

Karakteristik Hasil Co-Pyrolysis dari Limbah Plastik dan Oli Bekas

Dianta Mustofa Kamal^{1,a}, Shafa Amatullah Fatin^{2,b}, Dede Muhamad Ilyas^{3,c},
Iwan Susanto^{4,d}, Sonki Prasetya^{5,e}, Ghany Heryana^{6,f}

^{1,2} Program Studi Magister Terapan Teknologi Manufaktur, Politeknik Negeri Jakarta, Jl. Prof. G. A. Siwabessy, Kampus UI, Depok, Indonesia

^{3,4,5} Program Studi Pembangkit Tenaga Listrik, Jurusan Teknik Mesin, Politeknik Negeri Jakarta, Jl. Prof. G.A. Siwabessy, Kampus UI, Depok, Indonesia

⁶ Departemen Teknik Mesin, Fakultas Teknik, STT Wastukencana, Indonesia

^a dianta@pnj.ac.id, ^b ghany.heryana@president.ac.id

Abstrak.

Penelitian ini bertujuan untuk memanfaatkan limbah plastik jenis Low Density Polyethylene (LDPE) dan pelumas bekas menjadi bahan bakar cair alternatif melalui metode co-pyrolysis. Proses *co-pyrolysis* dilakukan dengan berbagai rasio campuran sampah plastik LDPE dan pelumas bekas, yaitu 5:0, 5:1, 5:2, 5:3, dan 5:4, pada rentang temperatur 160°C hingga 330°C selama 1 jam. Karakteristik produk cair yang dihasilkan diuji untuk menentukan nilai kalor, densitas, dan viskositas. Hasil penelitian menunjukkan bahwa nilai kalor meningkat dengan penambahan pelumas bekas, mencapai 11.061,67 kal/g pada komposisi 5:4. Densitas rata-rata produk cair adalah 0,8686 g/mL, berada dalam kisaran densitas bahan bakar solar. Viskositas produk cair juga memenuhi standar gasolin dengan nilai rata-rata <1 cSt. Efisiensi dihitung berdasarkan perbandingan jumlah produk cair yang dihasilkan dengan energi yang digunakan selama proses, menunjukkan efisiensi tertinggi sebesar 9,14 mL/kWh pada komposisi 5:4. Efisiensi yield tertinggi mencapai 9,14 mL/kWh pada komposisi 5:4 dengan efisiensi sebesar 1,93%, menunjukkan potensi signifikan dalam menghasilkan bahan bakar cair yang efisien energi. Penelitian ini memberikan wawasan baru tentang pemanfaatan limbah plastik dan pelumas bekas sebagai alternatif bahan bakar cair yang ramah lingkungan.

Kata kunci: plastik, *co-pyrolysis*, pelumas mesin bekas, bahan bakar cair, efisiensi energi

Abstract.

This study aims to utilize low-density polyethylene (LDPE) plastic waste and used engine oil to produce alternative liquid fuel through the co-pyrolysis method. The co-pyrolysis process was carried out with various ratios of LDPE plastic waste and used engine oil, specifically 5:0, 5:1, 5:2, 5:3, and 5:4, within a temperature range of 165°C to 177°C for 1 hour. The characteristics of the resulting liquid products were tested to determine their calorific value, density, and viscosity. The results showed that the calorific value increased with the addition of used engine oil, reaching 11,061.67 cal/g at a 5:4 composition. The liquid products had an average density of 0.8686 g/mL, which was within the range of diesel fuel density. The viscosity of the liquid products also met gasoline standards, with an average value of <1 cSt. The highest yield efficiency reached 9.14 mL/kWh at a 5:4 composition with an efficiency of 1.93%, indicating significant potential in producing energy-efficient liquid fuel. This study sheds new light on the use of plastic waste and engine oil as environmentally friendly alternative liquid fuels.

Keywords: plastic, *co-pyrolysis*, used engine oil, liquid fuel, energy efficiency.

Pendahuluan

Latar Belakang

Kenaikan dari penggunaan plastik hingga tahun 2015 mengalami peningkatan dan tercatat sebanyak 300 juta ton sampah plastik di dunia [1]. Pada tahun 2019 total sampah di Indonesia mencapai 68 juta ton dan 14% atau sekitar 9,52 juta berasal dari sampah plastik [2]. Tingginya timbunan sampah di tempat pembuangan akhir (TPA) menjadi salah satu indikator bahwa penanganan sampah tidak mudah dan diperlukan mekanisme yang tepat [3]. Metode yang digunakan untuk mengatasi permasalahan sampah plastik adalah metode landfill dan inceneration, tetapi kedua metode ini belum efektif karena dapat menimbulkan permasalahan baru pada lingkungan [4]. Penanganan sampah plastik yang banyak dikembangkan saat ini adalah dengan mengkonversi menjadi bahan bakar cair melalui metode pirolisis [5].

Pirolisis yaitu proses dekomposisi suatu bahan atau material organik maupun anorganik dengan pemanasan pada temperatur tinggi tanpa disertai oksigen atau dengan sedikit oksigen [6]. Di samping adanya permasalahan sampah plastik bahwa terdapat pelumas bekas yang berasal dari kendaraan bermotor. Pelumas bekas merupakan limbah yang tidak ramah terhadap lingkungan karena termasuk bahan berbahaya dan beracun (B3) [7]. Tingginya jumlah pelumas bekas sejalan dengan meningkatnya jumlah kendaraan di tiap kota dan daerah sehingga penggunaannya mengalami peningkatan dari tahun ke tahun [8].

Pada penelitian ini sebagai upaya pemanfaatan sampah plastik dan pelumas bekas yaitu dengan metode *co-pyrolysis* pada sampah plastik jenis *Low Density Polyethylene* (LDPE) dan pelumas bekas. Adanya metode ini mampu meningkatkan kualitas dan karakteristik produk cair pirolisis yang dihasilkan [9]. Penggunaan sampah plastik LDPE karena mudah diperoleh, lebih cepat pada saat pemanasan, dan mampu menghasilkan produk cair yang lebih banyak daripada jenis sampah plastik lainnya [10]. Pemanfaatan kedua limbah ini apabila ditinjau dari bahan baku utamanya berasal dari minyak bumi [11]. Sehingga kandungan energi pada sampah plastik dan pelumas bekas dapat dimanfaatkan menjadi bahan bakar cair alternatif melalui metode *co-pyrolysis* [12].

Adapun tujuan dari penelitian ini adalah memanfaatkan limbah plastik dan pelumas bekas menjadi bahan bakar cair dan menentukan karakteristik produk cair yang dihasilkan berdasarkan parameter nilai kalor, densitas, dan viskositas.

Landasan Teori

Plastik merupakan material makromolekul yang dibentuk melalui proses polimerisasi [13]. Polimerisasi merupakan gabungan beberapa molekul melalui sebuah proses kimia agar menjadi makromolekul dengan unsur utama terdiri dari karbon (C) dan hidrogen (H) [14]. Secara umum plastik dikelompokkan menjadi dua jenis, yaitu *thermoplastic* dan *thermosetting* [15]. *Thermoplastic* adalah jenis plastik ketika dipanaskan pada temperatur tertentu akan mengalami perubahan bentuk menjadi cair dan dapat dibentuk menjadi bentuk yang lain [16]. Kemudian *thermosetting* merupakan plastik yang tidak dapat dicairkan dengan perlakuan panas [17]. Beberapa sifat termal yang harus diketahui pada saat daur ulang plastik adalah titik lebur (T_m), temperatur transisi (T_g), dan temperatur dekomposisi [18].

Jenis plastik yang banyak digunakan salah satunya adalah *Low Density Polyethylene* (LDPE) yang memiliki karakteristik lentur dan kuat [19]. Jenis plastik ini diproduksi pada temperatur tinggi antara 200 °C sampai 300 °C dan tekanan etilena superkritis 130 Mpa sampai 260 Mpa. Plastik LDPE memiliki rantai panjang dan bercabang dengan massa jenis antara 0,915 g/cm³ sampai 0,925 g/cm³ [20].

Metode yang digunakan dalam mengatasi sampah plastik adalah pirolisis [21]. Pirolisis merupakan proses dekomposisi bahan atau material organik maupun anorganik dengan pemanasan pada temperatur tinggi dengan sedikit oksigen atau tanpa oksigen [22]. Pada proses pirolisis material atau bahan akan mengalami pemecahan struktur kimia menjadi fase gas [23]. Kemudian gas akan

mengalir melalui media besi dan didinginkan hingga terjadi perubahan wujud dari gas menjadi cair [6]. Untuk meningkatkan perolehan produk hasil pirolisis dilakukan *co-pyrolysis*.

Co-pyrolysis merupakan metode yang digunakan dengan menggunakan dua atau lebih bahan baku yang digunakan karena mampu meningkatkan karakteristik produk cair pirolisis baik jumlah *yield* produk cair, jumlah kadar air yang lebih sedikit, dan nilai kalor yang lebih tinggi [9]. Adapun beberapa faktor yang mempengaruhi proses pirolisis berlangsung adalah durasi yang dibutuhkan selama proses pirolisis berlangsung, temperatur pemanasan pada reaktor, ukuran partikel bahan baku, dan massa atau jumlah bahan baku yang digunakan [6].

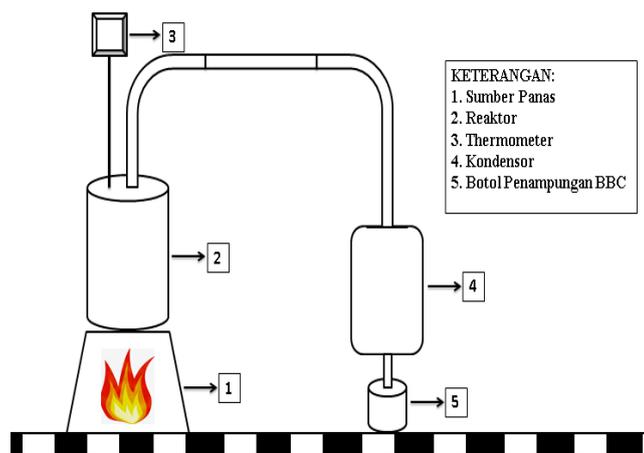
Metode Penelitian

Prosedur pengambilan sampel mencakup perbandingan komposisi sampel sampah plastik LDPE dengan pelumas bekas. Rasio campuran sampah plastik LDPE dan pelumas bekas, yaitu 5:0, 5:1, 5:2, 5:3, dan 5:4 sebagai berikut:

Tabel 1. Rasio Komposisi Plastik LDPE dan Pelumas Bekas

NO	Sampel	Komposisi	
		Plastik LDPE (gram)	Pelumas Bekas (gram)
1	S1	200	0
2	S2	200	40
3	S3	200	80
4	S4	200	120
5	S5	200	160

Pelaksanaan penelitian dilanjutkan dengan menjalankan proses pirolisis pada sampel-sampel yang telah disiapkan menggunakan alat pirolisis sederhana seperti yang terlihat pada Gambar 1. Proses ini melibatkan pemanasan bahan baku di dalam reaktor pada suhu tinggi tanpa adanya oksigen, menggunakan limbah pohon atau kayu bakar sebagai sumber panas. Reaktor yang digunakan adalah kaleng bekas dengan dimensi tertentu, dan suhu dalam reaktor dipantau dengan *thermocouple* untuk memastikan kondisi operasional yang tepat.



Gambar 1. *Pyrolysis Tool Schematic*

Setelah proses pirolisis selesai, produk cair yang dihasilkan dikumpulkan dan diuji untuk mengukur karakteristiknya, termasuk nilai kalor dengan bomb kalorimeter, densitas dengan

piknometer, dan viskositas dengan viskometer Ostwald. Data yang terkumpul dievaluasi secara menyeluruh untuk memastikan kecukupannya sebelum dilakukan analisis lebih lanjut terhadap hubungan dan pola yang ada.

Hasil dan Pembahasan

Eksperimen dilakukan dengan menggunakan lima komposisi berbeda, yaitu 5:0, 5:1, 5:2, 5:3, dan 5:4, yang mengacu pada rasio sampah plastik LDPE dan pelumas bekas. Proses *co-pyrolysis* dilakukan selama satu jam pada rentang temperatur 165°C hingga 177°C. Penting untuk dicatat bahwa temperatur dalam reaktor bervariasi karena penggunaan sumber panas dari kayu bakar, yang menyebabkan perbedaan suhu relatif pada setiap percobaan. Ukuran plastik yang digunakan berkisar antara 2 cm² sampai 5 cm² dengan massa plastik sebesar 200 gram untuk setiap pengujian.

Tabel 2. Hasil Proses *Co-pyrolysis*

No	Kode Sampel	Temperatur Proses (°C)	Waktu (jam)	Volume Produk (mL)
1	S1	170,80	1	55
2	S2	175,40		61
3	S3	165,40		46,67
4	S4	177		64
5	S5	170,40		55

Hasil eksperimen dapat dilihat pada Tabel 2. yang menunjukkan bahwa penambahan pelumas bekas menghasilkan volume produk cair yang bervariasi: 55 mL (S1), 61 mL (S2), 46,67 mL (S3), 64 mL (S4), dan 55 mL (S5). Analisis visual menunjukkan bahwa semakin banyak pelumas bekas yang ditambahkan, produk cair yang dihasilkan cenderung memiliki warna coklat yang lebih pekat sebagaimana dapat dilihat pada Gambar 3. Fenomena ini dapat dijelaskan oleh fraksi-fraksi berat yang terbawa dalam uap dan kemudian terkondensasi menjadi minyak dalam kondensor, yang mengarah pada peningkatan viskositas produk [18].

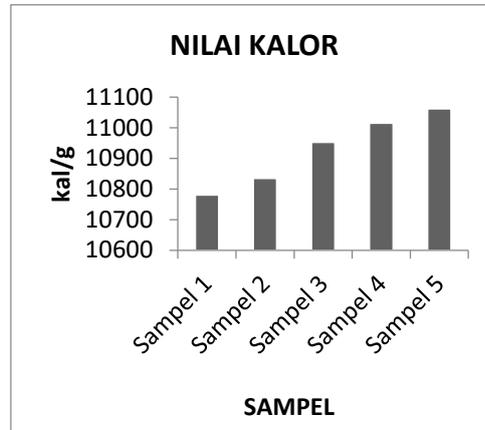


Gambar 1. Produk Cair *Co-pyrolysis*

Nilai Kalor

Nilai kalor merupakan jumlah panas yang dihasilkan dari proses pembakaran antara bahan bakar dengan udara [24]. Umumnya nilai kalor dari bahan bakar cair sebesar 10160 kal/g sampai 11000 kal/g [25]. Pada penelitian ini pengujian nilai kalor dilakukan dengan menggunakan instrumen bomb

kalori meter di Laboratorium Teknik Konversi Energi Politeknik Negeri Jakarta. Nilai kalor diuji sebanyak tiga kali dan hasil rata-rata ditampilkan dalam grafik yang dapat dilihat pada Gambar 3. di bawah ini.

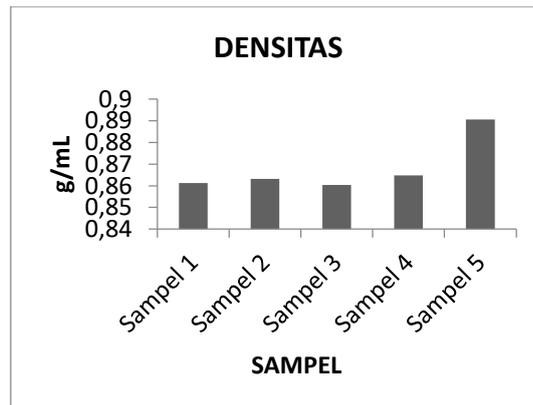


Gambar 2. Hasil Pengujian Nilai Kalor Co-pyrolysis

Hasil pengujian menunjukkan bahwa semakin banyak pelumas bekas yang ditambahkan, semakin tinggi nilai kalor yang dihasilkan. Nilai kalor untuk komposisi sampel 5:0, 5:1, 5:2, 5:3, dan 5:4 secara berturut-turut adalah 10,780.67 kal/g, 10,834 kal/g, 10,952 kal/g, 11,015.33 kal/g, dan 11,061.67 kal/g. Semua nilai kalor ini telah memenuhi standar minimum yang ditetapkan oleh Departemen Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM) sebesar 10,000 kal/g [26].

Densitas

Densitas merupakan pengukuran massa setiap satuan volume [27]. Semakin tinggi massa jenis dari suatu benda, maka semakin tinggi massa setiap volumenya [28]. Massa jenis rata-rata dari setiap benda merupakan massa total dibagi dengan volume total [29]. Pengujian densitas pada penelitian ini dengan menggunakan piknometer 25 ml dan timbangan digital. Pengujian dilakukan sebanyak tiga kali untuk menentukan densitas rata-rata, yang dapat dilihat pada Gambar 4. berikut.

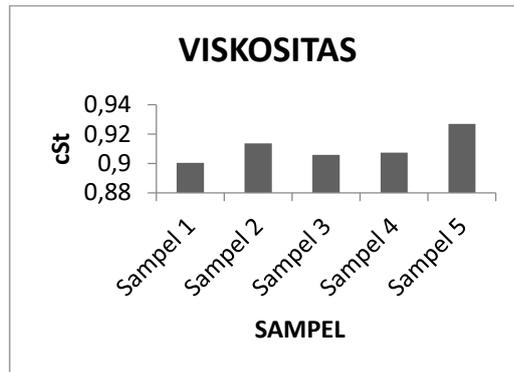


Gambar 3. Hasil Pengujian Densitas Co-pyrolysis

Dari hasil pengujian diperoleh densitas secara berturut-turut 0,8613 g/mL, 0,8631 g/mL, 0,8604 g/mL, 0,8646 g/mL, dan 0,8906 g/mL. Dari pengujian bahwa rata-rata densitas sebesar 0,8686 g/mL dan berada pada densitas bahan bakar solar yang memiliki densitas antara 0,815 g/mL sampai 0,870 g/mL [30].

Viskositas

Viskositas ditentukan dengan membandingkan bahan bakar minyak dengan cairan pembanding berupa air menggunakan viskometer ostwald dengan melibatkan densitas dari bahan bakar yang dihasilkan maupun cairan pembanding [25]. Viskositas bahan bakar cair dipengaruhi oleh densitas, apabila semakin tinggi densitas dari bahan bakar cair maka semakin meningkatkan nilai viskositas [31]. Semakin tinggi densitas jumlah jumlah partikel yang terkandung di dalam bahan bakar menjadi lebih banyak dan dapat menghambat aliran karena terdapat partikel yang bergesekan [32]. Grafik yang dapat dilihat pada Gambar 6. di bawah ini menunjukkan hasil rata-rata dari tiga kali pengujian viskositas.



Gambar 4. Hasil Pengujian Viskositas Co-pyrolysis

Viskositas pada produk cair yang dihasilkan dari *co-pyrolysis* sampah plastik LDPE dan pelumas bekas rata-rata <1 cSt. Pada umumnya viskositas bahan bakar cair berkisar antara 0,829 cSt sampai 2,248 cSt [33]. Viskositas yang terukur pada penelitian ini sudah memenuhi standar gasolin yang ditetapkan oleh *Shell Petroleum Canada 1999* [34].

Efisiensi Yield

Efisiensi Yield dihitung dengan membandingkan jumlah yield yang dihasilkan (dalam %) dengan energi yang digunakan untuk melakukan proses *co-pyrolysis*. Hasil perhitungan efisiensi menunjukkan bahwa efisiensi yield tertinggi mencapai 9,14 mL/kWh pada sampel dengan rasio 5:4 (LDPE : Pelumas Bekas) dengan efisiensi sebesar 1,93%.

Kesimpulan

Penelitian ini berhasil memanfaatkan limbah plastik LDPE dan pelumas bekas menjadi bahan bakar cair alternatif melalui metode *co-pyrolysis*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penambahan pelumas bekas meningkatkan nilai kalor produk cair hingga mencapai 11,061.67 kal/g pada komposisi 5:4, melebihi standar minimum 10,000 kal/g dari ESDM. Produk cair memiliki densitas rata-rata 0,8686 g/mL serupa dengan bahan bakar solar, dan viskositasnya memenuhi standar gasoline, menjadikannya kandidat potensial sebagai substitusi bahan bakar solar.

Efisiensi dihitung berdasarkan perbandingan jumlah produk cair yang dihasilkan dengan energi yang digunakan selama proses, menunjukkan efisiensi tertinggi sebesar 9,14 mL/kWh pada komposisi 5:4 menunjukkan bahwa metode *co-pyrolysis* ini cukup efisien dalam konversi energi dari bahan baku menjadi bahan bakar cair, dengan efisiensi konversi energi sebesar 1,93%. Temuan ini mengindikasikan bahwa meskipun *co-pyrolysis* dapat meningkatkan karakteristik produk cair, perhatian harus diberikan pada efisiensi energi untuk memastikan kelayakan proses ini sebagai solusi pengelolaan limbah yang berkelanjutan.

Daftar Pustaka

- [1] H. G. Shebu, B. T. Asfaw, S. A. Yiman, and D. E. Manyazewal, "A Review on Extraction of Liquid Fuel From Waste Plastic," *J. Pet. Eng. Technol.*, vol. 9, no. 3, pp. 34–40, 2019.
- [2] Y. G. Wibowo and A. Izzuddin, "Integrasi Pengolahan Sampah Metode 3R Dengan Bank Sampah Di SMA," *J. Pengabd. Masy. Manag.*, vol. 2, no. 1, pp. 19–23, 2021.
- [3] A. V. Annita, A. Lestari, and N. P. Adi, "Dampak Timbulan Sampah Di Tempat Pembuangan Akhir (TPA) Wonorejo Kabupaten Wonosobo Terhadap Lingkungan Tanah," *Banua J. Kesehat. Lingkung.*, vol. 3, no. 1, pp. 24–30, 2023, doi: 10.33860/bjkl.v3i1.2582.
- [4] D. Iswadi *et al.*, "Pemanfaatan Sampah Plastik LDPE dan PET Menjadi Bahan Bakar Minyak dengan Proses Pirolisis," *J. Ilm. Tek. Kim. UNPAM*, vol. 1, no. 2, 2017.
- [5] K. Eldwita, S. D. Lestari, E. S. A, and Fatria, "Pengaruh Jumlah Katalis dan Temperatur Pada Produksi Bahan Bakar Cair Dari Ban Bekas Dengan Metode Perengkahan Katalik," *J. Kinet.*, vol. 11, no. 2, pp. 19–25, 2020.
- [6] A. Rafi, P. Hartono, and Margianto, "Analisis Energi Terbrukan Pada Proses Pirolisis Dengan Memanfaatkan Sampah Plastik," *J. Tek. Mesin*, no. Vol 12, No 01 (2019): Jurnal Teknik Mesin, p. 30, 2019.
- [7] M. Syamsiro, M. A. Saputro, J. Winarno, B. Megaprastio, and Z. Mufrodi, "Studi Co-pirolisis Plastik HDPE Dan Oli Bekas Menjadi Bahan Bakar Cair Alternatif," 2021.
- [8] Azharuddin, A. A. Sani, and M. A. Ariasya, "Proses Pengolahan Limbah B3 (Oli Bekas) Menjadi Bahan Bakar Cair dengan Perlakuan Panas yang Konstan," *J. Austenit*, vol. 12, no. 2, pp. 48–53, 2020.
- [9] F. Abnisa and W. M. A. W. Daud, "A review on *co-pyrolysis* of biomass: an optional technique to obtain a high-grade pyrolysis oil," *Energy Convers. Manag.*, vol. 87, pp. 71–85, 2014.
- [10] Wijaya, H. S. Jaya, and Wigoyo, "Perbandingan Hasil Penyulingan Plastik Tipe HDPE dan LDPE Dengan Alat Penyulingan Sederhana," *STEAM Eng.*, vol. 3, no. 1, pp. 39–45, 2021.
- [11] K. Nisah and M. Zihni Hilman, "Pemanfaatan Oli Bekas (Oil Waste) Sebagai Bahan Bakar Alternatif Pada Industri," *Amina*, vol. 6, no. 1, pp. 23–27, 2024.
- [12] Z. Mufrodi, M. A. Saputro, J. Winarno, B. Megaprastio, and M. Syamsiro, "Produksi Bahan Bakar Minyak Alternatif Dari Pirolisis Plastik Polipropilen dan Oli Bekas," *Semin. Nas. Disem. Has. Penelit. 2021 deHAP*, vol. 1, no. 1, pp. 317–325, 2021.
- [13] D. Andrijono and S. Sufiyanto, "Penyuluhan bagi Masyarakat Peduli Sampah Polimer Termoplastik Kelurahan Rampal Celaket Kecamatan Klojen Kota Malang," *Abdimas J. Pengabd. Masy. Univ. Merdeka Malang*, vol. 6, no. 2, pp. 176–185, 2021, doi: 10.26905/abdimas.v6i2.5136.
- [14] Untoro Budi Surono dan Ismanto, "Pengolahan Sampah Plastik Jenis PP , PET dan PE Menjadi Bahan Bakar Minyak dan Karakteristiknya," vol. 1, no. April, pp. 32–37, 2016.
- [15] A. Masyruroh and I. Rahmawati, "Pembuatan Recycle Plastik Hdpe Sederhana Menjadi Asbak," *Abdikarya J. Pengabd. dan Pemberdaya. Masy.*, vol. 3, no. 1, pp. 53–63, 2021, doi: 10.47080/abdikarya.v3i1.1278.
- [16] A. Zikri, Y. Bow, D. Nurmala sari, N. Wulandari, M. Rizky Adhitya Putra, and A. Rafilanda, "Analisa Bahan Bakar Minyak Hasil Pirolisis Sampah Plastik Jenis Pp Dan Pet Terhadap Kinerja Generator Set Pada Pltsa Plastik Kapasitas 1000 Watt Analysis of Oil Fuel Product From Pyrolysis of Plastic Waste Type Pp and Pet on Generator Set Performance At P," *J.*

Kinet., vol. 10, no. 01, pp. 24–30, 2019, [Online]. Available: <https://jurnal.polsri.ac.id/index.php/kimia/index>

- [17] E. Morici and N. T. Dintcheva, “Recycling of Thermoset Materials and Thermoset-Based Composites: Challenge and Opportunity,” *Polymers (Basel)*, vol. 14, no. 19, pp. 1–12, 2022, doi: 10.3390/polym14194153.
- [18] Y. Bow and S. R. . Sihombing, “Pengolahan Sampah Low Density Polyethylene (Ldpe) Dan Polypropylene (Pp) Menjadi Bahan Bakar Cair Alternatif Menggunakan Prototipe Pirolisis Thermal Cracking,” *J. Kinet.*, vol. 9, no. 3, pp. 1–6, 2018.
- [19] S. Cahmulan, Basuki, Suyatno, and Warsiyah, “Pemanfaatan Sampah Plastik Domestik (LDPE) untuk Bahan Campuran Pembuatan Batako,” *J. Rekayasa Lingkung.*, vol. 23, no. 1, pp. 62–71, 2023.
- [20] R. P. Liestiono, M. S. Cahyono, W. Widyawidura, A. Prasetya, and I. Pendahuluan, “Karakteristik Minyak Dan Gas Hasil Proses Dekomposisi Termal Plastik Jenis Low Density Polyethylene (Ldpe),” vol. 1, no. 2, 2017.
- [21] J. A. Riandis, A. R. Setyawati, and A. S. Sanjaya, “Pengolahan Sampah Plastik dengan Metode Pirolisis menjadi Bahan Bakar Minyak (Plastic Waste Processing using Pyrolysis Method into Fuel Oil),” *J. Chemurg.*, vol. 05, no. 1, pp. 8–14, 2021, [Online]. Available: <http://e-journals.unmul.ac.id/index.php/TKp>
- [22] I. M. Gandidi, Ali Mustofa, Andicha Aulia Putra, Reno Raines, “Produksi Bahan Bakar Minyak Bio (Bio Oil) Dari Sampah Kota Bandar Lampung Dengan Metode Pirolisis Sebagai Solusi Terbaik Dalam Manajemen Pengelolaan Sampah Dan Diversifikasi Energi,” *Inov. Pembang. – J. Kelitbangan*, Vol. 05, no. 02, pp. 137–145, 2017.
- [23] K. Ridhuan, D. Irawan, and R. Inthifawzi, “Proses Pembakaran Pirolisis dengan Jenis Biomassa dan Karakteristik Asap Cair yang Dihasilkan,” *Turbo J. Progr. Stud. Tek. Mesin*, vol. 8, no. 1, pp. 69–78, 2019, doi: 10.24127/trb.v8i1.924.
- [24] M. A. Almu, Syahrul, and Y. A. Padang, “Analisa Nilai Kalor Dan Laju Pembakaran Pada Briket,” *Din. Tek. Mesin*, vol. 4, no. 2, pp. 117–122, 2014.
- [25] M. Jahiding, E. Nurfianti, E. S. Hasan, R. S. Rizki, and Mashuni, “Analisis Pengaruh Temperatur Pirolisis Terhadap Kualitas Bahan Bakar Minyak Dari Limbah Plastik Polipropilena,” *Gravitasi*, vol. 19, no. 1, pp. 6–10, 2020.
- [26] Departemen ESDM, “Standar Mutu (Spesifikasi) Bahan Bakar Minyak Jenis Minyak Bakar Yang Dipasarkan Dalam Negeri,” Jakarta, 2008.
- [27] A. T. Saputra, M. A. Wicaksono, and I. Irsan, “Pemanfaatan Minyak Goreng Bekas untuk Pembuatan Biodiesel Menggunakan Katalis Zeolit Alat Teraktivasi,” *J. Chemurg.*, vol. 1, no. 2, p. 1, 2018, doi: 10.30872/cmg.v1i2.1138.
- [28] T. Kapasiang, M. Bukit, and J. Tarigan, “Penentuan Morfologi Permukaan Dan Sifat Fisis Serta Sifat Mekanik Batu Bata Asal Tanah Merah Kabupaten Kupang Nusa Tenggara Timur,” *J. Fis. Fis. Sains dan Apl.*, vol. 2, no. 2, pp. 92–100, 2018, doi: 10.35508/fisa.v2i2.550.
- [29] T. B. Prasetyo and F. Rhozman, “Karakteristik Hasil Proses Pirolisis Jenis Plastik PET, HDPE, dan PP Menggunakan Katalis Alam Metode SPSS dan Matlab,” *SEMNAS Inov. Teknol.*, vol. 1, no. 1, pp. 325–330, 2021.
- [30] J. Waluyo, A. P. Perkasa, and D. Ramadhana, “Pirolisis Sampah Plastik HDPE Sebagai Alternatif Pengganti Kerosin Dengan Menggunakan Katalis Zeolit Alam,” *Equilibrium*, vol. 3, no. 1, pp. 34–40, 2019.

- [31] A. Irawati, "Pembuatan Dan Pengujian Viskositas Dan Densitas Biodiesel Dari Beberapa Jenis Minyak Jelantah," *J. Fis. dan Ter.*, vol. 5, no. 1, pp. 82–89, 2018, [Online]. Available: <https://journal.uin-alauddin.ac.id/index.php/jft/article/view/15972>
- [32] D. G. . Adoe, W. Bunganaen, I. F. Krisnawi, and F. A. Soekwanto, "Pirolisis Sampah Plastik PP (Polypropylene) Menjadi Minyak Pirolisis Sebagai Bahan Bakar Primer," *J. Tek. Mesin Undana*, vol. 3, no. 1, pp. 17–26, 2016.
- [33] R. Nazif, E. Wicaksana, and Halimatuddahlia, "Pengaruh Suhu Pirolisis Dan Jumlah Katalis Karbon Aktif Terhadap Yield Dan Kualitas Bahan Bakar Cair Dari Limbah Plastik Jenis Polipropilena," *J. Tek. Kim.*, vol. 5, no. 1, pp. 49–55, 2016.
- [34] O. S. Mazdhatina, A. Setiawan, and V. Setiani, "Pengaruh Katalis Zeolit Alam terhadap Karakteristik Minyak Pirolisis Sampah Plastik PP (Polypropylene)," *Conf. Proceeding ...*, no. 2623, pp. 87–90, 2020.
- [35] Y. Sun, B. Dong, L. Wang, H. Li, and E. Thorin, "Technology selection for capturing CO₂ from wood pyrolysis," *Energy Convers. Manag.*, vol. 266, no. May, p. 115835, 2022, doi: 10.1016/j.enconman.2022.115835.
- [36] Novarini, S. Kurniawan, Rusdianasari, and Y. Bow, "Kajian Karakteristik dan Energi pada Pirolisis Limbah Plastik Low Density Polyethylene (LDPE)," *J. Tek. Kim. dan Lingkung.*, vol. 5, no. 1, pp. 61–70, 2021, doi: 10.33795/jtkl.v5i1.190.