

# Analisis Karakteristik Fisik Piroil Polypropylene Melalui Studi Korelasi Temperatur dan Konsentrasi Katalis $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Terhadap Nilai *Density* dan Color ASTM

Muhammad Vitto Ramadhani<sup>1\*</sup>, David Bahrin<sup>2</sup>, Selpiana Selpiana<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Mahasiswa Pascasarjana Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Sriwijaya, Sumatera Selatan, Indonesia

<sup>2,3</sup>Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Sriwijaya, Sumatera Selatan, Indonesia

Corresponding Author's e-mail : [vittoramadhani4508@gmail.com](mailto:vittoramadhani4508@gmail.com)

**ARMADA**  
JURNAL PENELITIAN MULTIDISIPLIN

e-ISSN: 2964-2981

ARMADA : Jurnal Penelitian Multidisiplin

<https://ejournal.45mataram.ac.id/index.php/armada>

Vol. 04, No. 05 Mei, 2026

Page: 500-507

DOI:

<https://doi.org/10.55681/armada.v4i5.2054>

## Article History:

Received: April 03, 2026

Revised: Mei 02, 2026

Accepted: Mei 15, 2026

**Abstract** : This study analyzes the influence of temperature and catalyst concentration on the physical characteristics of pyroil derived from the vacuum pyrolysis of Polypropylene (PP) plastic waste from Company X, utilizing a  $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> catalyst and 1.7 mm material size. The research variables include operating temperatures of 350°C and 400°C with catalyst concentration variations of 0%, 2.5%, 5%, and 10%, where physical quality parameters were tested using ASTM D4052 for density and ASTM D1500 for color. The results indicate that the lowest density of 0.7705 g/cm<sup>3</sup> was achieved at 400°C with a 10% catalyst concentration, indicating optimal polymer chain cracking into light hydrocarbon fractions. However, from a visual perspective, 350°C produced a clearer oil with the lowest ASTM Color value of 1.5 at a 10% catalyst concentration, whereas 400°C showed a tendency toward darker coloration, reaching a scale of 2.5. It can be concluded that a trade-off exists between density and color clarity; while 400°C with 10% catalyst is most effective for minimizing density, 350°C with 10% catalyst yields superior visual product quality.

**Keywords** : Pyrolysis, Polypropylene,  $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Density, ASTM Color.

**Abstrak** : Penelitian ini menganalisis pengaruh temperatur dan konsentrasi katalis terhadap karakteristik fisik piroil hasil pirolisis limbah plastik *Polypropylene* (PP) dari Perusahaan X dalam kondisi vakum menggunakan katalis  $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> dan ukuran material 1,7 mm. Variabel penelitian meliputi temperatur operasi 350°C dan 400°C dengan variasi konsentrasi katalis 0%, 2,5%, 5%, serta 10%, di mana parameter kualitas fisik diuji menggunakan standar ASTM D4052 untuk densitas dan ASTM D1500 untuk warna. Hasil menunjukkan bahwa densitas terendah sebesar 0,7705 g/cm<sup>3</sup> dicapai pada kondisi 400°C dengan katalis 10%, yang mengindikasikan terjadinya perengkahan rantai polimer secara optimal menjadi fraksi hidrokarbon ringan. Namun, dari aspek visual, temperatur 350°C menghasilkan minyak yang lebih jernih dengan nilai *Color ASTM* terendah sebesar 1,5 pada konsentrasi katalis 10%, sedangkan pada temperatur 400°C terjadi kecenderungan penggelapan warna hingga mencapai skala 2,5. Dapat disimpulkan bahwa terdapat hubungan timbal balik antara densitas dan kejernihan warna, di mana penggunaan katalis 10% pada suhu 400°C paling efektif untuk meminimalkan

massa jenis, sementara suhu 350°C dengan katalis 10% memberikan hasil terbaik untuk kualitas visual produk.

**Kata Kunci** : Pirolisis, *Polypropylene*,  $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Densitas, ASTM Color

## PENDAHULUAN

Produksi dan konsumsi plastik terus meningkat, dengan polypropylene (PP) menjadi salah satu polimer utama untuk kemasan dan produk rumah tangga. Limbah PP yang sulit terurai menumpuk di lingkungan, sementara daur ulang mekanik menghadapi keterbatasan kualitas dan kebutuhan pemilahan yang ketat (Gebre dkk., 2021; Sambyal dkk., 2025; Thiounn dan Smith, 2020). Dalam konteks ekonomi sirkular, pirolisis muncul sebagai metode daur ulang kimia yang menjanjikan untuk mengubah limbah plastik menjadi minyak pirolisis, gas, dan produk bernilai tambah lain yang dapat dimanfaatkan sebagai bahan bakar atau bahan baku kimia (Gebre dkk., 2021; Palmay dkk., 2022).

Pada lingkup yang lebih spesifik, pirolisis dapat dilakukan secara termal maupun katalitik. Berbagai kajian menunjukkan bahwa penggunaan katalis pada pirolisis PP dan poliolefin lain mampu meningkatkan kuantitas dan kualitas fraksi cair, mengarahkan selektivitas ke rentang bahan bakar tertentu, serta mengurangi pembentukan kokas (Chasioti dan Zabaniotou, 2024; Sivagami dkk., 2022). Katalis, seperti zeolit atau oksida logam, menurunkan energi aktivasi, mempercepat pemutusan rantai (chain scission), dan memodifikasi jalur reaksi sehingga komposisi minyak lebih terkendali (Sivagami dkk., 2022). Suhu dipandang sebagai parameter operasi paling kritis: peningkatan suhu menggeser distribusi produk dari cair ke gas, mengubah panjang rantai hidrokarbon, dan mempengaruhi derajat degradasi (Wijayanti dkk., 2022). Pada rentang menengah (sekitar 300–450 °C), banyak studi menemukan kondisi optimum untuk pembentukan minyak, sementara pada suhu lebih tinggi terjadi pergeseran signifikan ke gas (Abbas-Abadi dkk., 2023; Faisal dkk., 2024). Dengan demikian, perbedaan suhu seperti 350 °C dan 400 °C berpotensi menghasilkan profil pemutusan rantai dan sifat minyak yang berbeda.

Meskipun banyak penelitian menitikberatkan pada optimasi yield minyak dari limbah plastik (Cai dkk., 2021A; Kusenbergh dkk., 2022), aspek kualitas fisik minyak, terutama densitas dan warna (ASTM color), relatif kurang mendapat perhatian (Abbas-Abadi dkk., 2023). Beberapa studi yang mengkarakterisasi minyak pirolisis dengan standar ASTM menunjukkan bahwa densitas, viskositas, flash point, dan indeks setana sangat menentukan kesesuaian minyak sebagai bahan bakar pengganti atau aditif (Abbas-Abadi dkk., 2023; Susanto dkk., 2024). Densitas yang terlalu tinggi berkaitan dengan fraksi rantai berat yang lebih dominan, berpotensi meningkatkan viskositas dan menyulitkan penggunaan langsung pada mesin standar (Faisal dkk., 2023; Wijayanti dkk., 2022). Sementara itu, warna minyak sering dilaporkan mulai dari kuning jernih hingga coklat gelap; perubahan ini dikaitkan dengan peningkatan kandungan senyawa aromatik, fraksi berat, dan adanya pengotor atau char tersuspensi (Novia, 2021; Palmay dkk., 2023; Susanto dkk., 2024). Warna yang lebih gelap biasanya menandakan distribusi berat molekul yang lebih berat dan kemungkinan kebutuhan pemurnian tambahan agar memenuhi spesifikasi bahan bakar (Susanto dkk., 2024).

Berdasarkan urgensi tersebut, diperlukan kajian yang tidak hanya melihat kuantitas minyak, tetapi juga bagaimana kondisi operasi, khususnya suhu pirolisis katalitik, mempengaruhi parameter fisik seperti densitas dan ASTM color. Penelitian ini dilakukan untuk mengevaluasi secara spesifik bagaimana perbedaan suhu 350 °C dan 400 °C dalam proses pirolisis katalitik polypropylene mengubah profil fisik (densitas dan warna menurut ASTM) minyak pirolisis yang dihasilkan dari olahan perusahaan X, sehingga dapat menilai dan menjamin konsistensi kualitas produk minyak yang dihasilkan dari limbah PP sebagai kandidat bahan bakar atau bahan baku kimia berkelanjutan.

## METODE PENELITIAN

Proses eksperimen diawali dengan persiapan bahan baku berupa polimer *Polypropylene* (PP) yang telah diseragamkan ukurannya menjadi partikel dengan diameter rata-rata 1,7 mm.

Penelitian ini menerapkan metode pirolisis katalitik dengan menggunakan katalis  $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$  (Gamma Alumina). Variabel bebas yang ditetapkan dalam penelitian ini meliputi variasi temperatur operasi pada  $350^\circ\text{C}$  dan  $400^\circ\text{C}$ , serta variasi konsentrasi katalis sebesar 0% (sebagai kontrol/termal), 2,5%, 5%, dan 10% terhadap berat total bahan baku. Prosedur pirolisis dilakukan di dalam sebuah unit reaktor yang dikondisikan pada tekanan vakum. Kondisi vakum ini bertujuan untuk mengoptimalkan dekomposisi termal pada suhu yang lebih rendah sekaligus meminimalkan terjadinya reaksi oksidasi sekunder. Selama proses berlangsung, uap hidrokarbon yang terbentuk dilewatkan melalui sistem pendingin (kondensor) hingga berubah fase menjadi cair (*piroil*). Produk cair tersebut kemudian ditampung di dalam botol kaca borosilikat dengan kapasitas 250 ml untuk kemudian dilakukan karakterisasi lebih lanjut. Evaluasi terhadap kualitas fisik minyak hasil pirolisis dilakukan melalui dua pengujian utama berdasarkan standar internasional. Pertama, nilai densitas sampel diukur menggunakan alat *Automatic Density Meter* yang mengacu pada standar ASTM D4052. Kedua, karakteristik visual produk dianalisis menggunakan metode ASTM D1500 untuk menentukan nilai *ASTM Color* dalam skala numerik. Data yang diperoleh dari hasil pengujian laboratorium selanjutnya diolah secara statistik dan disajikan dalam bentuk grafik korelasi. Hal ini dilakukan untuk mengidentifikasi pengaruh signifikan dari perubahan temperatur dan persentase penggunaan katalis terhadap fluktuasi nilai densitas serta gradasi warna minyak hasil pirolisis yang dihasilkan.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

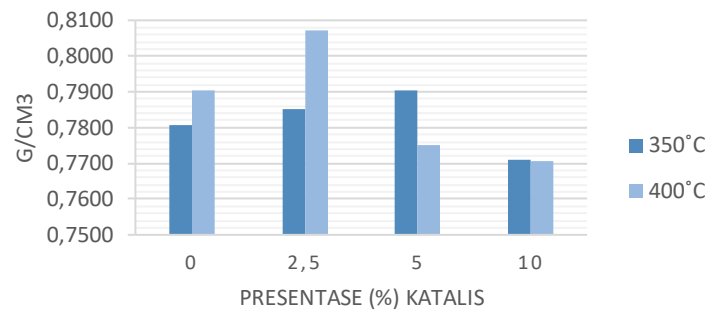
### Hasil Pengujian Nilai Densitas Piroil

**Tabel 1.** Hasil Uji Density ASTM D4052

Presentase (%)	$350^\circ\text{C}$	$400^\circ\text{C}$
0	0.7806	0.7905
2.5	0.785	0.8071
5	0.7904	0.7751
10	0.771	0.7705

Berdasarkan data hasil pengujian densitas yang disajikan pada Tabel 1, terlihat adanya fluktuasi nilai yang dipengaruhi secara signifikan oleh temperatur operasional dan persentase katalis. Pada temperatur  $350^\circ\text{C}$ , nilai densitas awalnya mengalami kenaikan seiring bertambahnya katalis dari 0% hingga 5%, dengan nilai tertinggi mencapai 0,7904 (Selpiana dkk., 2023). Namun, kondisi berbeda ditemukan pada temperatur  $400^\circ\text{C}$ , di mana nilai densitas mencapai titik tertinggi sebesar 0,8071 pada konsentrasi katalis yang lebih rendah, yaitu 2,5% (Papari dkk., 2021). Secara umum, temperatur  $400^\circ\text{C}$  memberikan energi termal yang lebih besar untuk proses degradasi, namun tanpa jumlah katalis yang optimal, densitas yang dihasilkan cenderung lebih tinggi dibandingkan pada suhu rendah (Almohamadi dkk., 2021).

Peran katalis sebagai agen perengkah (*cracking*) paling efektif pada konsentrasi 10% di kedua variasi suhu. Pada kondisi ini, densitas mengalami penurunan signifikan hingga 0,771 pada  $350^\circ\text{C}$  dan mencapai nilai terendah 0,7705 pada  $400^\circ\text{C}$ , menunjukkan peningkatan efektivitas proses *cracking* seiring peningkatan suhu reaksi (Maulina dkk., 2020). Penurunan nilai densitas pada penggunaan katalis maksimal ini mengindikasikan terjadinya pemutusan rantai polimer *Polypropylene* menjadi fraksi hidrokarbon yang lebih ringan dan pendek. Dengan demikian, kombinasi temperatur  $400^\circ\text{C}$  dan konsentrasi katalis 10% merupakan kondisi operasi paling optimal dalam penelitian ini untuk menghasilkan piroil dengan karakteristik massa jenis yang paling ringan (Roschat dkk., 2024).

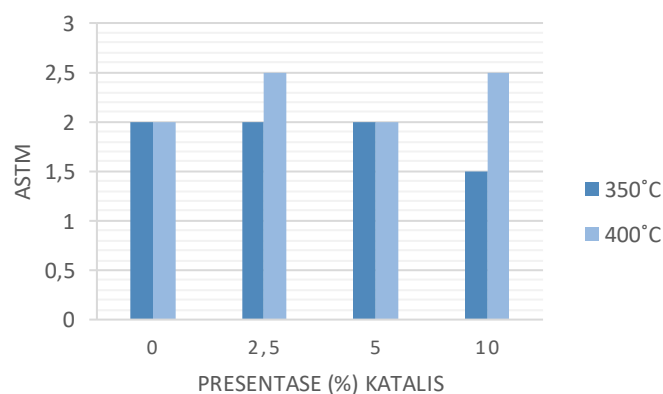
**Gambar 1.** Grafik Hasil Uji Density ASTM D4052

Berdasarkan Gambar 1 mempertegas tren perubahan densitas yang terjadi pada kedua variasi temperatur operasional. Grafik tersebut menunjukkan bahwa pada kondisi katalis rendah (0% hingga 2,5%), pirolisis dengan suhu tinggi (400°C) secara konsisten menghasilkan densitas yang lebih besar dibandingkan suhu 350°C (Pyo dkk., 2021). Namun, titik balik efektivitas katalitik terlihat jelas pada persentase katalis 5% dan 10%, di mana grafik batang untuk suhu 400°C menurun drastis hingga berada di bawah nilai densitas suhu 350°C (Chen dkk., 2023). Hal ini membuktikan adanya sinergi antara peningkatan temperatur dan konsentrasi katalis dalam mendorong reaksi perengkahan yang lebih sempurna, menghasilkan piroil dengan massa jenis paling ringan pada titik optimal 10% katalis di suhu 400°C (Papuga dkk., 2024).

**Tabel 2.** Hasil Uji Color ASTM D1500

Presentase (%)	350°C	400°C
0	2	2
2,5	2	2,5
5	2	2
10	1,5	2,5

Selain parameter densitas, kualitas visual piroil yang diukur berdasarkan standar ASTM D1500 pada Tabel 2 juga menunjukkan korelasi yang erat dengan kondisi operasi pirolisis (Sambyal dkk., 2025). Pada temperatur 350°C, kualitas warna produk cenderung stabil pada skala 2, bahkan mencapai kejernihan tertinggi dengan nilai 1,5 pada konsentrasi katalis 10% (Yao dkk., 2021). Sebaliknya, pada temperatur 400°C, terjadi kecenderungan penggelapan warna menjadi skala 2,5 pada konsentrasi katalis 2,5% dan 10% (Selpiana dkk., 2023). Fenomena ini mengindikasikan bahwa meskipun suhu tinggi efektif dalam menurunkan densitas melalui perengkahan yang lebih intensif, kondisi tersebut juga memicu reaksi sekunder atau pembentukan senyawa aromatik dan partikel karbon halus yang meningkatkan intensitas warna minyak hasil pirolisis (Peng dkk., 2022).

**Gambar 2.** Hasil Uji Color ASTM D1500

Berdasarkan Gambar 2, grafik hasil uji *Color ASTM D1500* memberikan gambaran yang lebih jelas mengenai stabilitas dan perubahan warna piroil pada berbagai kondisi operasi (Cai dkk., 2024). Pada temperatur 350°C, grafik menunjukkan tren warna yang sangat stabil dengan nilai ASTM 2 pada sebagian besar variasi, namun mengalami penurunan nilai menjadi 1,5 pada konsentrasi katalis 10%, yang menandakan tingkat kejernihan minyak paling optimal (Rex dkk., 2020). Sebaliknya, pada temperatur 400°C, grafik batang menunjukkan fluktuasi warna yang lebih tinggi, di mana penggunaan katalis 2,5% dan 10% menyebabkan kenaikan nilai warna ke skala 2,5. Hal ini mempertegas analisis bahwa meskipun suhu 400°C efektif untuk mendapatkan densitas rendah, terdapat kecenderungan peningkatan intensitas warna (menjadi lebih gelap) yang kemungkinan dipicu oleh laju degradasi termal yang lebih agresif pada suhu tinggi tersebut (Song dkk., 2022).

### Pembahasan

Berdasarkan hasil pengujian kualitas fisik piroil, interaksi antara temperatur dan konsentrasi katalis  $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$  terbukti memberikan pengaruh yang signifikan terhadap nilai densitas dan karakteristik warna produk (Cai dkk., 2021B). Data pada Tabel 1 dan visualisasi pada Gambar 1 menunjukkan bahwa pada kondisi katalis rendah (0% hingga 2,5%), kenaikan temperatur dari 350°C ke 400°C justru menyebabkan peningkatan nilai densitas, dengan titik tertinggi mencapai 0,8071 g/cm<sup>3</sup> pada suhu 400°C dengan katalis 2,5% (Selpiana dkk., 2023). Namun, efektivitas katalitik mulai mendominasi ketika konsentrasi ditingkatkan menjadi 5% dan 10%, di mana pada suhu 400°C terjadi penurunan densitas yang lebih drastis dibandingkan pada suhu 350°C (Nasser dkk., 2022). Hal ini mencapai puncaknya pada penggunaan katalis 10% di suhu 400°C yang menghasilkan piroil dengan massa jenis paling ringan, yaitu 0,7705 g/cm<sup>3</sup>, mengindikasikan terjadinya perengkahan rantai polimer *Polypropylene* menjadi molekul hidrokarbon yang lebih pendek secara lebih optimal (Li dkk., 2021).

Pada hasil uji parameter warna yang disajikan pada Tabel 2 dan Gambar 2 menunjukkan bahwa kejernihan piroil dipengaruhi oleh intensitas degradasi termal. Pada temperatur 350°C, piroil cenderung memiliki warna yang lebih stabil dan jernih, bahkan mencapai nilai *Color ASTM* terendah sebesar 1,5 pada konsentrasi katalis 10% (Naser dkk., 2021). Sebaliknya, pada temperatur 400°C, meskipun densitas produk lebih rendah, terjadi kecenderungan penggelapan warna menjadi skala 2,5 pada beberapa variasi katalis (Cai dkk., 2021B). Fenomena ini menunjukkan adanya *trade-off* di mana penggunaan energi panas yang lebih tinggi pada 400°C mampu menghasilkan minyak yang lebih encer dan ringan, namun meningkatkan risiko terbentuknya senyawa aromatik atau sisa karbon yang memperlambat gradasi warna produk (Papari dkk., 2021). Secara keseluruhan, suhu 400°C dengan katalis 10% merupakan kondisi terbaik untuk mencapai densitas minimum, sementara suhu 350°C dengan katalis 10% memberikan hasil terbaik dari aspek kejernihan visual (Li dkk., 2022).

### KESIMPULAN DAN SARAN

Penelitian mengenai pirolisis katalitik *Polypropylene* (PP) menggunakan katalis  $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$  menunjukkan bahwa variasi temperatur dan konsentrasi katalis memberikan pengaruh signifikan terhadap karakteristik fisik piroil yang dihasilkan. Berdasarkan pengujian densitas mengacu pada ASTM D4052, ditemukan bahwa kondisi paling optimal untuk menghasilkan minyak dengan massa jenis paling ringan sebesar 0,7705 g/cm<sup>3</sup> adalah pada temperatur 400°C dengan konsentrasi katalis 10%. Tren data menunjukkan bahwa meskipun pada konsentrasi katalis rendah suhu tinggi cenderung meningkatkan densitas, penggunaan katalis pada tingkat maksimal (10%) secara efektif memicu perengkahan rantai polimer menjadi fraksi hidrokarbon yang lebih pendek dan ringan pada kedua variasi suhu. Dari aspek kualitas visual berdasarkan standar ASTM D1500, hasil penelitian menyimpulkan bahwa temperatur yang lebih rendah (350°C) cenderung menghasilkan piroil dengan tingkat kejernihan yang lebih baik dan stabil. Nilai *Color ASTM* terendah sebesar 1,5 yang merepresentasikan warna kuning jernih diperoleh pada suhu 350°C dengan katalis 10%. Sebaliknya, peningkatan suhu menjadi 400°C pada variasi katalis tertentu memicu kenaikan nilai warna menjadi 2,5. Hal ini mengindikasikan adanya reaksi sekunder atau

pembentukan senyawa kompleks yang menyebabkan gradasi warna menjadi sedikit lebih pekat pada kondisi operasi yang lebih panas.

Secara keseluruhan, dapat disimpulkan bahwa terdapat hubungan timbal balik (*trade-off*) antara parameter densitas dan warna dalam proses pirolisis katalitik ini. Jika target produksi adalah untuk mendapatkan piroil dengan densitas minimum yang mendekati karakteristik bahan bakar ringan, maka kondisi suhu 400°C dengan katalis 10% adalah yang terbaik. Namun, jika kejernihan visual dan stabilitas warna menjadi prioritas utama, maka suhu 350°C dengan konsentrasi katalis yang sama memberikan hasil yang lebih unggul. Keberhasilan penurunan densitas hingga menyentuh angka 0,77 g/cm<sup>3</sup> membuktikan bahwa katalis  $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> memiliki performa yang sangat baik dalam meningkatkan kualitas produk cair dari limbah plastik PP. Sebagai saran untuk pengembangan penelitian selanjutnya, perlu dilakukan analisis lebih mendalam mengenai komposisi kimia melalui pengujian *Gas Chromatography-Mass Spectrometry* (GC-MS) guna mengidentifikasi jenis senyawa hidrokarbon spesifik yang terbentuk pada setiap variasi suhu. Selain itu, disarankan untuk melakukan pengujian parameter lain seperti nilai kalor, titik nyala (*flash point*), dan viskositas kinematik agar dapat dipetakan kesesuaian piroil hasil Perusahaan X ini dengan standar bahan bakar minyak komersial secara lebih komprehensif.

#### DAFTAR PUSTAKA

- Abbas-Abadi, M.S., Kusenberg, M., Zayoud, A., Roosen, M., Vermeire, F., Madanikashani, S., Kuzmanović, M., Parvizi, B., Kresovic, U., De Meester, S., dan Van Geem, K.M. 2023. Thermal pyrolysis of waste versus virgin polyolefin feedstocks: The role of pressure, temperature and waste composition. *Waste Management*. 165: 108–118.
- Almohamadi, H., Aljabri, A., Mahmoud, E.R.I., dan Khan, S.Z. 2021. Catalytic Pyrolysis of Municipal Solid Waste : Effects of Pyrolysis Parameters. 16:2: 342–352.
- Cai, N., Li, X., Xia, S., Sun, L., Hu, J., Bartocci, P., Fantozzi, F., Williams, P.T., Yang, H., dan Chen, H. 2021A. Pyrolysis-catalysis of different waste plastics over Fe/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> catalyst: High-value hydrogen, liquid fuels, carbon nanotubes and possible reaction mechanisms. *Energy Conversion and Management*. 229: 113794.
- Cai, N., Xia, S., Li, X., Sun, L., Bartocci, P., Fantozzi, F., Zhang, H., Chen, H., Williams, P.T., dan Yang, H. 2021B. Influence of the ratio of Fe / Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> on waste polypropylene pyrolysis for high value-added products. *Journal of Cleaner Production*. 315:January: 128240.
- Cai, W., Kumar, R., Zhu, Z., Varjani, S., dan Hu, Z. 2024. Next Sustainability Catalytic pyrolysis of polypropylene waste for liquid fuels production using Ni / Al-MOF-derived catalysts. *Next Sustainability*. 4:May: 100059.
- Chasioti, A., dan Zabaniotou, A. 2024. An Industrial Perspective for Sustainable Polypropylene Plastic Waste Management via Catalytic Pyrolysis—A Technical Report. *Sustainability*. 16:14: 5852.
- Chen, W.H., Pratim Biswas, P., Kwon, E.E., Park, Y.K., Rajendran, S., Gnanasekaran, L., dan Chang, J.S. 2023. Optimization of the process parameters of catalytic plastic pyrolysis for oil production using design of experiment approaches: A review. *Chemical Engineering Journal*. 471:May: 144695.
- Faisal, F., Rasul, M.G., Chowdhury, A.A., dan Jahirul, M.I. 2024. Optimisation of Process Parameters to Maximise the Oil Yield from Pyrolysis of Mixed Waste Plastics. *Sustainability*. 16:7: 2619.
- Faisal, F., Rasul, M.G., Jahirul, M.I., dan Schaller, D. 2023. Pyrolytic conversion of waste plastics to energy products: A review on yields, properties, and production costs. *Science of the Total Environment*. 861:November 2022: 160721.
- Gebre, S.H., Sendeku, M.G., dan Bahri, M. 2021. Recent Trends in the Pyrolysis of Non-Degradable Waste Plastics. *ChemistryOpen*. 10:12: 1202–1226.
- Kusenberg, M., Roosen, M., Zayoud, A., Djokic, M.R., Dao Thi, H., De Meester, S., Ragaert, K., Kresovic, U., dan Van Geem, K.M. 2022. Assessing the feasibility of chemical recycling via steam cracking of untreated plastic waste pyrolysis oils: Feedstock impurities, product yields and coke formation. *Waste Management*. 141: 104–114.
- Li, N., Liu, H., Cheng, Z., Yan, B., Chen, G., dan Wang, S. 2022. Conversion of plastic waste into

- fuels: A critical review. *Journal of Hazardous Materials*. 424:135: 1–12.
- Li, Z., Wang, D., Shen, J., Chen, J., Wu, C., Qu, Z., Luo, K., Meng, Z., dan Li, Y. 2021. Study on the synthesis of high-purity  $\gamma$ -phase mesoporous alumina with excellent CO<sub>2</sub> adsorption performance via a simple method using industrial aluminum oxide as raw material. *Materials*. 14:19: 1–17.
- Maulina, S., Amalia, R., dan R Kamny, E. 2020. Effect of pyrolysis temperature and time on liquid smoke characteristics. *E3S Web of Conferences*. 148: 2019–2021.
- Naser, J., Avbenake, O.P., Dabai, F.N., dan Jibril, B.Y. 2021. Regeneration of spent bleaching earth and conversion of recovered oil to biodiesel. *Waste Management*. 126: 258–265.
- Nasser, M., Megahed, T.F., Ookawara, S., dan Hassan, H. 2022. A review of water electrolysis-based systems for hydrogen production using hybrid/solar/wind energy systems. *Environmental Science and Pollution Research*. 29:58: 86994–87018.
- Novia, T. 2021. Pengolahan Limbah Sampah Plastik Polyethylene Terephthalate (PET) Menjadi Bahan Bakar Minyak dengan Proses Pirolisis. *GRAVITASI: Jurnal Pendidikan Fisika dan Sains*. 4:01: 33–41.
- Palmay, P., Haro, C., Huacho, I., Barzallo, D., dan Bruno, J.C. 2022. Production and Analysis of the Physicochemical Properties of the Pyrolytic Oil Obtained from Pyrolysis of Different Thermoplastics and Plastic Mixtures. *Molecules*. 27:10: 3287.
- Palmay, P., Medina, C., Donoso, C., Barzallo, D., dan Bruno, J.C. 2023. Catalytic pyrolysis of recycled polypropylene using a regenerated FCC catalyst. *Clean Technologies and Environmental Policy*. 25:5: 1539–1549.
- Papari, S., Bamdad, H., dan Berruti, F. 2021. Pyrolytic Conversion of Plastic Waste to Value-Added Products and Fuels: A Review. *Materials*. 14:10: 2586.
- Papuga, S., Savković, J., Djurdjevic, M., dan Cipriotti, S.V. 2024. Effect of Feed Mass, Reactor Temperature, and Time on the Yield of Waste Polypropylene Pyrolysis Oil Produced via a Fixed-Bed Reactor. *Polymers*. 16:10: 1302.
- Peng, Y., Wang, Y., Ke, L., Dai, L., Wu, Q., Cobb, K., Zeng, Y., Zou, R., Liu, Y., dan Ruan, R. 2022. A review on catalytic pyrolysis of plastic wastes to high-value products. *Energy Conversion and Management*. 254:December 2021: 115243.
- Pyo, S., Kim, Y.-M., Park, Y., Lee, S.B., Yoo, K.-S., Ali Khan, M., Jeon, B.-H., Jun Choi, Y., Hoon Rhee, G., dan Park, Y.-K. 2021. Catalytic pyrolysis of polypropylene over Ga loaded HZSM-5. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*. 103: 136–141.
- Rex, P., Masilamani, I.P., dan Miranda, L.R. 2020. Microwave pyrolysis of polystyrene and polypropylene mixtures using different activated carbon from biomass. *Journal of the Energy Institute*. 93:5: 1819–1832.
- Roschat, W., Phewphong, S., Inthachai, S., Donpamee, K., Phudeetip, N., Leelatam, T., Moonsin, P., Katekaew, S., Namwongsa, K., Yoosuk, B., Janetaisong, P., dan Promarak, V. 2024. A highly efficient and cost-effective liquid biofuel for agricultural diesel engines from ternary blending of distilled Yang-Na (*Dipterocarpus alatus*) oil, waste cooking oil biodiesel, and petroleum diesel oil. *Renewable Energy Focus*. 48:October 2023: 100540.
- Sambyal, P., Najmi, P., Sharma, D., Khoshbakhti, E., Hosseini, H., Milani, A.S., dan Arjmand, M. 2025. Plastic recycling: Challenges and opportunities. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*. 103:6: 2462–2498.
- Selpiana, S., Haryati, S., Bustan, M.D., Muqoffa, L., dan Najib, M. 2023. DEGRADATION OF NATURAL RUBBER INTO AROMATIC. 16:3: 1818–1825.
- Sivagami, K., Kumar, K. V., Tamizhdurai, P., Govindarajan, D., Kumar, M., dan Nambi, I. 2022. Conversion of plastic waste into fuel oil using zeolite catalysts in a bench-scale pyrolysis reactor. *RSC Advances*. 12:13: 7612–7620.
- Song, J., Wang, J., Pan, Y., Du, X., Sima, J., Zhu, C., Lou, F., dan Huang, Q. 2022. Catalytic pyrolysis of waste polyethylene into benzene, toluene, ethylbenzene and xylene (BTEX)-enriched oil with dielectric barrier discharge reactor. *Journal of Environmental Management*. 322:September: 116096.
- Susanto, H., Budi Setio Aji, Maharani Dewi Solikhah, Bagus Anang Nugroho, Mawardi, R., Helena

- Lina Susilawati, Cahyono, T., Wahyuni, T., Nugroho Adi Sasongko, dan Martini, T. 2024. Fuel Characteristics of Pyrolysis Oil from Plastic Waste: A Case Study of Banjarnegara Waste Bank. *Evergreen*. 11:3: 2404–2414.
- Thiounn, T., dan Smith, R.C. 2020. Advances and approaches for chemical recycling of plastic waste. *Journal of Polymer Science*. 58:10: 1347–1364.
- Wijayanti, W., Musyaroh, M., dan Sasongko, M.N. 2022. Low-Density Polyethylene Plastic Waste to Liquid Fuel Using Pyrolysis Method: An Effect of Temperatures on the Oil Yields Physicochemical Properties. *Journal of Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems*. 10:3: 1–18.
- Yao, D., Li, H., Dai, Y., dan Wang, C. 2021. Impact of temperature on the activity of Fe-Ni catalysts for pyrolysis and decomposition processing of plastic waste. 408:July 2020.