

## Pengaruh Bahan Baku terhadap Karakteristik Produk Hasil Pirolisis: Studi Literatur

Sheila Novella Arvenia<sup>1\*</sup>, Mohamad Rangga Sururi<sup>1</sup>, Novi Fitria<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Program Studi Teknik Lingkungan, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan Institut Teknologi Nasional, Bandung.

<sup>2</sup>Pusat Riset Lingkungan dan Teknologi Bersih, Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN)

\*Koresponden email: sheila.novella@mhs.itenas.ac.id

Diterima: 26 Januari 2025

Disetujui: 03 Februari 2025

### Abstract

The global climate change phenomenon is prompting initiatives aimed at transitioning energy sources towards more sustainable pathways. Pyrolysis technology offers significant potential in the conversion of biomass and plastic waste into alternative energy sources. The objective of this literature review is to analyze the effect of feedstock type on pyrolysis product characteristics and its potential as an energy source. The results of the literature study indicated that the feedstock from biomass possessed a lower calorific value in comparison to waste composed of polymer compounds. The pyrolysis process yields three primary byproducts: char, bio-oil, and gas. Char can be utilized as a solid fuel, such as briquettes. The processing of bio-oil into liquid fuel, bioethanol, is a viable option. The pyrolysis gas is a versatile material that can be utilized as a fuel for stoves and generators. Pyrolysis, a promising technology, has the potential to convert biomass and plastic waste into alternative energy. The type of feedstock employed is a critical factor in determining the quality and quantity of pyrolysis products. Through process optimization and technological development, pyrolysis has the potential to play a substantial role in reducing reliance on fossil fuels and addressing environmental concerns.

**Keywords:** *alternative fuels, biomass, plastic waste, pyrolysis, renewable energy*

### Abstrak

Perubahan iklim global mendorong upaya transisi energi menuju sumber yang lebih berkelanjutan. Teknologi pirolisis menawarkan potensi besar dalam mengubah biomassa dan limbah plastik menjadi energi alternatif. Tujuan dari studi literatur ini untuk menganalisis pengaruh jenis bahan baku terhadap karakteristik produk pirolisis dan potensinya sebagai sumber energi. Hasil dari studi literatur menghasilkan bahan baku dari biomassa dengan nilai kalor yang lebih rendah dibandingkan dengan limbah yang tersusun dari senyawa polimer. Produk pirolisis yang dihasilkan meliputi char, bio – oil dan gas. Char dapat digunakan sebagai bahan bakar padat seperti briket. Bio-oil dapat diolah menjadi bahan bakar cair, bioetanol. Gas hasil pirolisis dapat dimanfaatkan sebagai bahan bakar kompor gas dan bahan bakar mesin genset. Pirolisis merupakan teknologi yang menjanjikan untuk mengkonversi biomassa dan limbah plastik menjadi energi alternatif. Jenis bahan baku memainkan peran penting dalam menentukan kualitas dan kuantitas produk pirolisis. Dengan optimasi proses dan pengembangan teknologi, pirolisis dapat berkontribusi signifikan dalam mengurangi ketergantungan pada energi fosil dan mengatasi masalah lingkungan.

**Kata Kunci:** *bahan bakar alternatif, biomassa, energi terbarukan, limbah plastik, pirolisis*

### 1. Pendahuluan

Perubahan iklim merupakan suatu tantangan yang sedang dihadapi secara global dimana tercatat peningkatan suhu bumi sebesar 1,09 °C dalam kurun waktu sepuluh tahun dari tahun 2011 hingga tahun 2020 [1]. Perubahan iklim tersebut melatar belakangi dibentuknya Program *Net-Zero Emission* (NZE) dalam *Paris Agreement* pada tahun 2015 [2]. Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (KESDM) menargetkan Indonesia menjadi NZE pada tahun 2060 dalam sektor energi dimana upaya yang dilakukan yaitu mengurangi emisi karbon yang berasal dari ketergantungan pada energi fosil [3]. Dari segi lingkungan penggunaan bahan bakar fosil menjadi penyebab terjadinya pemanasan global yang mengakibatkan efek rumah kaca selain itu ketersediaan energi fosil yang terbatas memicu terjadinya krisis energi global [4]. Dalam mewujudkan NZE Indonesia pada tahun 2060 perlu dilakukan transformasi energi dengan beralih menggunakan energi terbarukan. Energi terbarukan merupakan energi yang bersumber di alam dalam jumlah besar dan dapat diproduksi dalam waktu yang relatif singkat [5]. Teknologi termal merupakan teknik yang umumnya digunakan untuk mengubah biomassa menjadi beberapa sumber energi baru.

Pirolisis merupakan teknologi termal yang dapat mengkonversi materi menjadi energi salah satunya bahan bakar alternatif [6].

Pirolisis merupakan proses degradasi atau penguraian senyawa – senyawa makromolekul berbahan dasar karbon dengan pemanasan suhu tinggi yaitu 300°C atau lebih pada kondisi tanpa atau minim oksigen [7]. Produk yang dihasilkan dari proses pirolisis ini berupa padatan (char), cairan (bio-oil), dan gas (H<sub>2</sub>, CO, CO<sub>2</sub> dan CH<sub>4</sub>) [8]. Ketiga produk tersebut dapat dijadikan sebagai energi alternatif. Gas dari hasil pirolisis dapat dimanfaatkan sebagai bahan bakar kompor, burner serta bahan bakar genset [9]. Tar atau bio oil dapat dimanfaatkan menjadi bahan bakar minyak [10]. Arang hasil pirolisis dapat dimanfaatkan sebagai bahan bakar boiler dan bahan baku briket sebagai sumber alternatif [11].

Terdapat berbagai macam bahan baku untuk pirolisis dimana dapat berupa bahan – bahan alam, biomassa, ataupun berbentuk polimer [12]. Bahan baku pirolisis dapat bersumber dari limbah biomassa dan limbah berbasis fosil. Di Indonesia potensi energi biomassa berasal dari limbah pertanian dan perkebunan dimana terdiri dari kelapa sawit, kelapa, karet, tebu, beras, dan jagung memiliki potensi teknis energi sebesar 614,9 GJ/tahun. Selain itu terdapat komponen organik yang berasal dari limbah rumah tangga diantaranya sisa makanan, dedaunan, ranting dan kertas dengan rata – rata densitas mencapai 233 kg/m<sup>3</sup> dengan nilai kalor sekitar 2.500 – 11.000 kkal/kg [4]. Potensi energi limbah berbasis fosil bersumber dari limbah plastik dimana limbah plastik ini tersusun dari minyak dan gas bumi. Sehingga selain mendapatkan energi alternatif, teknologi pirolisis ini juga dapat mengurangi limbah yang ada.

Pada studi ini pembahasan akan difokuskan kepada bahan baku yang digunakan untuk pirolisis dengan tujuan melihat pengaruh jenis bahan baku terhadap karakteristik produk hasil pirolisis untuk melihat potensi pemanfaatan energinya.

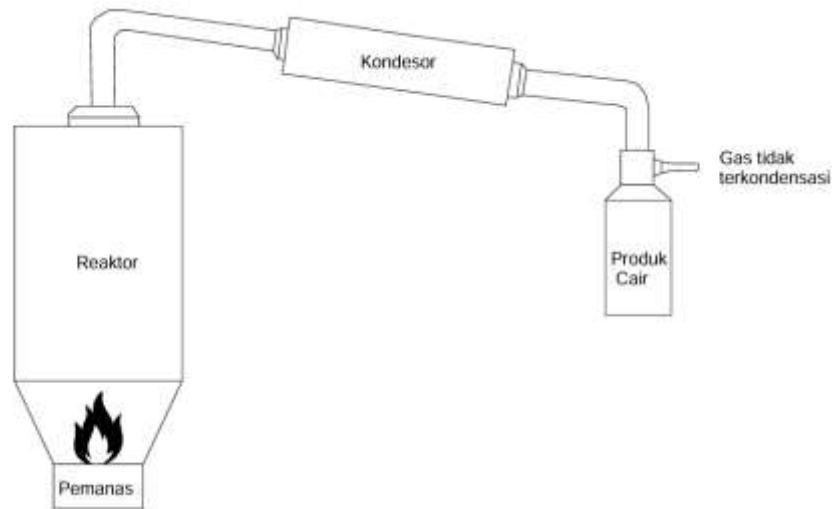
## 2. Metode Penelitian

Metode yang digunakan yaitu studi literatur. Studi literatur dilakukan dengan cara mengumpulkan dan menganalisis data. Sumber literatur berupa publikasi ilmiah nasional maupun internasional dari penelitian – penelitian terdahulu serta buku – buku yang relevan dengan pengaruh jenis bahan baku yang digunakan terhadap karakteristik produk hasil pirolisis. Pencarian literatur dilakukan dengan menggunakan kata kunci pirolisis, bahan baku pirolisis, karakteristik produk pirolisis. Kriteria pemilihan publikasi ilmiah yaitu yang terbit pada 10 tahun terakhir antara tahun 2015 hingga 2025. Penelitian dilakukan dengan membandingkan literatur kemudian disusun berdasarkan poin – poin seperti produk yang dihasilkan padat, cair atau gas, serta karakteristik berupa nilai kalor dan kandungan senyawa yang ada pada produk hasil pirolisis tersebut.

## 3. Hasil dan Pembahasan

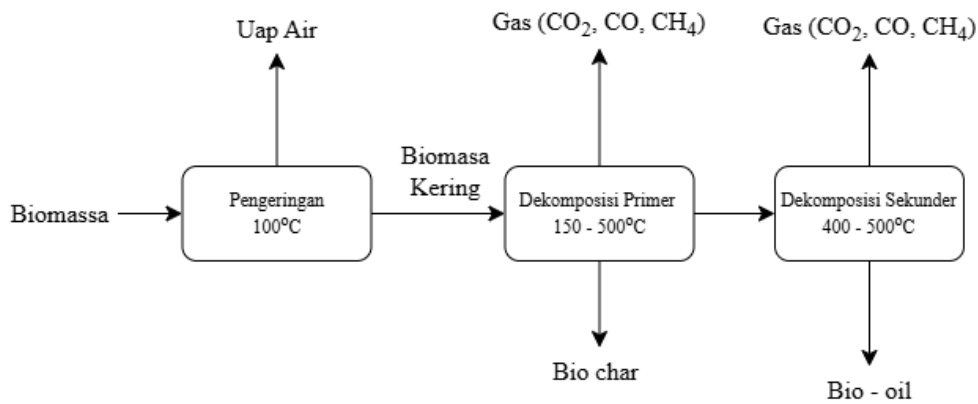
### *Teknologi Pirolisis*

Pirolisis berasal dari dua kata yaitu “*pyro*” yang berarti panas dan “*lysis*” yang berarti penguraian atau degradasi sehingga secara umum pirolisis diartikan sebagai proses dekomposisi atau penguraian senyawa – senyawa makromolekul berbahan dasar karbon [7]. Pirolisis merupakan reaksi kimia termal yang dilakukan pada keadaan minim atau tanpa oksigen di dalam reaktor. Terdapat tiga tipe pirolisis yaitu pirolisis lambat, pirolisis cepat, dan pirolisis kilat. Pirolisis lambat menghasilkan lebih banyak gas dan arang dibandingkan cairan kondisi operasional pirolisis lambat pada suhu kurang dari 500°C. Pirolisis cepat menghasilkan padatan yang lebih sedikit yaitu sekitar 13% dengan suhu operasi 425°C hingga 650°C. Pirolisis kilat proses berlangsung hanya beberapa detik dengan pemanasan yang tinggi sekitar 650°C hingga 1300°C [13] [14]. Berbagai proporsi minyak, arang, dan gas adalah produk dari proses pirolisis yang dapat mengeluarkan karbon, hidrogen, dan metana. Pirolisis pada laju pemanasan tinggi dan suhu lebih dari 800°C akan menghasilkan lebih banyak gas dan abu. Jumlah arang yang dihasilkan lebih tinggi pada suhu 450°C dan pemanasan yang lambat [15]. Beberapa faktor yang dapat mempengaruhi proses pirolisis yaitu jenis bahan baku, suhu, waktu, laju pemanasan, dan ukuran partikel [16]. Skema rangkaian alat pirolisis dapat dilihat pada **Gambar 1**.



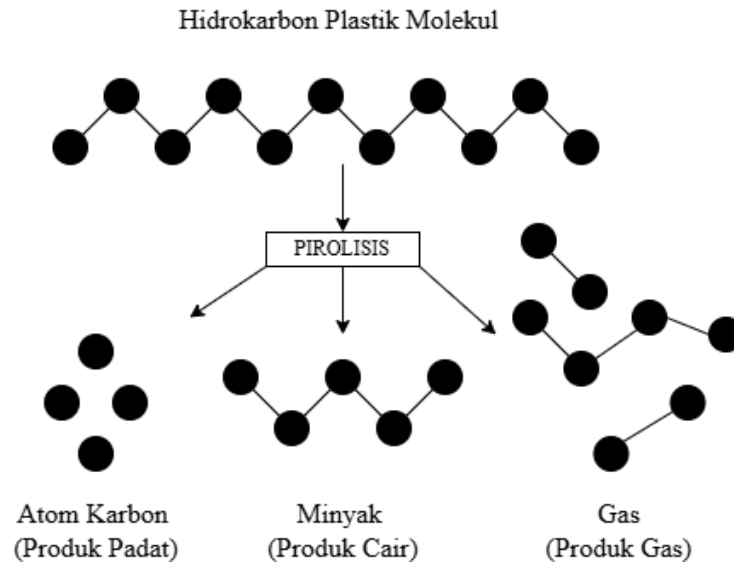
**Gambar 1.** Modifikasi Skema Alat Pirolisis  
 Sumber : [17]

Bahan baku biomassa terdekomposisi secara termal tanpa adanya oksigen. Biomolekul yang mudah menguap dari bahan biomassa dilepaskan melalui pemanasan lalu diubah menjadi *bio-oil* melalui kondensasi. Proses pirolisis terdiri dari dua tahap yaitu primer dan sekunder. Pirolisis primer melibatkan pembentukan gugus karbonil, karboksil dan hidroksil dan terdevolatilisasi menjadi konstituen yang berbeda. Proses konversi utama terjadi pada proses sekunder dimana senyawa berat diuraikan menjadi arang dan gas. Selanjutnya, gas – gas yang mudah menguap dikondensasi menjadi *bio-oil*. Proporsi produk padat dan cair ini tergantung pada kondisi pirolisis seperti suhu, waktu tinggal, dan laju pemanasan [18]. Reaksi yang terjadi pada proses pirolisis biomassa dapat dilihat pada **Gambar 2**.



**Gambar 2.** Modifikasi Mekanisme Pirolisis Biomasa  
 Sumber : [19]

Reaksi yang terjadi pada proses pirolisis senyawa polimer yaitu pemecahan hidrokarbon rantai panjang dari polimer plastik menjadi rantai pendek [12].



**Gambar 3.** Modifikasi Mekanisme Pirolisis Senyawa Polimer  
Sumber : [20]

### Bahan Baku

Bahan baku pirolisis dapat bersumber dari biomassa dan senyawa polimer. Biomassa dapat didefinisikan pada bahan organik yang berasal dari tumbuhan atau hewan, termasuk limbah pertanian, dan perkebunan, serta limbah makanan. Elemen dasar komponen biomassa yaitu selulosa, hemiselulosa, dan lignin yang dimana ketiga unsur utama penyusunnya berupa karbon (C), oksigen (O), dan hidrogen (H) [21]. Bahan baku yang bersumber dari senyawa polimer yaitu limbah plastik dimana bahan dasar plastik berasal dari gas alam dan minyak bumi, pada umumnya plastik tersusun atas polimer, karbon, hidrogen dengan oksigen, nitrogen, dan sulfur [22].

Selain pirolisis terdapat proses yang dinamakan co-pirolisis yang mana prosesnya sama dengan pirolisis hanya saja proses tersebut melibatkan dua atau lebih zat sebagai bahan baku. Salah satu bahan bakunya adalah limbah berbasis bio, sedangkan bahan lainnya adalah limbah berbasis fosil [23].

### Perbandingan Produk Hasil Pirolisis dari Berbagai Macam Bahan Baku

Banyak peneliti yang sudah melakukan konversi energi dengan metode pirolisis, jenis bahan baku yang digunakan pun beragam. **Tabel 1** merupakan beberapa perbandingan produk yang dihasilkan dari proses pirolisis dari berbagai macam bahan baku.

**Tabel 1.** Perbandingan Bahan Baku terhadap Produk dan Potensi Pemanfaatan

Jenis Bahan Baku	Kondisi Pengoperasian	Produk	Potensi Pemanfaatan	Sumber
Tempurung Kelapa	Suhu 450°C Waktu 3 jam	Produk Cair: 30,10%	Bahan Bakar Padat	[5]
Ampas Tebu	Suhu 500°C	Produk Padat: 26,77% Produk Cair : 40,85 % Produk Gas : 27,33 %	Produk cair : biofuel, bahan pembuat bioetanol. Produk Gas : Kandungan CH <sub>4</sub> untuk bahan bakar Produk padatan : Mengandung banyak karbon (C) diolah lebih lanjut untuk adsorben limbah, katalis.	[24]
Ban Bekas	Suhu 500°C Waktu 2 jam	Produk Cair: 19,7% Bahan bakar cair, mengandung fraksi C <sub>5</sub> -C <sub>12</sub> .	Bahan bakar cair	[25]

Jenis Bahan Baku	Kondisi Pengoperasian	Produk	Potensi Pemanfaatan	Sumber
Sisa Makanan	Suhu 300°C	Produk Cair: 35,95%, mengandung 64% senyawa methanol	Bahan bakar	[26]
Wood Sawdust (WSD)	Suhu 500°C Ukuran partikel WS D 0,6 < dp < 1 mm	Produk Cair: 44,16% dengan nilai kalor sebesar 6644,6928 kal/gr	Bahan bakar diesel	[27]
Plastik HDPE	Suhu 500°C	Produk Cair: 35,86% nilai kalor 10.314,264 kal/gr	Produk cair : Terdiri dari fraksi gasoline 39,6% dan kerosine 27,52% .	[28]
Plastik Polypropylene	Suhu 400°C	Produk Cair: 5,4 %	Bahan bakar solar	[29]
Plastik LDPE 200 gr dan oli mesin bekas 120 gr	Suhu 177°C	Produk Cair: 17 % menghasilkan nilai kalor sebesar 11.015,33 kal/gr	Berpotensi menjadi bahan bakar solar	[30]
Plastik Polyethylene	Suhu 350 - 450°C	Produk Gas : 500 L	Bahan bakar kompor gas, bahan bakar mesin genset	[9]
Tandan Kosong Kelapa Sawit (TKKS) dan Plastik Polypropylene Perbandingan 8:2	Suhu 500°C	Produk Padat dengan nilai kalor 6869 kal/gr	Bio-coke	[31]
Cangkang Karet	Suhu 307°C Waktu 270 menit	Produk padat : 47,9 %, menghasilkan nilai kalor 6661,549 kal/gr.	Bioarang	[32]
Limbah ranting teh	Suhu 500°C	Produk padat dengan nilai kalor 7357,43 kal/gr	Bioarang	[33]
Bambu	Suhu 300 - 400°C	Produk padat dengan nilai kalor 6687,68 kal/gr	Bioarang	[34]

Hasil dan komposisi produk tergantung pada komposisi bahan baku yang digunakan dimana unsur penyusun dari masing – masing bahan baku berbeda. Jenis biomassa memiliki pengaruh signifikan terhadap proses pirolisis, jumlah produk dan sifat produk yang dihasilkan [6]. Terlihat pada nilai kalor hasil pirolisis limbah plastik memiliki nilai yang lebih besar dari pada limbah biomassa. Nilai kalor yang rendah pada produk cair hasil pirolisis biomassa mengandung oksigen. Selain itu biomassa memiliki komposisi yang heterogen atau lebih beragam sedangkan unsur utama penyusun plastik berupa karbon dan hidrogen [35]. Pemanfaatan energi produk hasil pirolisis dari berbagai bahan baku juga beragam dimana ada yang dapat langsung dimanfaatkan dan ada yang tidak langsung dapat dimanfaatkan. Hasil pirolisis yang tidak langsung dimanfaatkan harus melewati pengolahan lanjutan seperti purifikasi.

#### 4. Kesimpulan

Berdasarkan studi literatur yang telah dilakukan dapat disimpulkan bahwa jenis bahan baku yang digunakan dalam proses pirolisis memberikan pengaruh terhadap karakteristik produk yang dihasilkan dari nilai kalor dan senyawa – senyawa yang dihasilkan. Nilai kalor produk pirolisis dari limbah plastik menghasilkan nilai yang lebih tinggi dibandingkan pirolisis dari produk biomassa. Produk hasil pirolisis memiliki potensi pemanfaatan yang berbeda – berbeda. Terdapat beberapa bahan baku yang berpotensi dijadikan sebagai bahan bakar cair, bio – char, dan gas.

#### 5. Referensi

- [1] J. Matheus, N. F. Delicia, and Rasji, “Implementation of the Carbon Tax Policy in Indonesia : Concepts and Challenges Towards Net Zero Emissions 2060,” vol. 7, pp. 91–114, 2023.
- [2] A. Bramantya, S. Untari, and R. A. Mawarti, “Mewujudkan Net Zero Emission 2060 Melalui Konversi Sampah Menjadi Listrik dalam Perspektif Smart City,” *J. Ilm. Muqoddimah J. Ilmu Sos. Polit. dan Hum.*, vol. 8, no. 1, p. 190, 2024, doi: 10.31604/jim.v8i1.2024.190-199.
- [3] L. T. Hermawan and A. Prabhawati, “Implementasi Just Energy Transition Partnership Indonesia menuju Net Zero Emissions tahun 2060”, doi: 10.14710/jebt.2024.24161.

- [4] R. P. Primadanty, "Potensi Biomassa Dalam Transisi Energi di Indonesia," *Parahyangan Econ. Dev. Rev.*, vol. 2, no. 2, pp. 136–143, 2023, doi: 10.26593/pedr.v2i2.7707.
- [5] R. Hasibuan and H. M. Pardede, "Pengaruh Suhu dan Waktu Pirolisis terhadap Karakteristik Arang dari Tempurung Kelapa," *J. Tek. Kim. USU*, vol. 12, no. 1, pp. 46–53, 2023, doi: 10.32734/jtk.v12i1.8534.
- [6] S. Kadarwati, E. Apriliani, R. N. Annisa, and C. Kurniawan, "From Waste To Energy: Konversi Termal Limbah Pengolahan Kayu Menjadi Bio-Oil Melalui Teknik Pirolisis," pp. 160–187, 2021, [Online]. Available: <https://bookchapter.unnes.ac.id/index.php/PSDAI/article/view/6>
- [7] A. Aladin, B. Modding, T. Syarif, L. Wiyani, and H. A. Azis, *Pirolisis Simultan*. PT. Nas Media Indonesia, 2023.
- [8] Z. Ulma, N. Faizin, R. F. Afiandi, T. E. Terbarukan, and P. N. Jember, "Analisis Mutu Briket Berbahan Baku Campuran Ampas Teh dan Sekam Padi Menggunakan Perak Molase dengan Metode Pirolisis," *J. Sustain. Energy Dev.*, vol. 1, no. 1, pp. 35–40, 2023.
- [9] S. A. Aviandharie, B. N. Jati, and R. Ermawati, "Pemanfaatan Gas Hasil Proses Pirolisis Plastik Polyethylene (PE) Sebagai Bahan Bakar dengan Metode Kondensor dan Metode Tangki Air," *J. Ris. Teknol. Ind.*, vol. 14, no. 1, pp. 88–96, 2020.
- [10] Syamsudin, N. Gumelar, and Yuono, "Produksi Bio-oil dan Bio-arang dari Mata Kayu Industri Pulp melalui Pirolisis," *J. Ris. Ind. Has. Hutan*, vol. 11, no. 1, pp. 2–5, 2019.
- [11] Y. Yuniarti, E. Megawati, A. Dewi, D. Ariyani, M. R. Vegetama, and A. Sahara, "Pengaruh Suhu Terhadap Karakteristik Arang Hasil Pirolisis Kulit Kolang-Kaling (Arenga pinnata)," *Distilat J. Teknol. Separasi*, vol. 8, no. 4, pp. 1020–1030, 2023, doi: 10.33795/distilat.v8i4.410.
- [12] J. A. Riandis, A. R. Setyawati, and A. S. Sanjaya, "Pengolahan Sampah Plastik Dengan Metode Pirolisis Menjadi Bahan Bakar Minyak," *J. Chemurg.*, vol. 5, no. 1, p. 8, 2021, doi: 10.30872/cmng.v5i1.4755.
- [13] K. Ridhuan, D. Irawan, and R. Inthifawzi, "Proses Pembakaran Pirolisis dengan Jenis Biomassa dan Karakteristik Asap Cair yang Dihasilkan," *Turbo*, vol. 8, no. 1, pp. 69–78, 2019.
- [14] L. Li, J. S. Rowbotham, H. Christopher Greenwell, and P. W. Dyer, *An Introduction to Pyrolysis and Catalytic Pyrolysis: Versatile Techniques for Biomass Conversion*. 2013. doi: 10.1016/B978-0-444-53878-9.00009-6.
- [15] Z. Arifah, S. Jamilatun, A. Rahayu, E. Astuti, and R. Sri, "Review : Biochar from Co-Pyrolysis of Biomass and Plastic," vol. 1, no. 1, pp. 34–47, 2023.
- [16] T. W. Widayati, D. Jaya, A. Danujatmiko, and B. D. Irimulyo, "Pirolisis Limbah Pangkal Bambu Betung (*Dendracalmnus asper*)," *Pros. Semin. Nas. Tek. Kim. "Kejuangan"*, pp. B8-1-B8-5, 2020.
- [17] A. S. C. Pratama and K. Sa'diyah, "Pengaruh Jenis Biomassa Terhadap Karakteristik Asap Cair Melalui Metode Pirolisis," *DISTILAT J. Teknol. Separasi*, vol. 8, no. 1, pp. 36–44, 2023, doi: 10.33795/distilat.v8i1.260.
- [18] M. Raza *et al.*, "Progress of The Pyrolyzer Reactors and Advanced Technologies for Biomass Pyrolysis Processing," *Sustain.*, vol. 13, no. 19, pp. 1–42, 2021, doi: 10.3390/su131911061.
- [19] O. P. Bamboriya, L. S. Thakur, H. Parmar, A. K. Varma, and V. K. Hinge, "A Review on Mechanism and Factors Affecting Pyrolysis of Biomass," *Int. J. Res. Advent Technol.*, vol. 7, no. 3, pp. 1014–1024, 2019, [Online]. Available: [www.ijrat.org](http://www.ijrat.org)
- [20] B. B. Hoxha, B. H. Incorporated, and K. K. Sweeney, "Waste-To-Fuel Technology in Albania-Development System To Support an Active Drilling Industry," no. May, 2018.
- [21] D. S. Nawawi *et al.*, "Karakteristik Kimia Biomassa untuk Energi," *Ilmu Teknol. Kayu Trop.*, vol. 16, no. 1, pp. 45–51, 2018.
- [22] W. Adoe, Dominggus G.H. Bunganaen, I. F. Krisnawi, and F. A. Soekawanto, "Pirolisis Sampah Plastik PP (Polypropylene) Menjadi Minyak Pirolisis sebagai Bahan Bakar Primer," *J. Tek. Mesin UNDANA*, vol. 03, no. 01, pp. 17–26, 2016.
- [23] R. Prakash, R. Siddharth, and N. Gunasekar, *Cracking of Toxic Waste*. Elsevier Ltd., 2018. doi: 10.1016/B978-0-08-102528-4.00010-9.
- [24] S. Jamilatun, J. Pitoyo, Z. Arifah, S. Amelia, and A. Maarif, "Pirolisis Ampas Tebu ( *Saccharum officinarum* Linn ): Pengaruh Suhu terhadap Yield dan Karakteristik Produk," *Semin. Nas. Penelit. LPPM UMJ*, pp. 1–11, 2022.
- [25] A. A. Arahim, W. Widayat, and H. Hadiyanto, "Pengaruh Katalis Genteng Tanah Liat dalam Proses Produksi Bahan Bakar Cair dari Limbah Ban Bekas dengan Proses Pirolisis," *J. Energi Baru dan Terbarukan*, vol. 1, no. 2, pp. 62–67, 2020, doi: 10.14710/jebt.2020.9909.

- [26] S. Septarini, Z. Amni, and W. Amnia, "Pengolahan Limbah Organik Rumah Tangga Untuk Produksi Bio-Oil Sederhana," *Sci. J. Mech. Eng. Kinemat.*, vol. 8, no. 2, pp. 158–167, 2023, doi: 10.20527/sjmeKinematika.v8i2.281.
- [27] A. K. Varma, L. S. Thakur, R. Shankar, and P. Mondal, "Pyrolysis Of Wood Sawdust: Effects Of Process Parameters On Products Yield And Characterization Of Products," *Waste Manag.*, vol. 89, pp. 224–235, 2019, doi: 10.1016/j.wasman.2019.04.016.
- [28] N. Fanani *et al.*, "Konversi Plastik HDPE menjadi Fuel melalui Proses Pirolisis," *Semin. Teknol. Perencanaan, Perancangan, Lingkungan, dan Infrastruktur II FTSP ITATS*, pp. 452–456, 2021.
- [29] F. F. D. Hidayat and I. H. Siregar, "Uji Karakteristik Minyak Pirolisis Berbahan Baku Limbah Plastik Polypropylene," *J. Tek. Mesin*, vol. 10, no. 01, pp. 13–20, 2022, [Online]. Available: <https://ejournal.unesa.ac.id/index.php/jtm-unesa/article/view/43904>
- [30] D. Mustofa, S. Amatullah, D. Muhamad, and I. Susanto, "Characteristics of Liquid Co-Pyrolysis Products From Plastic Waste and Used Engine Oil," vol. 23, no. 2, pp. 55–61, 2024.
- [31] M. Jahiding, E. . Hasan, M. Mashuni, Y. Milen, and F. Ayuningsih, "Kinerja Coke-Hybrid Berbasis Tandan Kosong Kelapa Sawit dan Limbah Plastik Polypropylene yang Diproduksi dengan Metode Co-Pirolisis," *Indones. J. Pet. Miner.*, vol. 3, pp. 1–6, 2023.
- [32] K. Ridhuan and D. Irawan, "Pengaruh Jenis Biomassa Terhadap Karakteristik Pembakaran dan Hasil Bioarang Asap Cair dari Proses Pirolisis," *J. Mech.*, vol. 10, no. 1, pp. 7–13, 2019.
- [33] Hainur Aini, Puspita Rahayu, Alizar Ulianas, Egi Agustian, and Anny Sulaswatty, "Pengaruh Temperatur Pirolisis Terhadap Karakteristik Biochar dari Limbah Padat Agroindustri Teh," *INSOLOGI J. Sains dan Teknol.*, vol. 2, no. 6, pp. 1173–1183, 2023, doi: 10.55123/insologi.v2i6.3059.
- [34] R. Jalil *et al.*, "Physico-chemical and Energy Characteristic of Charcoal Derived from Two (Different) Sarawak Wild Bamboo Species," *J. Chem. Eng. Ind. Biotechnol.*, vol. 8, no. 2, pp. 26–35, 2022, doi: 10.15282/jceib.v8i2.8771.
- [35] M. Fatimura, R. Sepriyanti, and R. Yunita, "Pengolahan Limbah Plastik Jenis Kantong Kresek Dan Gelas Minuman Menggunakan Proses Pirolisis Menjadi Bahan Bakar Minyak," *J. Redoks*, vol. 4, no. 2, p. 41, 2019, doi: 10.31851/redoks.v4i2.3509.