy content compared to other treatments. Meanwhile, calorific values at catalyst concentrations of 0%, 10%, and 15% were 9,865.55 cal g⁻¹, 10,618.11 cal g⁻¹, and 9,377.89 cal g⁻¹, respectively. Increasing catalyst concentration also reduced the viscosity of the pyrolysis oil, from 1.215 mm² s⁻¹ at 0% catalyst to 0.652 mm² s⁻¹ at 15% catalyst, suggesting more effective cracking of long-chain hydrocarbons into lighter fractions. The viscosity value closest to the commercial gasoline standard was achieved at a catalyst concentration of 10% (0.790 mm² s⁻¹). Overall, clinoptilolite zeolite proved effective in improving the physicochemical properties of pyrolysis oil, with a 5% catalyst concentration providing the most favorable performance in terms of energy content. These findings highlight the potential of catalytic pyrolysis as a sustainable strategy for plastic waste valorization and alternative fuel production.

Keywords: catalytic pyrolysis; plastic waste; polypropylene; polyethylene; clinoptilolite zeolite; calorific value; kinematic viscosity; alternative fuel

Abstrak: Peningkatan jumlah limbah plastik di Indonesia menimbulkan berbagai permasalahan lingkungan karena sifatnya yang sulit terurai secara alami. Salah satu upaya pemanfaatan limbah plastik yang berpotensi memberikan nilai tambah adalah melalui teknologi pirolisis yang mampu mengonversi limbah menjadi bahan bakar cair. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh variasi katalis zeolit clinoptilolite terhadap karakteristik minyak hasil pirolisis limbah plastik Polypropylene (PP) dan Polyethylene (PE) campuran HDPE. Metode penelitian yang digunakan adalah eksperimen laboratorium dengan variasi katalis sebesar 0%, 5%, 10%, dan 15% pada suhu pirolisis 550°C selama 2 jam. Karakteristik minyak yang dianalisis meliputi nilai kalor dan viskositas. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penambahan katalis memberikan pengaruh terhadap kualitas bahan bakar cair yang dihasilkan. Nilai kalor tertinggi diperoleh pada penggunaan katalis 5% sebesar 11.521,45 cal/g, sedangkan nilai kalor pada katalis 0%, 10%, dan 15% berturut-turut sebesar 9.865,55 cal/g, 10.618,11 cal/g, dan 9.377,89 cal/g. Pada parameter viskositas, peningkatan konsentrasi katalis menyebabkan penurunan viskositas dari 1,215 mm²/s pada katalis 0% menjadi 0,652 mm²/s pada katalis 15%. Nilai viskositas yang paling mendekati standar pertalite diperoleh pada penggunaan katalis 10% sebesar 0,790 mm²/s. Hasil penelitian menunjukkan bahwa zeolit clinoptilolite efektif meningkatkan karakteristik

Diterima: June 27, 2026

Direvisi: July 21, 2026

Diterima: July 24, 2026

Diterbitkan: July 27, 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/>)

minyak pirolisis, dengan konsentrasi katalis 5% memberikan performa terbaik berdasarkan nilai kalor. Temuan ini menunjukkan bahwa pirolisis limbah plastik menggunakan katalis zeolit berpotensi menjadi alternatif pengelolaan limbah sekaligus sumber energi yang lebih bernilai dan ramah lingkungan.

Kata kunci: pirolisis; limbah plastik; polypropylene; polyethylene; zeolit clinoptilolite; nilai kalor; viskositas.

1. Pendahuluan

Sampah plastik merupakan salah satu permasalahan lingkungan yang terus meningkat di Indonesia. Berdasarkan data Sistem Informasi Pengelolaan Sampah Nasional (SIPSN) tahun 2025, sampah plastik menyumbang sekitar 19,95% dari total timbunan sampah nasional dan menjadi jenis sampah terbesar kedua setelah sampah makanan[1]. Tingginya jumlah sampah plastik disebabkan oleh meningkatnya jumlah penduduk, perkembangan industri, serta tingginya penggunaan produk berbahan plastik dalam kehidupan sehari-hari [2].

Plastik memiliki sifat yang sulit terurai secara alami sehingga dapat bertahan di lingkungan dalam waktu yang sangat lama [3]. Penanganan sampah plastik yang masih dilakukan melalui pembakaran dan penimbunan juga dapat menimbulkan dampak negatif bagi lingkungan. Pembakaran plastik menghasilkan gas berbahaya, sedangkan penimbunan dapat menyebabkan pencemaran tanah dan air. Oleh karena itu, diperlukan teknologi yang mampu mengurangi jumlah limbah plastik sekaligus memberikan nilai tambah pada limbah tersebut.

Salah satu teknologi yang dapat digunakan adalah pirolisis. Pirolisis merupakan proses penguraian material pada suhu tinggi tanpa atau dengan sedikit oksigen sehingga menghasilkan produk berupa minyak, gas, dan arang [4]. Teknologi ini dinilai efektif karena mampu mengubah limbah plastik menjadi bahan bakar cair yang berpotensi digunakan sebagai sumber energi alternatif[5].

Jenis plastik yang banyak digunakan dalam industri dan berpotensi diolah melalui pirolisis adalah Polypropylene (PP) dan Polyethylene (PE), termasuk High Density Polyethylene (HDPE). Limbah plastik jenis ini banyak ditemukan pada berbagai kegiatan industri, salah satunya industri pelapisan pipa baja. Apabila tidak dikelola dengan baik, limbah tersebut dapat menimbulkan permasalahan lingkungan.

Untuk meningkatkan kualitas minyak hasil pirolisis, dapat digunakan katalis. Salah satu katalis yang banyak digunakan adalah zeolit alam karena memiliki luas permukaan yang besar dan mampu mempercepat proses pemecahan rantai hidrokarbon[6]. Di antara berbagai jenis zeolit, clinoptilolite memiliki karakteristik yang baik sebagai katalis karena memiliki struktur pori yang teratur dan aktivitas katalitik yang tinggi [7].

Beberapa penelitian menunjukkan bahwa penggunaan zeolit dapat meningkatkan kualitas dan jumlah minyak yang dihasilkan dari proses pirolisis plastik. Namun, penelitian mengenai pengaruh variasi persentase zeolit clinoptilolite pada pirolisis limbah plastik PP dan PE campuran HDPE masih terbatas. Oleh karena itu, penelitian ini dilakukan untuk mengetahui pengaruh variasi katalis zeolit clinoptilolite terhadap karakteristik bahan bakar cair yang dihasilkan, meliputi densitas, viskositas, nilai kalor, dan yield minyak.

Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan informasi mengenai kondisi pirolisis yang optimal serta mendukung pengembangan teknologi pengolahan limbah plastik menjadi bahan bakar alternatif yang lebih ramah lingkungan dan bernilai ekonomis.

2. Tinjauan Literatur

2.1 Pirolisis

Pirolisis merupakan proses dekomposisi termal material organik maupun polimer pada kondisi tanpa atau dengan sedikit oksigen pada suhu tinggi [8]. Pada limbah plastik, proses ini memecah rantai polimer menjadi senyawa hidrokarbon yang lebih sederhana sehingga menghasilkan produk berupa minyak (bio-oil), gas, dan residu padat (char)[9]. Pirolisis menjadi salah satu teknologi yang banyak dikembangkan karena mampu mengurangi volume limbah plastik sekaligus menghasilkan bahan bakar alternatif yang bernilai ekonomi.

2.2 Plastik Polypropylene (PP)

Polypropylene (PP) merupakan plastik termoplastik yang banyak digunakan pada kemasan makanan, gelas plastik, dan berbagai produk rumah tangga [10]. PP memiliki kandungan hidrokarbon yang tinggi sehingga berpotensi menghasilkan minyak pirolisis dengan nilai kalor yang baik. Namun, sifatnya yang sulit terurai menyebabkan limbah PP menjadi salah satu sumber pencemaran lingkungan apabila tidak dikelola dengan tepat.

2.3 Plastik Polyethylene (PE)

Polyethylene (PE) merupakan jenis plastik yang banyak digunakan dalam industri maupun kebutuhan sehari-hari. Berdasarkan struktur dan kerapatannya, PE terdiri dari beberapa jenis, seperti LDPE dan HDPE[11]. Kandungan hidrokarbon yang tinggi pada PE menjadikannya bahan yang potensial untuk dikonversi menjadi bahan bakar cair melalui proses pirolisis.

2.4 Zeolit Alam (Clinoptilolite)

Clinoptilolite merupakan salah satu jenis zeolit alam yang memiliki struktur berpori, luas permukaan besar, dan kestabilan termal yang baik [12]. Sifat tersebut membuat clinoptilolite efektif digunakan sebagai katalis pada proses pirolisis karena mampu mempercepat reaksi perengkahan (cracking) rantai polimer menjadi hidrokarbon yang lebih ringan[13]. Penggunaan zeolit juga dapat meningkatkan rendemen dan kualitas minyak pirolisis yang dihasilkan.

2.5 Karakteristik Bahan Bakar Cair

Kualitas bahan bakar cair hasil pirolisis dapat dievaluasi melalui beberapa parameter fisik, yaitu densitas, viskositas, dan nilai kalor.

a). Viskositas

Viskositas merupakan salah satu parameter penting dalam karakterisasi fisik bahan bakar cair yang berfungsi untuk menentukan tingkat kekentalan fluida serta hambatan internalnya terhadap aliran pada kondisi tertentu[14].

b). Nilai Kalor

Nilai kalor merupakan jumlah energi panas yang dihasilkan dari pembakaran sempurna suatu bahan bakar. Parameter ini digunakan untuk menentukan potensi energi dari minyak hasil pirolisis dan menjadi indikator utama kualitas bahan bakar alternatif[15].

3. Metode

3.1 Rancangan Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif dengan metode eksperimen laboratorium. Metode ini diterapkan dengan memberikan perlakuan terkontrol berupa variasi komposisi katalis zeolit alam pada proses pirolisis limbah plastik PP (Polypropylene) dan PE (Polyethylene).

3.2 Alat dan Bahan

Penelitian ini menggunakan alat :

- Limbah avfal PE
- Limbah plastik PP
- Zeolit Clipnotilolite

Penelitian ini menggunakan bahan :

- Reaktor pirolisis
- Gelas beaker
- Timbang analitik
- Mortar dan Alu
- Pippet Filler
- Timbangan digital mini scale
- Viskometer ostwall

3.3 Prosedur Penelitian

Berikut merupakan prosedur pada penelitian :

- a). Limbah plastik PP (Polypropylene) dan PE (Polyethylene) dibersihkan dan dipotong kecil agar mudah diproses dalam reaktor pirolisis.
- b). Zeolit clinoptilolite di hancurkan sampai ukuran 100 mesh.
- c). Sebanyak 2 kg PP (Polypropylene) dan PE (Polyethylene) dimasukkan ke reaktor dengan variasi katalis (0%, 8%, 10%, 12%). Reaktor dipanaskan hingga 550°C dalam kondisi tertutup.
- d). Suhu 550°C ditahan sampai keluar cairan dan ditunggu selama 2 jam
- e). Hasil cair dari proses pirolisis di tampung dalam botol.
- f). Hasil cairan di uji nilai densitas
- g). Hasil cairan dilakukan pengujian nilai kalor

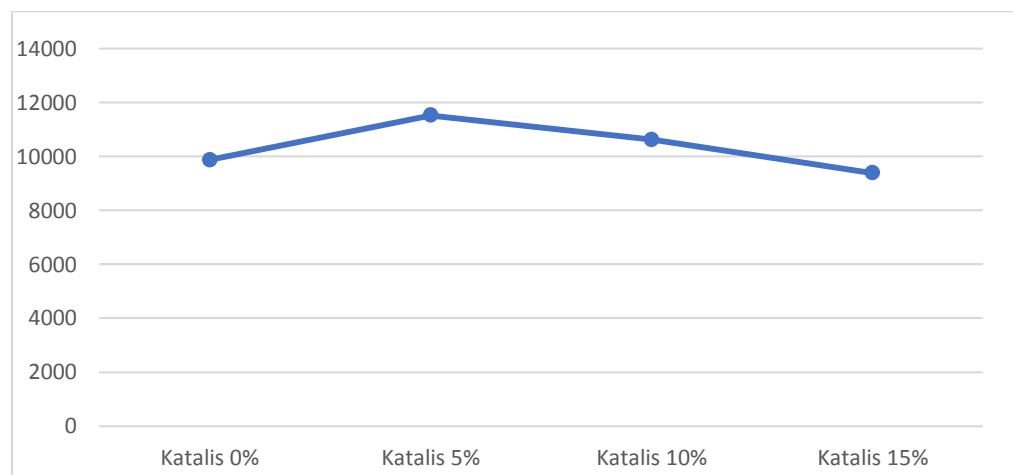
4. Hasil dan Pembahasan

Menentukan hasil pengukuran nilai kalor minyak hasil pirolisis dengan variasi katalis zeolit sebesar 0%, 5%, 10%, dan 15% dengan mengikuti standar bahan bakar pertalite dari kementerian ESDM dan DJM ditunjukkan pada **Tabel 1**. Berdasarkan hasil pengujian tersebut, nilai kalor yang dihasilkan menunjukkan adanya pengaruh variasi campuran katalis terhadap energi yang terkandung dalam minyak pirolisis.

Tabel 1. Hasil Nilai Kalor

No	Variasi Katalis	Nilai Kalor (cal/gram)	Nilai Standar ESDM dan DJM (cal/gram)
1	Katalis 0%	9865,55	10994
2	Katalis 5%	11521,45	
3	Katalis 10%	10618,11	
4	Katalis 15%	9377,89	

Bahan bakar alternatif dari sampah plastik PP dan limbah produksi avfal PE campuran HDPE yang memenuhi standar kementerian ESDM dan DJM yaitu pada katalis 5% dengan nilai 11521,45 cal/gram sedangkan dengan katalis 0%,10%, dan 15% masih belum bisa memenuhi standar yang di buat oleh kementerian ESDM dan DJM. Hasil ini menunjukkan bahwa katalis 5% sudah berhasil memberikan kontribusi terhadap peningkatan nilai kalor. Hasil dari pengujian nilai kalor jika di muat kedalam bentuk grafik sebagai berikut:



Gambar 1 Grafik Hasil Pengujia Nilai Kalor

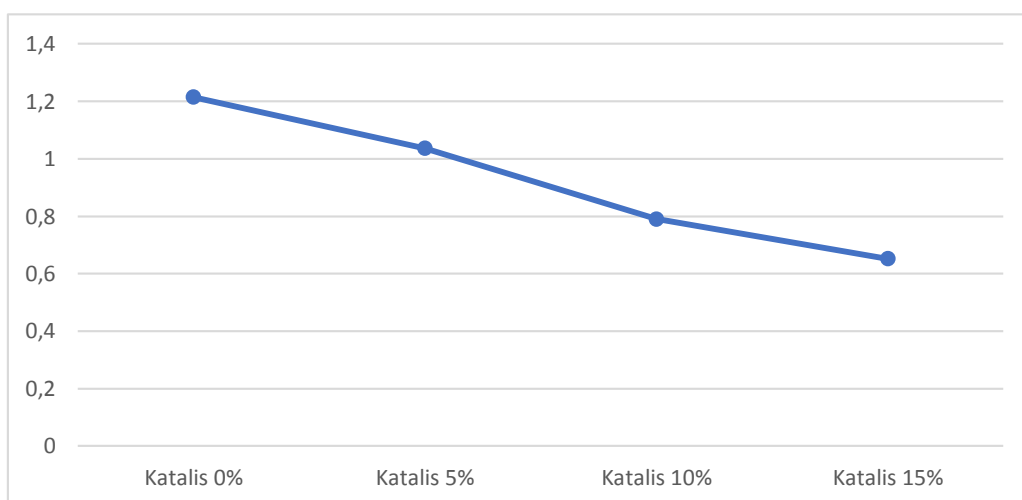
Gambar di atas menunjukkan bahwa nilai kalor mengalami penurunan pada penggunaan katalis 10% dan 15%. Menurut [16], kondisi ini disebabkan oleh terjadinya over-cracking, yaitu proses perengkahan yang terlalu intensif sehingga sebagian hidrokarbon cair terurai lebih lanjut menjadi gas ringan seperti metana, etana, dan propana. Akibatnya, fraksi hidrokarbon cair berkurang dan nilai kalor produk menurun. Hasil penelitian menunjukkan bahwa katalis 0% menghasilkan nilai kalor sebesar 9.865,55 cal/g dan katalis 15% sebesar 9.377,89 cal/g, yang masih sesuai dengan standar minyak tanah (± 9.000 cal/g). Sementara itu, katalis 10% menghasilkan nilai kalor 10.618,11 cal/g yang mendekati standar solar (± 10.348 cal/g), sedangkan katalis 5% menghasilkan nilai kalor tertinggi sebesar 11.521,45 cal/g yang sesuai dengan kisaran nilai kalor bahan bakar pertalite (± 10.994 cal/g).

Hasil visikositas kinematik diukur menggunakan alat visikometer ostwal dan hasilnya di bandingkan dengan standar nilai visikositas yang dibuat oleh kementerian ESDM dan DJM untuk bahan bakar pertalite. Hasil perhitungannya disajikan dalam bentuk Tabel 2.

Tabel 2. Hasil Nilai Visikositas

No	Variasi Katalis	Nilai Visikositas (mm ² /s)	Nilai Standar ESDM dan DJM (mm ² /s)
1	0%	1,215	0,8
2	5%	1,036	
3	10%	0,790	
4	15%	0,652	

Tabel 2. Menunjukkan bahwa katalis 0% dengan 5% sudah melebihi batas standar yang diperlukan pada bahan bakar pertalite. Hasil ini menunjukkan bahwa katalis juga berpengaruh dalam penurunan nilai visikositas pada bahan bakar alternatif sampah plastik pada proses pirolisis. Hasil nilai viskositas jika di input kedalam bentuk grafik sebagai berikut:

**Gambar 2** Hasil Perhitungan Nilai Viskositas

Gambar 2 menunjukkan hasil pengujian viskositas bahwa peningkatan konsentrasi katalis menyebabkan penurunan nilai viskositas minyak pirolisis. Nilai viskositas yang diperoleh berturut-turut untuk katalis 0%, 5%, 10%, dan 15% adalah 1,215 mm²/s; 1,036 mm²/s; 0,790 mm²/s; dan 0,652 mm²/s. Nilai viskositas tertinggi dihasilkan pada perlakuan tanpa katalis, sedangkan nilai terendah diperoleh pada penggunaan katalis 15%. Penurunan viskositas ini menunjukkan bahwa penambahan katalis mampu mempercepat pemecahan rantai polimer menjadi fraksi hidrokarbon yang lebih ringan, sehingga produk yang dihasilkan menjadi lebih encer [17]. Meskipun seluruh sampel belum sepenuhnya memenuhi standar viskositas bahan bakar berdasarkan ESDM dan DJM, perlakuan katalis 10% menghasilkan nilai viskositas sebesar 0,790 mm²/s yang paling mendekati standar viskositas pertalite, yaitu sekitar 0,8 mm²/s.

5. Kesimpulan

Penelitian ini menunjukkan bahwa variasi katalis zeolit clinoptilolite berpengaruh terhadap karakteristik minyak hasil pirolisis limbah plastik PP dan PE campuran HDPE. Penambahan

katalis mampu meningkatkan kualitas bahan bakar cair yang dihasilkan, terutama pada parameter nilai kalor dan viskositas. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penggunaan katalis 5% menghasilkan nilai kalor tertinggi sebesar 11.521,45 cal/g, yang mendekati karakteristik bahan bakar pertalite. Sementara itu, peningkatan konsentrasi katalis menyebabkan nilai viskositas cenderung menurun akibat terbentuknya fraksi hidrokarbon yang lebih ringan. Nilai viskositas yang paling mendekati standar pertalite diperoleh pada penggunaan katalis 10%, yaitu sebesar 0,790 mm²/s. Secara keseluruhan, zeolit clinoptilolite terbukti efektif sebagai katalis dalam proses pirolisis limbah plastik dan berpotensi meningkatkan kualitas bahan bakar cair yang dihasilkan. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa pemanfaatan limbah plastik melalui teknologi pirolisis dapat menjadi alternatif yang menjanjikan dalam mendukung pengelolaan limbah sekaligus menghasilkan sumber energi alternatif yang bernilai ekonomis.

Kontribusi Penulis: Konseptualisasi: Ziddan Al Fachry dan Penulis 2; Metodologi: Ziddan Al Fachry; Perangkat Lunak: Ziddan Al Fachry; Validasi: Penulis 2 dan Penulis 3; Analisis Formal: Ziddan Al Fachry; Investigasi: Ziddan Al Fachry; Sumber Daya: Penulis 2; Kurasi Data: Ziddan Al Fachry; Penulisan—Persiapan Draf Asli: Ziddan Al Fachry; Penulisan—Peninjauan dan Penyuntingan: Penulis 2 dan Penulis 3; Visualisasi: Ziddan Al Fachry; Supervisi: Penulis 2 dan Penulis 3; Administrasi Proyek: Penulis 2; Akuisisi Pendanaan: Tidak ada pendanaan eksternal. Seluruh penulis telah menyetujui naskah akhir dan bertanggung jawab atas isi penelitian.

Pendanaan: Penelitian ini tidak menerima dukungan pendanaan dari institusi, lembaga, maupun pihak eksternal lainnya. Seluruh kegiatan penelitian, termasuk perancangan penelitian, pengumpulan data, pengolahan dan analisis data, serta penyusunan naskah, dilakukan dengan pembiayaan mandiri oleh penulis. Dengan demikian, penelitian ini dilaksanakan secara independen tanpa adanya pengaruh atau kepentingan finansial yang dapat memengaruhi objektivitas hasil maupun interpretasi temuan penelitian..

Pernyataan Ketersediaan Data: Data yang mendukung temuan penelitian ini tersedia dan dapat diperoleh dari penulis korespondensi berdasarkan permintaan yang wajar. Seluruh data berasal dari hasil pengujian dan pengamatan yang dilakukan selama pelaksanaan penelitian. Tidak terdapat pembatasan terkait aspek privasi, kerahasiaan, maupun etika yang menghambat akses terhadap data tersebut untuk keperluan akademik dan penelitian

Ucapan Terima Kasih: Penulis mengucapkan terima kasih kepada Program Studi Teknik Mesin Universitas Muhammadiyah Jember atas dukungan fasilitas dan bantuan selama proses penelitian. Apresiasi juga disampaikan kepada semua pihak yang telah berkontribusi, baik secara langsung maupun tidak langsung, dalam penyelesaian penelitian dan penyusunan naskah ini.

Konflik Kepentingan: Penulis menyatakan tidak ada konflik kepentingan. Pendana tidak memiliki peran dalam desain studi; dalam pengumpulan, analisis, atau interpretasi data; dalam penulisan naskah; maupun dalam keputusan untuk menerbitkan hasil penelitian.

Referensi

- [1] A. V. Dwicaksono, M. H. Bahri, and A. Abidin, "Pengaruh Zeolit Terhadap Waktu Kondensasi Pirolisis Limbah Plastik Polypropylene," *J. Smart Teknol.*, vol. 5, no. 6, pp. 750–756, 2024.
- [2] W. Kartika, "PEMANFAATAN SAMPAH PLASTIK JENIS HDPE DAN PET SEBAGAI BAHAN BAKU PEMBUATAN BAHAN BAKAR MINYAK ALTERNATIF MENGGUNAKAN METODE PIROLISIS DENGAN KATALIS ZEOLIT ALAM: Utilization Of HDPE And PET Plastic Waste As Raw Materials For Manufacturing Alternative Fuel Using Pyrolysis Method With Natural Zeolite Catalyst," *Agroindustrial Technol. J.*, vol. 6, no. 2, pp. 106–117, 2022.
- [3] S. E. Farin, "Penumpukan Sampah Plastik Yang Sulit Terurai Berpengaruh Pada Lingkungan Hidup Yang Akan Datang," *Univ. Lambung Mangkurat, Banjarmasin*, vol. 30, 2021.

-
- [4] A. B. Pratama and E. Juwita, "KARAKTERISTIK BIOOIL DARI ECENG GONDOK SEBAGAI BAHAN BAKAR CAIR MELALUI PROSES PIROLISIS," *SINERGI POLMED J. Ilm. Tek. Mesin*, vol. 7, no. 1, pp. 46–53, 2026.
- [5] Zidane, "JURITEK : Jurnal Ilmiah Teknik Mesin , Elektro dan Komputer," 2025.
- [6] S. N. S. Ulfa and S. Samik, "Artikel review: pemanfaatan katalis zeolit alam teraktivasi dalam sintesis biodiesel dengan metode esterifikasi dan transesterifikasi," *UNESA J. Chem.*, vol. 11, no. 3, pp. 165–181, 2022.
- [7] A. Hamid, *Katalis Berbasis Zeolit: Sintesis dan Aplikasi dalam Produksi Biodiesel*. Thalibul Ilmi Publishing & Education, 2026.
- [8] B. Megaprastio, M. Syamsiro, M. A. Saputro, and F. Rina, "Teknologi Pirolisis untuk Konversi Sampah Plastik menjadi Bahan Bakar Minyak: Kajian Literatur," *J. Rekamaya Mesin*, vol. 18, no. 2, pp. 229–240, 2023.
- [9] R. Masrida and W. Kartika, "Potensi Konversi Limbah Organik dengan Metode Pirolisis Menjadi Biochar, Syngas dan Bio-Oil: Tinjauan Literatur Sistematis," *J. Eng. Environmental Energy Sci.*, vol. 4, no. 2, pp. 79–88, 2025.
- [10] S. T. Kismanti, M. B. Waluyo, and F. Asriansyah, "Analisis Pengaruh Komposisi Polypropylene (PP) Terhadap Kekuatan Impact dan Kekerasan Komposit Bermatriks Epoxy," *J. Bear. Borneo Mech. Eng. Sci.*, vol. 3, no. 1, pp. 23–28, 2024.
- [11] E. F. Hartono and N. Rachmat, "Klasifikasi jenis plastik HDPE, LDPE, dan PS berdasarkan tekstur menggunakan metode support vector machine," *JATISI*, vol. 9, no. 2, pp. 1403–1412, 2022.
- [12] D. Lestariningsih, "Potensi Zeolit Alam Indonesia Sebagai Adsorben Uap Air: Tinjauan Komparatif Berbasis Karakteristik Material," *J. Integr. Proses*, vol. 14, no. 2, pp. 336–348, 2025.
- [13] H. F. Khairi, "SINTESIS ZEOLIT-P DARI BENTONIT SEBAGAI KATALIS UNTUK PENGOLAHAN MINYAK KELAPA SAWIT MENJADI BIOHIDROKARBON DENGAN METODE PIROLISIS," 2025.
- [14] A. Widyanto, D. Rahmasari, and S. M. Hapsari, "ANALISIS VISKOSITAS PADA PRODUK BIOSOLAR YANG DI DISTRIBUSIKAN MENGGUNAKAN PIPELINE," *J. Sci. Res. Dev.*, vol. 6, no. 1, pp. 790–803, 2024.
- [15] H. Hermanto, M. H. Bahri, and A. F. PN, "Pirolisis Limbah Plastik Polypropylene Dengan Tambahan Zeolit Alam," *J. Smart Teknol.*, vol. 3, no. 2, pp. 216–223, 2022.
- [16] J. Duan *et al.*, "Coking-resistant polyethylene upcycling modulated by zeolite micropore diffusion," *J. Am. Chem. Soc.*, vol. 144, no. 31, pp. 14269–14277, 2022.
- [17] S. Fahala, A. Aziz, and R. I. Mainil, "Pengaruh katalis bentonit terhadap produksi minyak pada pirolisis sampah plastik low density polyethylene (LDPE)," pp. 157–162.