

# Zidane Alisyah Arief

## Pengaruh Penambahan Katalis Zeolit Pada Proses Pirolisis Bubble Wrap Terhadap Densitas Dan Hasil Minyak

 Quick Submit

 Quick Submit

 Universitas 17 Agustus 1945 Semarang

---

### Document Details

Submission ID

trn:oid::1:3522061136

Submission Date

Mar 30, 2026, 4:31 PM GMT+7

Download Date

Mar 30, 2026, 4:33 PM GMT+7

File Name

Zidane\_Alisyah\_Arief...docx

File Size

65.6 KB

6 Pages




2,898 Words

18,553 Characters

# 12% Overall Similarity

The combined total of all matches, including overlapping sources, for each database.

## Top Sources

- 12%  Internet sources
- 0%  Publications
- 0%  Submitted works (Student Papers)

## Integrity Flags

### 0 Integrity Flags for Review

No suspicious text manipulations found.

Our system's algorithms look deeply at a document for any inconsistencies that would set it apart from a normal submission. If we notice something strange, we flag it for you to review.

A Flag is not necessarily an indicator of a problem. However, we'd recommend you focus your attention there for further review.

## Top Sources

- 12% Internet sources
- 0% Publications
- 0% Submitted works (Student Papers)

## Top Sources

The sources with the highest number of matches within the submission. Overlapping sources will not be displayed.

1	Internet	journalcenter.org	2%
2	Internet	repository.ub.ac.id	1%
3	Internet	scholarship.law.unc.edu	1%
4	Internet	docplayer.net	<1%
5	Internet	e-journals.irapublishing.com	<1%
6	Internet	jurnal.poliupg.ac.id	<1%
7	Internet	journal.unhas.ac.id	<1%
8	Internet	www.jurnal.konselingindonesia.com	<1%
9	Internet	accedacris.ulpgc.es	<1%
10	Internet	core.ac.uk	<1%
11	Internet	etheses.uin-malang.ac.id	<1%

12	Internet	ouci.dntb.gov.ua	<1%
13	Internet	repositori.umrah.ac.id	<1%
14	Internet	www.coursehero.com	<1%
15	Internet	journal.sobraep.org.br	<1%
16	Internet	mail.joiv.org	<1%
17	Internet	jpti.journals.id	<1%
18	Internet	repositori.usu.ac.id:8080	<1%
19	Internet	eprints.uny.ac.id	<1%
20	Internet	www.stiebpkp.id	<1%
21	Internet	febrynaauroravalent.wordpress.com	<1%
22	Internet	scholarhub.ui.ac.id	<1%

# JURITEK: Jurnal Ilmiah Teknik Mesin, Elektro dan Komputer

E-ISSN: 2809-0799

P-ISSN: 2809-0802

## PENGARUH PENAMBAHAN KATALIS ZEOLIT PADA PROSES PIROLISIS BUBBLE WRAP TERHADAP DENSITAS DAN HASIL MINYAK

Zidane Alisyah Arief<sup>1</sup>, Mokh. Hairul Bahri<sup>2\*</sup>, dan Asroful Abidin<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Program Studi Teknik Mesin, Universitas Muhammadiyah Jember; e-mail : [mhairulbahri@unmuhiember.ac.id](mailto:mhairulbahri@unmuhiember.ac.id)

<sup>2</sup> Program Studi Teknik Mesin, Universitas Muhammadiyah Jember; e-mail : [Ariezid3@gmail.com](mailto:Ariezid3@gmail.com)

<sup>3</sup> Program Studi Teknik Mesin, Universitas Muhammadiyah Jember; e-mail : [asrofulabidin@unmuhiember.ac.id](mailto:asrofulabidin@unmuhiember.ac.id)

\* Penulis Korespondensi : Mokh. Hairul Bahri

**Abstract:** Bubble wrap waste made of Low-Density Polyethylene (LDPE) is difficult to degrade and poses environmental concerns. Pyrolysis is an effective method for converting plastic waste into liquid fuel. This study investigates the effect of natural zeolite (clinoptilolite) catalyst addition on the density of pyrolysis oil produced from bubble wrap waste. The pyrolysis process was carried out at temperatures of 350–400 °C with catalyst loadings of 0%, 5%, 10%, and 15%. The resulting liquid products were characterized by measuring their density using the pycnometer method. The results show that zeolite catalyst addition significantly affects the density of the pyrolysis oil. The highest density value of 0.9241 g/ml was obtained at a 5% catalyst loading. At a 10% catalyst loading, the density decreased, while at 15% it increased again. These results indicate that increasing catalyst concentration does not lead to a linear increase in oil density. Overall, a 5% zeolite catalyst loading represents the optimal condition for producing pyrolysis oil with improved physical properties.

**Keywords:** bubble wrap; pyrolysis; zeolite catalyst; density; alternative fuel

**Abstrak:** Limbah plastik bubble wrap berbahan Low-Density Polyethylene (LDPE) merupakan limbah yang sulit terurai dan berpotensi mencemari lingkungan. Pirolisis menjadi salah satu metode yang efektif untuk mengonversi limbah plastik menjadi bahan bakar cair. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh penambahan katalis zeolit alam (clinoptilolite) terhadap densitas minyak hasil pirolisis limbah bubble wrap. Proses pirolisis dilakukan pada temperatur 350–400 °C dengan variasi katalis sebesar 0%, 5%, 10%, dan 15%. Produk cair yang dihasilkan kemudian diuji densitasnya menggunakan metode piknometer. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penambahan katalis zeolit berpengaruh terhadap nilai densitas minyak pirolisis. Densitas tertinggi diperoleh pada penggunaan katalis 5% sebesar 0,9241 g/ml. Pada variasi katalis 10% densitas menurun, sedangkan pada katalis 15% densitas kembali meningkat. Hasil ini menunjukkan bahwa konsentrasi katalis tidak selalu berbanding lurus dengan peningkatan densitas minyak. Secara keseluruhan, katalis zeolit 5% merupakan kondisi optimal dalam penelitian ini.

**Kata kunci:** bubble wrap; pirolisis; katalis zeolit; densitas; bahan bakar alternatif

Diterima: February 04, 2026

Direvisi: February 22, 2026

Diterima: March 24, 2026

Diterbitkan: March 28, 2026

Versi sekarang: March 30, 2026



Hak cipta: © 2025 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

Masalah limbah plastik telah menjadi isu lingkungan yang mendesak secara global. Menurut Jebe & Park (2025), lebih dari 400 juta ton plastik diproduksi setiap tahun, dan sekitar 40% di antaranya digunakan untuk kemasan sekali pakai. Indonesia sendiri menempati peringkat ke-5 dunia sebagai penyumbang limbah plastik ke laut, dengan total sekitar 3,2 juta ton plastik yang tidak terkelola setiap tahun [2]. Salah satu jenis limbah plastik yang sulit didaur ulang adalah *bubble wrap*, bahan pelindung berbasis polietilena berdensitas rendah (LDPE). Struktur kimianya yang stabil membuat *bubble wrap* tahan terhadap degradasi alami, sehingga berkontribusi signifikan terhadap pencemaran jangka panjang.

Upaya mengatasi permasalahan limbah plastik kini beralih ke teknologi konversi termokimia, salah satunya pirolisis, yaitu proses penguraian senyawa organik menjadi fraksi minyak, gas, dan padatan melalui pemanasan tanpa oksigen. Suryani et al., (2024) mencatat bahwa teknologi pirolisis mampu mengonversi hingga 70% massa plastik menjadi bahan bakar cair dengan nilai kalor sekitar 40 MJ/kg. Namun, efisiensi proses dan kualitas produk hasil pirolisis sangat bergantung pada kondisi operasi dan jenis katalis yang digunakan. Oleh karena itu, pemanfaatan katalis menjadi kunci utama untuk meningkatkan nilai guna dan efisiensi konversi limbah plastik menjadi energi alternatif.

*Bubble wrap* yang tersusun dari LDPE menghasilkan fraksi hidrokarbon berat ketika di pirolisis tanpa katalis, sehingga produk cair cenderung memiliki viskositas tinggi dan nilai oktan rendah. Untuk mengatasi hal ini, penggunaan katalis zeolit terbukti efektif dalam mempercepat pemutusan rantai karbon dan meningkatkan fraksi hidrokarbon ringan.

Permasalahan utama dalam penelitian pirolisis bubble wrap adalah bagaimana mengoptimalkan parameter reaksi seperti suhu, waktu tinggal, dan rasio katalis terhadap bahan baku agar dihasilkan produk dengan kualitas fisik terbaik. Selain itu, karakteristik zeolit seperti ukuran pori, luas permukaan, dan keasaman sangat memengaruhi efektivitasnya dalam memutus rantai karbon panjang

## 2. Tinjauan Literatur

### 2.1. Pirolisis

Pirolisis merupakan metode *thermochemical conversion* yang efektif untuk mengubah limbah plastik menjadi bahan bakar cair, gas, dan padatan karbon (char). Proses ini berlangsung pada suhu 400–700°C tanpa oksigen, memecah ikatan C–H dan C–C pada struktur polimer menjadi molekul hidrokarbon lebih kecil [4]. Dibandingkan pembakaran atau daur ulang mekanis, pirolisis lebih ramah lingkungan karena tidak menghasilkan dioksin dan mampu menghasilkan bahan bakar bernilai kalor tinggi [5].

Berdasarkan laju pemanasan, pirolisis dibagi menjadi *slow*, *fast*, dan *flash pyrolysis*, di mana *fast pyrolysis* paling sesuai untuk LDPE karena menghasilkan fraksi cair lebih tinggi dan stabil [6]. Penggunaan katalis, terutama zeolit, berperan penting dalam mempercepat reaksi dan meningkatkan kualitas produk. Zeolit dengan struktur berpori dan sifat asamnya mampu memfasilitasi reaksi *cracking* dan *isomerisasi*, menghasilkan minyak lebih ringan serta menekan pembentukan tar [7].

### 2.2. Bubble wrap

Bubble wrap merupakan plastik pelindung kemasan berbahan dasar *Low-Density Polyethylene* (LDPE) yang memiliki struktur bergelembung berisi udara. Material ini banyak digunakan pada industri logistik, *e-commerce*, dan pengemasan elektronik karena mampu menyerap guncangan dan melindungi produk dari kerusakan [8]. Namun, LDPE bersifat sulit terurai secara alami dan membutuhkan lebih dari 500 tahun untuk terdegradasi [9], sehingga menjadi penyumbang signifikan peningkatan limbah plastik global.

### 2.3. Zeolit Alam (Clinoptilolite) sebagai Katalis

Zeolit alam merupakan mineral aluminosilikat berpori dengan struktur kristal tiga dimensi yang tersusun atas tetrahedral  $\text{SiO}_4$  dan  $\text{AlO}_4$  yang saling terhubung oleh atom oksigen bersama. Salah satu jenis zeolit alam yang paling umum dan melimpah di alam adalah clinoptilolite. Zeolit ini memiliki struktur kerangka tipe HEU (*heulandite group*) dengan rasio Si/Al antara 4–5, yang menjadikannya memiliki stabilitas termal tinggi, keasaman moderat, dan kapasitas pertukaran kation yang baik [10]. Struktur berpori zeolit clinoptilolite memungkinkan terjadinya proses adsorpsi dan difusi molekul kecil seperti hidrokarbon, sehingga sangat potensial digunakan sebagai katalis padat dalam proses pirolisis plastik.

### 2.4. Laju Pembakaran (*Burning Rate*)

Laju Pembakaran (*Burning Rate*) berperan sebagai parameter kunci yang menentukan efisiensi konversi dan produk hasil pirolisis, variasi pada kecepatan pemanasan akan memicu mekanisme pemutusan rantai polimer yang berbeda pirolisis lambat (1-10°C/menit) mendorong dekomposisi bertahap yang menghasilkan senyawa hidrokarbon berat seperti lilin [11]. Pirolisis cepat dengan laju pemanasan 100–1000 °C/menit memungkinkan transfer energi

termal yang intensif sehingga memicu pemutusan rantai polimer secara cepat dan acak, menghasilkan fraksi cair ringan dengan rendemen minyak yang lebih tinggi. Namun, kondisi ini juga berpotensi meningkatkan pembentukan gas akibat mekanisme *secondary cracking*, sehingga pemilihan laju pemanasan perlu disesuaikan dengan target produk. Secara umum, laju pemanasan menengah hingga tinggi direkomendasikan untuk memaksimalkan produksi bahan bakar cair dari HDPE [12].

### 3. Metode

#### 3.1. Rancangan Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif dengan metode eksperimen laboratorium, yaitu memberikan perlakuan terkontrol terhadap variabel bebas untuk mengetahui pengaruhnya terhadap variabel terikat. Tujuan dari penelitian ini adalah menganalisis pengaruh penambahan katalis zeolit alam terhadap sifat fisik produk hasil pirolisis limbah *bubble wrap* terhadap densitas.

#### 3.2. Alat dan Bahan

Alat :

- Reaktor Utama
- Kondensor
- Gelas Beaker
- Botol 250ml
- Gunting
- Lumpang Besi
- Timbangan
- Stopwatch
- Satu set Kompor Mawar
- Pemantik api

Bahan :

- Limbah Buble Warp
- Zeolit Alam Clinoptilolite
- Air

#### 3.3. Prosedur Penelitian

- Limbah bubble wrap dibersihkan dari berbagai perekat lalu dipotong kecil agar mudah diproses dalam reaktor pirolisis.
- Sebanyak 3 kg bubble wrap dimasukkan ke reaktor dengan variasi katalis (0%, 5%, 10%, 15%). Reaktor dipanaskan hingga 350°C - 400°C dalam kondisi tertutup tanpa udara selama 60 menit. Hasil reaksi dikondensasikan menjadi fraksi cair (minyak), padat (char), dan gas.
- Hasil cair dari proses pirolisis di tampung dalam botol lalu di lakukan pengujian berlanjut.

### 4. Hasil dan Pembahasan

Uji densitas meliputi pengukuran massa per satuan volume  $\rho = m/v$  untuk mencari kepadatan dan kemurnian. pengujian ini menggunakan alat piknometer.

Tabel 1 Berat Hasil Timbang

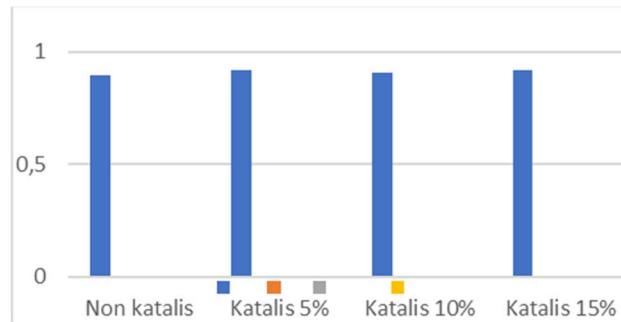
No	Sampel	Berat
1.	Piknometer kosong	19,105 g
2.	Piknometer + berat sampel non katalis	28,042 g
3.	Piknometer + berat sampel katalis 5%	28,346 g
4.	Piknometer + berat sampel katalis 10%	28,183 g
5.	Piknometer + berat sampel katalis 15%	28,270 g

Tabel di atas merupakan hasil dari penimbangan berat alat piknometer kosong dan alat piknometer yang telah berisikan sampel-sampel yang akan di uji densitas. piknometer kosong memiliki berat sebesar 19,105 g, piknometer berisi sampel non katalis memiliki berat sebesar 28,042 g, piknometer berisi sampel dengan katalis 5% memiliki berat sebesar 28,346 g, piknometer dengan isi sampel katalis 10% memiliki berat sebesar 28,183 g lalu pada piknometer dengan sampel katalis 15% memiliki berat sebesar 28,270 g. Data-data ini selanjutnya di lakukan perhitungan sesuai rumus yang telah tertera. Di mana berat piknometer yang berisi sampel di kurangi dengan berat piknometer kosong lalu di bagi dengan volume piknometer itu sendiri lalu di dapatkan hasil pada tabel berikut :

Tabel 2 Hasil Perhitungan Uji Densitas

No.	Katalis	Densitas
1.	0%	<b>0,893.7</b> g/ml
2.	5%	<b>0,924.1</b> g/ml
3.	10%	<b>0,907.8</b> g/ml
4.	15%	<b>0,916.5</b> g/ml

Berdasarkan tabel 2 di atas kandungan katalis 0% memiliki nilai densitas **0,893.7 g/ml**. Pada kandungan 5% memiliki nilai densitas 0,924.1 g/ml, pada kandungan katalis 10% memiliki nilai densitas 0,907.8 g/ml dan pada kandungan katalis 15% memiliki nilai sebesar 0,916.5 g/ml. Nilai-nilai tersebut menunjukkan bahwa kandungan katalis 5% memiliki nilai densitas yang lebih tinggi di banding dengan kandungan yang lain. Berikut disajikan data dalam bentuk grafik:



Gambar 1 Hasil Uji Densitas

Grafik di atas menyajikan hubungan antara variasi kandungan katalis terhadap nilai densitas minyak, dapat dilihat bahwa minyak tanpa katalis memiliki nilai densitas yang paling rendah dibanding dengan minyak yang di hasilkan menggunakan katalis . hal ini menunjukkan bahwa kandungan katalis mempengaruhi karakteristik fisik minyak

Pada kandungan katalis 5%, nilai densitas mengalami peningkatan yang cukup signifikan dua banding dengan kandungan katalis yang lain. peningkatan ini menunjukkan bahwa penggunaan katalis 5% mampu mempercepat reaksi pirolisis sehingga menghasilkan minyak yang lebih berat. hal ini menunjukkan bahwa kandungan 5% bekerja secara optimal.

Lalu pada konsentrasi 10%, nilai densitas yang di hasil kan mengalami penurunan di bandingkan dengan katalis 5%, meskipun masih lebih tinggi di bandingkan dengan tanpa katalis. Penurunan densitas ini disebabkan oleh terjadinya proses yang lebih intensif sehingga menghasilkan fraksi minyak yang lebih ringan.

Pada sampel dengan katalis 15%, nilai densitas kembali mengalami peningkatan namun belum melampaui sampel dengan katalis 5%. Peningkatan kembali ini menunjukkan adanya perubahan mekanisme reaksi atau distribusi fraksi hidrokarbon akibat jumlah katalis yang lebih tinggi. Secara keseluruhan, grafik tersebut menunjukkan bahwa variasi kandungan katalis tidak selalu berbanding lurus dengan kenaikan densitas minyak yang di hasilkan, Pada sampel dengan katalis 5% menghasilkan densitas tertinggi dan dapat di anggap sebagai kondisi yang paling optimal dalam penelitian ini. Pengujian laju pembakaran (burning rate) bertujuan untuk

menganalisis karakteristik pembakaran bahan bakar cair yang dihasilkan. Nilai laju pembakaran digunakan sebagai parameter kinerja bahan bakar yang mencerminkan efisiensi dan kecepatan proses pembakarannya. Sebelum pengujian, sampel minyak dipersiapkan dalam wadah standar dan dinyalakan menggunakan sumbu. Pengukuran dilakukan dengan mencatat waktu yang dibutuhkan untuk menghabiskan massa bahan bakar tertentu. Data hasil perhitungan laju pembakaran dari ketiga sampel tersebut disajikan pada Tabel 1.

## 5. Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian mengenai pengaruh penambahan katalis zeolit alam (clinoptilolite) pada proses pirolisis limbah bubble wrap terhadap densitas produk cair, dapat disimpulkan bahwa variasi persentase katalis memberikan pengaruh nyata terhadap sifat fisik minyak pirolisis yang dihasilkan. Penggunaan katalis zeolit terbukti mampu meningkatkan nilai densitas minyak dibandingkan proses pirolisis tanpa katalis, yang menunjukkan adanya perubahan komposisi fraksi hidrokarbon akibat aktivitas katalitik selama proses pirolisis.

Nilai densitas tertinggi diperoleh pada penambahan katalis zeolit sebesar 5% dengan nilai densitas sebesar 0,9241 g/ml. Kondisi ini menunjukkan bahwa pada konsentrasi tersebut, katalis bekerja secara optimal dalam mempercepat reaksi pemutusan rantai polimer dan menghasilkan fraksi hidrokarbon yang relatif lebih berat dan stabil. Pada penambahan katalis 10%, nilai densitas mengalami penurunan menjadi 0,9078 g/ml yang mengindikasikan terbentuknya fraksi hidrokarbon yang lebih ringan akibat proses cracking yang lebih intensif. Sementara itu, pada penambahan katalis 15%, densitas kembali meningkat menjadi 0,9165 g/ml, meskipun belum melampaui nilai densitas pada konsentrasi katalis 5%.

Secara keseluruhan, hasil penelitian menunjukkan bahwa peningkatan jumlah katalis tidak selalu berbanding lurus dengan peningkatan densitas minyak pirolisis. Penambahan katalis zeolit sebesar 5% dapat dianggap sebagai kondisi paling optimal dalam penelitian ini untuk menghasilkan minyak pirolisis dengan densitas tertinggi. Temuan ini menegaskan bahwa pemanfaatan katalis zeolit alam pada proses pirolisis limbah bubble wrap berpotensi meningkatkan kualitas fisik produk cair, sekaligus mendukung pengembangan teknologi pirolisis sebagai solusi alternatif dalam pengelolaan limbah plastik dan produksi bahan bakar alternatif.

**Kontribusi Penulis:** Penulis memberikan kontribusi ilmiah dalam pengembangan kajian konversi limbah plastik bubble wrap berbasis Low-Density Polyethylene (LDPE) menjadi bahan bakar cair melalui proses pirolisis dengan penambahan katalis zeolit alam. Kontribusi utama penelitian ini terletak pada analisis eksperimental pengaruh variasi persentase katalis zeolit terhadap sifat fisik produk cair hasil pirolisis, khususnya densitas sebagai indikator kualitas minyak pirolisis.

**Pendanaan:** Penelitian ini dilaksanakan secara mandiri tanpa dukungan pendanaan dari institusi pemerintah, lembaga swasta, maupun sponsor eksternal lainnya. Seluruh biaya yang berkaitan dengan pelaksanaan penelitian, termasuk pengadaan bahan, penggunaan peralatan laboratorium, pengujian sampel, pengolahan data, hingga penyusunan dan publikasi manuskrip, sepenuhnya dibiayai oleh penulis. Pernyataan ini disampaikan untuk menjamin transparansi dan menegaskan bahwa tidak terdapat pengaruh kepentingan finansial terhadap proses penelitian maupun interpretasi hasil yang dilaporkan.

**Pernyataan Ketersediaan Data:** Seluruh informasi empiris yang mendasari hasil dan pembahasan dalam penelitian ini tersedia dan dapat diakses atas permintaan kepada penulis korespondensi. Data yang disajikan diperoleh dari rangkaian eksperimen laboratorium yang dilaksanakan selama penelitian berlangsung serta tidak terikat oleh pembatasan privasi, kerahasiaan, maupun aspek etika tertentu dalam pemanfaatannya.

**Ucapan Terima Kasih:** Penulis mengucapkan terima kasih kepada Program Studi Teknik Mesin Universitas Muhammadiyah Jember atas fasilitas laboratorium dan bantuan teknis yang telah diberikan selama proses penelitian. Apresiasi juga disampaikan kepada seluruh pihak yang berperan dan mendukung, baik secara langsung maupun tidak langsung, sehingga penelitian ini dapat dilaksanakan hingga selesai dengan baik.

**Konflik Kepentingan:** Penulis memastikan bahwa penelitian ini dilakukan tanpa adanya benturan kepentingan. Tidak terdapat keterlibatan pihak pendukung dana atau pihak lain dalam

perencanaan penelitian, pelaksanaan eksperimen, pengolahan dan analisis data, penafsiran hasil, penyusunan naskah, maupun dalam keputusan untuk memublikasikan hasil penelitian.

## Referensi

- [1] R. Jebe and S. Park, "The U.N. Global Plastics Treaty: How Narrative Shapes Global Environmental Policy," *Number 1 Artic.*, vol. 50, no. 1, pp. 1–1, 2025.
- [2] K. L. H. dan Kehutanan, "Laporan Statistik Pengelolaan Sampah Nasional 2023," KLHK, Jakarta, 2023.
- [3] N. Suryani, R. Hartono, and M. Yusuf, "Economic Assessment of Plastic Waste Recycling in Indonesia: Challenges and Opportunities for LDPE," *Waste Manag. Res.*, vol. 42, no. 2, pp. 98–110, 2024, doi: 10.1177/0734242X241002123.
- [4] L. Zhang, J. Chen, and Q. Zhao, "Improving Oil Quality from Plastic Pyrolysis Using ZSM-5 Catalyst," *Waste Manag.*, vol. 165, pp. 145–156, 2023, doi: 10.1016/j.wasman.2023.02.017.
- [5] A. M. Mastral, J. M. López, and E. Esperanza, "Thermochemical Conversion Pathways of Plastic Waste: An Overview," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 162, 2022, doi: 10.1016/j.rser.2022.112424.
- [6] Y. Zhou and R. Chen, "Comparative Study of Fast and Slow Pyrolysis Mechanisms in Plastic Conversion Processes," *Fuel Process. Technol.*, vol. 254, 2024, doi: 10.1016/j.fuproc.2024.108786.
- [7] N. Singh, V. Das, and S. Mohapatra, "Recent Advances in Plastic Pyrolysis for Sustainable Energy Recovery," *J. Clean. Prod.*, vol. 438, 2024, doi: 10.1016/j.jclepro.2024.140994.
- [8] J. Li, W. Zhang, and Q. Chen, "Material Performance and Degradation Behavior of LDPE-Based Packaging Films," *Polym. Degrad. Stab.*, vol. 229, 2024, doi: 10.1016/j.polymdegradstab.2024.110678.
- [9] U. N. E. P. (UNEP), "Global Plastics Outlook 2023: Policy Scenarios to 2060," UNEP, Nairobi, 2023.
- [10] A. Corma, C. Martínez, and J. Melero, "Zeolites as Catalysts in Petrochemical and Waste-to-Energy Applications," *Catal. Rev.*, vol. 65, no. 3, pp. 289–332, 2023, doi: 10.1080/01614940.2023.2170661.
- [11] F. A. Albinil and E. D. Reinhardt, "Modeling Ignition and Burning Rate of Large Woody Natural Fuels," vol. 5, no. 2, 1995.
- [12] R. R. Mulyani, Y. Chandra, and R. W. Nita, "Human : Journal of Community and Public Service Published by HAQI Publishing Service," *Hum. J. Community Public Serv.*, vol. 2, no. 2, pp. 23–30, 2023.
- [13] Sarker, M., Hossain, M., & Rahman, M. (2022). Catalytic Conversion of LDPE into Liquid Fuel Using Zeolite Y Catalyst. *Renewable Energy*, 185, 1230–1241
- [14] Pratama, A., Wibowo, T., & Lestari, R. (2023). Pyrolysis of Bubble Wrap Plastic Waste into Liquid Fuel without Catalyst. *Indonesian Journal of Chemical Science*, 12(3), 45–53.
- [15] Lestari, R., Handayani, T., & Prasetyo, D. (2023b). Catalytic Pyrolysis of LDPE Using Natural Zeolite: Optimization and Product Characterization. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 11(7).
- [16] Guo, C., Liu, Y., & Wang, Y. (2024). Catalytic Mechanisms and Material Structure in Plastic Pyrolysis Processes. *Materials Today Chemistry*, 35. <https://doi.org/10.1016/j.mtchem.2024.102087>
- [17] Rahman, M., Sarker, M., & Uddin, M. (2024). Catalytic Pyrolysis of LDPE Waste into Liquid Fuel Using Zeolite Catalysts. *Energy Conversion and Management*, 294
- [18] Pratama, A., Wibowo, T., & Lestari, R. (2023). Pyrolysis of Bubble Wrap Plastic Waste into Liquid Fuel without Catalyst. *Indonesian Journal of Chemical Science*, 12(3), 45–53.
- [19] Lestari, R., Handayani, T., & Prasetyo, D. (2023a). Assessment of Plastic Waste Leakage into Indonesian Coastal Waters. *Marine Pollution Bulletin*, 195.
- [20] Anuar, S., Rahmi, F., & Sari, N. (2023). Enhancing Catalytic Activity of Natural Zeolite via Acid Activation for Plastic Pyrolysis Applications. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 11(4).