

Perbandingan Efisiensi Energi dan Kualitas Produk pada Teknologi Termal Pirolisis dan Gasifikasi Sampah Plastik: Studi Literatur

Shelly Noverly Arisani^{1*}, Mila Dirgawati², Novi Fitria³

¹Program Studi Teknik Lingkungan, Institut Teknologi Nasional, Bandung

^{2,3}Pusat Riset Lingkungan dan Teknologi Bersih, Badan Riset dan Inovasi Nasional, Bandung

*Koresponden email: shelly.noverly@mhs.itenas.ac.id

Diterima: 25 Januari 2025

Disetujui: 1 Februari 2025

Abstract

The problem of plastic waste generation is increasingly pressing in Indonesia. Thermal technology offers an alternative solution that is more environmentally friendly in managing plastic waste. This literature study aims to compare pyrolysis and gasification technologies in converting plastic waste into energy. The analysis was carried out by reviewing various relevant studies. The results of the study indicate that both technologies have the potential to reduce plastic waste generation and produce value-added products. Pyrolysis is a thermal decomposition process without oxygen that produces oil, gas, and charcoal. Gasification produces syngas that can be used as fuel. This process requires limited oxygen and produces more diverse emissions. The comparison between pyrolysis and gasification shows that the selection of the right technology depends on several factors, such as the type of plastic, the desired product quality, and environmental considerations. Pyrolysis is more suitable for oil production, while gasification is more flexible in producing various types of gas products. Overall, both pyrolysis and gasification have great potential in managing plastic waste. However, further research is needed to optimize the process and reduce environmental impacts. Thus, thermal technology can be a sustainable solution in overcoming the problem of plastic waste in Indonesia.

Keywords: *energy, gasification, pyrolysis, plastic waste, thermal technology*

Abstrak

Masalah timbulan sampah plastik semakin mendesak di Indonesia. Teknologi termal menawarkan solusi alternatif yang lebih ramah lingkungan dalam mengelola sampah plastik. Studi literatur ini bertujuan untuk membandingkan teknologi pirolisis dan gasifikasi dalam konversi sampah plastik menjadi energi. Analisis dilakukan dengan mengkaji berbagai penelitian yang relevan. Hasil studi menunjukkan bahwa kedua teknologi memiliki potensi dalam mengurangi timbulan sampah plastik dan menghasilkan produk bernilai tambah. Pirolisis merupakan proses penguraian termal tanpa oksigen yang menghasilkan minyak, gas, dan arang. Gasifikasi menghasilkan syngas yang dapat menjadi alternatif bahan bakar. Proses ini membutuhkan oksigen terbatas dan menghasilkan emisi yang lebih beragam. Perbandingan antara pirolisis dan gasifikasi menunjukkan bahwa pemilihan teknologi yang tepat tergantung pada beberapa faktor, seperti jenis plastik, kualitas produk yang diinginkan, dan pertimbangan lingkungan. Pirolisis lebih cocok untuk produksi minyak, sedangkan gasifikasi lebih fleksibel dalam menghasilkan berbagai jenis produk gas. Secara keseluruhan, baik pirolisis maupun gasifikasi memiliki potensi besar dalam pengelolaan sampah plastik. Namun, diperlukan penelitian lebih lanjut untuk mengoptimalkan proses dan mengurangi dampak lingkungan. Dengan demikian, teknologi termal dapat menjadi solusi yang berkelanjutan dalam mengatasi masalah sampah plastik di Indonesia.

Kata Kunci: *energi, gasifikasi, pirolisis, sampah plastik, teknologi termal*

1. Pendahuluan

Timbulan sampah menjadi salah satu isu lingkungan yang cukup darurat. Pertumbuhan penduduk dan perubahan pola konsumsi menyebabkan timbulan sampah semakin meningkat. Sampah di perkotaan biasanya dilakukan 3 tahapan pengelolaan yaitu, pengumpulan, pengangkutan dan pembuangan akhir [1]. Tempat pembuangan akhir (TPA) telah mencapai titik kritis. Timbulan sampah yang ditumpuk di TPA memberikan dampak negatif, seperti pencemaran tanah dan air, serta emisi gas rumah kaca. Selain itu, tumpukan sampah ini juga berpotensi menjadi sarang bagi berbagai binatang, yang bisa menjadi sumber penyakit [2].

Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan mengatakan bahwa Indonesia menimbulkan sampah sebanyak 175.000 ton/hari, yang jika diakumulasikan mencapai 64 juta ton/tahun. Selain itu, Indonesia juga tercatat sebagai negara kedua terbesar penyumbang sampah plastik ke lautan [3]. Jenis plastik yang paling banyak dikumpulkan adalah PP *rigid* (25%), HDPE *film* (20%), PET *rigid* (20%), HDPE *rigid* (14%) dan PP

film (9%) [4]. Daur ulang kimia yang juga dikenal dengan daur ulang bahan baku, ini merujuk pada sekelompok teknologi yang menggunakan proses termal dan kimia untuk mengubah limbah plastik menjadi produk bernilai tambah [5]. Pengolahan sampah dengan proses termal merupakan teknologi yang cukup menjanjikan untuk mengatasi masalah timbulan sampah yang lebih ramah lingkungan dan ekonomis [6]. Teknologi tersebut tidak hanya mengurangi sampah tetapi juga menghasilkan energi yang dapat dimanfaatkan.

Revolusi energi bersih mendorong pencarian solusi inovatif dalam mengelola limbah, khususnya sampah plastik. Studi literatur ini bertujuan untuk membandingkan berbagai teknologi termal (pirolisis, gasifikasi, dan insinerasi) yang dapat digunakan untuk mengurangi timbulan sampah plastik dan mengkonversi menjadi sumber energi. Dengan mengidentifikasi teknologi termal yang paling efektif dalam menghasilkan kualitas produk pengolahan sampah plastik yang bernilai tinggi. Selain itu, studi ini juga akan mengevaluasi potensi pencemaran masing-masing teknologi yang dihasilkan.

2. Metode Penelitian

Berbagai penelitian terdahulu yang sudah menggunakan teknologi termal insinerasi, pirolisis, dan gasifikasi yang berfokus pada sampah plastik. Studi literatur diidentifikasi dari jurnal nasional maupun internasional yaitu Elsevier dan google scholar melakukan *screening* dengan menggunakan kata kunci yang digunakan dalam literatur review ini yaitu “Teknologi termal, teknologi pirolisis, teknologi gasifikasi, dan teknologi insinerasi, konversi energi, dan plastik”, tahun terbit jurnal yang dibahas antara 2015-2024.

3. Hasil dan Pembahasan

Plastik

Plastik adalah material sintesis atau semi-sintetis yang tersusun dari molekul polimer besar, terbentuk dari proses polimerisasi. Selain polimer, plastik juga dapat mengandung zat aditif untuk meningkatkan sifatnya [7]. Berdasarkan jenisnya, plastik terbagi menjadi 6 jenis yaitu: *High Density Polyethylene* (HDPE), *Low Density Polyethylene* (LDPE), *Polypropylene* (PP), *Polyvinyl Chloride* (PVC), *Polystyrene* (PS) dan *Polyethylene Terephthalate* (PET) [8]. Jenis-jenis plastik tersebut memiliki sifat yang bervariasi yang dapat dilihat pada **Tabel 1**.



Gambar 1. Kode Plastik

Sumber: [9]

Tabel 1. Jenis Plastik dan Sifat

Jenis	Sifat
<i>High Density Polyethylene</i> (HDPE)	Keras, kaku, berwarna lebih buram, selalu berwarna putih susu walaupun tipis.
<i>Low Density Polyethylene</i> (LDPE)	Fleksibel dan mudah dipotong, seperti lilin. Berwarna transparan.
<i>Polypropylene</i> (PP)	Lebih kaku dari <i>Polyethylene</i> (PE) dan dapat ditekuk tanpa putus
<i>Polyvinyl Chloride</i> (PVC)	Bahan yang keras dan kaku. Contoh: botol, terpal tipis, bahan kemasan transparan, pipa air dsb.
<i>Polystyrene</i> (PS)	Bersifat rapuh dan biasanya transparan. Sering dicampur (dikopolimerisasi) dengan bahan lain untuk mendapatkan sifat yang diinginkan
<i>Polyethylene Terephthalate</i> (PET)	Memiliki ketahanan yang baik terhadap asam, penghalang yang baik terhadap oksigen dan karbon dioksida.

Sumber: [9]

Tabel 2. Jenis plastik dengan Suhu transisi gelas (T_g), titik lebur (T_m) dan suhu dekomposisi (T_d).

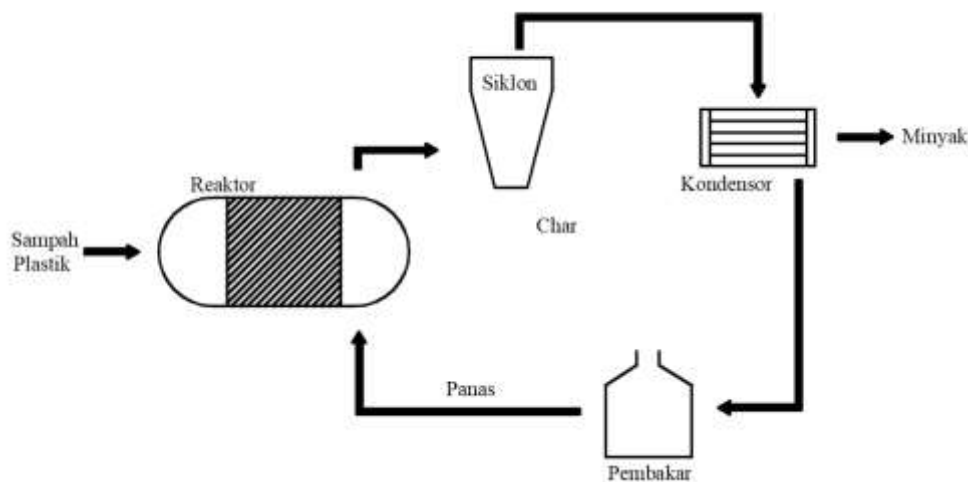
Jenis Plastik	T_g (°C)	T_m (°C)	T_d (°C)
HDPE	110	138	427
LDPE	115	160-240	384
PP	5	149	328

Jenis Plastik	T _g (°C)	T _m (°C)	T _d (°C)
PS	101	70-140	367
PVC	82	85	284
PET	86	250	428

Sumber: [11],[12],[13],[14]

Prinsip Kerja Teknologi Termal

Pirolisis merupakan proses penguraian sampah plastik menjadi komponen yang lebih sederhana di tempat yang tidak terdapat oksigen atau rendah oksigen. Pada pirolisis ini terjadinya penguraian hidrokarbon menjadi lebih sederhana [15]. Proses pirolisis ini melibatkan tiga mekanisme dekomposisi yang meliputi pemotongan rantai polimer, pemotongan ujung rantai, dan pemisahan rantai polimer yang semuanya bertujuan untuk membentuk molekul-molekul kecil. Ketiga proses ini umumnya berlangsung secara bersamaan [16]. Banyak peneliti yang mengusulkan proses pirolisis ini yang mampu menghasilkan minyak cair dalam jumlah besar hingga 80 wt% dengan suhu 500°C [17]. Berdasarkan tingkat pemanasan dan waktu reaksi proses pirolisis dapat dibedakan menjadi tiga jenis yaitu: pirolisis lambat, pirolisis cepat dan pirolisis kilat [18]. Pada **Gambar 2**. Terdapat ilustrasi alur proses pirolisis dari sampah plastik dimasukkan ke dalam reaktor pirolisis, hingga hasil/produk yang dihasilkan dari pengolahan sampah plastik yaitu minyak.



Gambar 2. Modifikasi Ilustrasi Alur Pirolisis
 Sumber: [19]

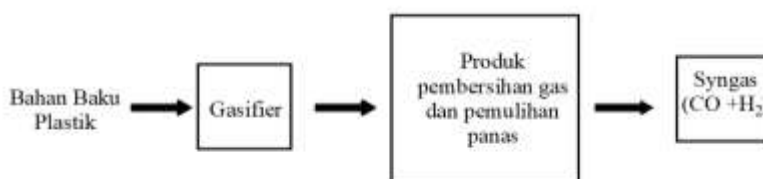
Produk yang utama dihasilkan dari pirolisis yaitu minyak (tar) yang mengandung campuran kompleks hidrokarbon, gas (H_2 , CO , H_2O dan CH_4 , arang (char) [20] [21][22]. Ada beberapa faktor yang dapat mempengaruhi proses pirolisis yaitu: suhu, dengan meningkatnya suhu hasil minyak (tar) yang dihasilkan juga akan meningkat; waktu, semakin lama proses pirolisis berlangsung, maka jumlah produk yang dihasilkan (minyak (tar), gas, dan char) juga akan semakin banyak; ukuran partikel, semakin besar ukuran partikel maka proses pirolisis yang terjadi semakin lambat; berat partikel, banyaknya bahan baku yang dimasukkan menyebabkan produk yang dihasilkan semakin meningkat [23] [24].

Gasifikasi

Gasifikasi merupakan proses bahan-bahan yang mengandung karbon diubah menjadi gas sintesis, terutama hidrogen (H_2) dan karbon monoksida (CO), dengan jumlah oksidator yang terbatas [25]. Produk utama gasifikasi adalah syngas. Biasanya gas tersebut terkontaminasi oleh produk yang tidak diinginkan seperti partikulat, tar, logam alkali, klorida, dan sulfat [26]. Pada suhu tinggi selama gasifikasi, sementara reaksi perengkahan polimer dan pembentukan kembali hidrokarbon yang retak menghasilkan gas, polimerisasi ulang, dan perengkahan tidak lengkap akan membentuk campuran residu hidrokarbon aromatik berat yang disebut tar [27].

Parameter proses gasifikasi antara lain yaitu: laju aliran gas, laju aliran umpan, suhu dan tekanan operasi. pemilihan ini tergantung pada komposisi gas produk yang ingin dihasilkan. Parameter penting lain yang perlu dipertimbangkan dalam gasifikasi plastik adalah media gasifikasi. Gasifikasi ini dapat dilakukan dalam atmosfer udara, uap, oksigen, karbon dioksida, atau kombinasi dari gas-gas ini. Dibandingkan dengan oksigen, gasifikasi udara memiliki keunggulan biaya yang lebih rendah [19]. Plastik memiliki konduktivitas

termal yang rendah menyebabkan adhesi dalam reaktor. Pada saat yang sama, kandungan volatil plastik yang tinggi menyebabkan tar yang diproduksi menjadi lebih banyak. Karena kandungan volatil yang lebih tinggi, produksi tar selama gasifikasi plastik diperkirakan lebih tinggi daripada gasifikasi biomassa dan batu bara [19][28].



Gambar 3. Modifikasi Ilustrasi Alur Gasifikasi
 Sumber: [29]

Proses gasifikasi digambarkan pada **Gambar 3**. Bahan baku seperti biomassa dan limbah plastik memasuki reaktor setelah melewati *screw feeder*, bahan baku dikeringkan dan masuk ke reaktor. Panas yang dibutuhkan untuk proses pengeringan disuplai dari reaksi eksotermik yang terjadi selama gasifikasi. Bahan baku bereaksi dengan media gasifikasi (udara). Syngas yang dihasilkan mengandung hidrogen, karbon monoksida, karbon dioksida, metana, uap, dan nitrogen. Proses gasifikasi ini berlangsung secara isothermal sehingga dalam proses ini terdapat suhu gasifikasi dan tekanan gasifikasi [30]. Proses ini menggabungkan pemisahan reaksi pembakaran menjadi dua langkah untuk memperoleh listrik dan mensintesis hidrogen [28].
Potensi Produk Pirolisis dan gasifikasi

Penggunaan plastik sebagai bahan baku untuk pirolisis telah menjadi potensi yang lebih baik karena mampu menghasilkan distilat yang lebih banyak dibandingkan dengan bahan baku organik lainnya [19]. Hal ini dikarenakan sebagian besar plastik terdiri dari hidrokarbon [31]. **Tabel 3** menunjukkan jenis plastik yang menjadi bahan baku berbanding produk yang dihasilkan dari proses pirolisis atau yield (wt%). Yield adalah fraksi massa produk pirolisis. Yield yang dihasilkan bahan baku plastik PS menghasilkan produk minyak yang paling banyak sebesar 99,5% dengan suhu 400°C. Sedangkan, produk arang (char) paling banyak pada bahan baku plastik PET dengan yield sebesar 63,4 %, hal ini dikarenakan terjadi retakan sekunder yang memecah rantai panjang menjadi rantai yang lebih pendek, sehingga proses kondensasi tidak dapat terjadi [32].

Tabel 3. Fraksi Massa Produk Proses Pirolisis

Jenis Plastik	Suhu (°C)	Produk (wt%)			Sumber
		Minyak (tar)	Gas	Arang (char)	
HDPE	300	88,54	9,12	2,34	[33]
LDPE	300	78,39	11,49	10,12	[33]
PP	500	20,7	8,8	70,5	[34]
PS	400	99,5	0,50	-	[35]
PVC	400	30,3	59,2	10,5	[35]
PET	500	17,8	18,8	63,4	[34]

Bahan baku yang digunakan pada pengolahan pirolisis memiliki pengaruh terhadap hasil minyak yang didapatkan. Jika melihat pada **Tabel 3** bahan baku PP menghasilkan minyak yang paling banyak sesuai dengan produk utama pirolisis. Minyak hasil pirolisis plastik dapat dikonversi menjadi bahan bakar minyak alternatif [26]. Kualitas minyak harus dibandingkan dengan standar mutu minyak yang telah ditetapkan, meliputi beberapa parameter seperti berat jenis, viskositas, titik nyala dan nilai kalor. Berat jenis yang didapatkan padat sampah plastik jenis HDPE dan PET berturut-turut 769 kg/m³ dan 794 kg/m³ yang sebanding dengan bahan bakar minyak tanah [36].

Komposisi gas hasil gasifikasi sangat bervariasi tergantung pada jenis bahan baku. Pada **Tabel 4** campuran plastik menghasilkan gas dengan kandungan H₂ dan CO yang cukup tinggi. Pencampuran bahan baku biomassa dan 25% plastik PP menghasilkan gas H₂ paling besar. Untuk PP murni menghasilkan gas dengan kandungan CH₄ yang cukup tinggi jika dibandingkan dengan bahan baku lainnya, dikarenakan PP merupakan polimer linier olefin yang dimana dapat didepolimerisasi untuk menghasilkan banyak alkana dan alkena. Sehingga lebih banyak gas alkana (CH₄ dan C₂H₆) [37]. Pada penelitian yang dilakukan [38], konsentrasi CH₄ pada bahan baku PP lebih tinggi dan tar yang dihasilkan lebih rendah, maka dari itu bahan

baku ini mungkin jika dilakukan pengolahan dengan gasifikasi lebih tepat mengingat proses gasifikasi menginginkan produk tar yang rendah. Produk syngas dapat digunakan untuk sintesis *fischer-tropsch* [39].

Tabel 4. Fraksi massa produk gas gasifikasi

Bahan Baku	H ₂ (%)	CO (%)	CH ₄ (%)	CO ₂ (%)	C ₂ H ₄ (%)	C ₂ H ₆ (%)	Sumber
Mix (PVC, PE, PET, PS dan PP)	24,79-27,96	13,82-18,42	10,2-3,8	5,18-2,7	-	-	[19]
Biomassa +25% PP	60	33	0,3	6	-	-	[40]
PP	36,99	1,68	26,57	27,82	0,86	6,08	[37]

Perbandingan Pirolisis dan Gasifikasi

Pirolisis dan gasifikasi tentunya merupakan teknologi termal yang berbeda. Pirolisis terjadi dalam atmosfer inert dan karenanya tidak memerlukan media gasifikasi apapun. Pirolisis ini dianggap sebagai teknologi yang lebih baik untuk mengkonversi limbah plastik. Dari sudut pandang pencemaran lingkungan, pirolisis lebih baik, karena proses pirolisis dalam kondisi inert, sehingga tidak terdapat pembentukan dioksin yang terjadi [19]. **Tabel 5** menunjukkan jika dilakukan pengolahan dengan menggunakan kedua proses termal tersebut. Pirolisis menghasilkan gas SO₂ dan NH₃ sedangkan, gasifikasi hanya SO₂. Gas SO₂ mengakibatkan pencemaran udara dan dapat menimbulkan gangguan kesehatan. Begitupun NH₃ yang dapat berubah menjadi NO₂ [41]. Sedangkan, untuk *smog* yang dihasilkan dari pirolisis hanya O₃ dan NO_x, sedangkan gasifikasi menimbulkan gas pencemar yang lebih beragam. Namun, jika konsentrasi gas-gas tersebut masih dibawah baku mutu dapat mengurangi potensi terjadinya pencemaran.

Tabel 5. Perbandingan Teknologi Termal

	Pirolisis	Gasifikasi	Sumber
Kebutuhan Oksigen	Tidak ada oksigen	Oksigen terbatas	[26]
Suhu	300-900°C	>600°C	[26]
Produk	Minyak, gas, char	Syngas, abu	[26]
Analisis Siklus Hidup (<i>Life Cycle Assessment</i>) LCA			
Asidifikasi	SO ₂ , NH ₃	SO ₂	[42],[43]
<i>smog</i>	O ₃ , NO _x	VOC, CO, NO _x dan CH ₄	[42],[43]

4. Kesimpulan

Studi literatur ini telah menganalisis perbandingan teknologi termal (pirolisis dan gasifikasi) yang dapat untuk mengelola sampah plastik. Kedua teknologi ini dapat mengkonversi sampah plastik menjadi sumber energi. Teknologi termal pirolisis lebih cocok digunakan untuk pengolahan sampah plastik dimana hasil produk berupa minyak yang dapat menjadi alternatif bahan bakar dan pirolisis berlangsung dalam proses tanpa oksigen sehingga risiko pembentukan senyawa berbahaya seperti dioksin lebih rendah. Namun, emis gas seperti SO₂ dan NH₃ tetap perlu diperhatikan. Untuk teknologi termal gasifikasi menghasilkan emisi yang lebih beragam dibandingkan pirolisis.

5. Referensi

- [1] M. W. Saputra, E. Lissa, dan D. Sumaryono, "Peran Promotor Kesehatan Terhadap Perilaku Membuang Sampah Pada Masyarakat," *J. Promosi Kesehat. Poltekkes Bengkulu*, vol. 4, no. 1, hal. 1–9, 2024, doi: <https://doi.org/10.33088/jurnalprosehatku.v3i1.587>.
- [2] T. Artiningrum, "Potensi Emisi Metana (CH₄) Dari Timbulan Sampah Kota Bandung," *Geoplanart*, vol. 1, no. 1, hal. 36–44, 2018.
- [3] N. El Fajri *et al.*, "Ecobrick Sebagai Solusi Penanggulangan Sampah Plastik di Desa Tambak," *J. Pengabd. Kpd. Masy.*, vol. 2, no. 1, hal. 1–12, 2022.
- [4] N. Darus *et al.*, "An Overview of Plastic Waste Recycling in the Urban Areas of Java Island in Indonesia," *J. Environ. Sci. Sustain. Dev.*, vol. 3, no. 2, hal. 402–415, 2020, doi: 10.7454/jessd.v3i2.1073.
- [5] T. Xayachak, N. Haque, D. Lau, R. Parthasarathy, dan B. K. Pramanik, "Assessing the Environmental Footprint of Plastic Pyrolysis and Gasification: A Life Cycle Inventory Study," *Process Saf. Environ. Prot.*, vol. 173, no. February, hal. 592–603, 2023, doi: 10.1016/j.psep.2023.03.061.

- [6] M. Taufiqurrohmah dan M. Yusuf, "Pemanfaatan Energi Terbarukan dalam Pengolahan Daur Ulang Limbah," *J. Mentari Manajemen, Pendidik. dan Teknol. Inf.*, vol. 1, no. 1, hal. 46–57, 2022, doi: 10.34306/mentari.v1i1.141.
- [7] S. Ratnawati, "Processing of Plastic Waste Into Alternative Fuels in The Form of Grounded (Pertalastic) Through Pyrolysis Process in Science Laboratory of MTsN 3 West Aceh," *Indones. J. Chem. Sci. Technol.*, vol. 3, no. 1, hal. 8, 2020, doi: 10.24114/ijest.v3i1.18310.
- [8] E. Hartulistiyoso, F. A. P. A. G. Sigiro, dan M. Yulianto, "Temperature Distribution of the Plastics Pyrolysis Process to Produce Fuel at 450oC," *Procedia Environ. Sci.*, vol. 28, no. Sustain 2014, hal. 234–241, 2015, doi: 10.1016/j.proenv.2015.07.030.
- [9] UNEP, "Converting Waste Plastics Into a Resources," *Assess. Guidel.*, hal. 73, 2009.
- [10] Y. Bow, Zulkarnain, S. P. Lestari, S. R. Sihombing, S. A. Kharissa, dan Y. A. Salam, "Pengolahan Sampah Low Density Polyethylene (LDPE) Dan Polypropylene (PP) Menjadi Bahan Bakar Cair Alternatif Menggunakan Prototipe Pirolisis Thermal Cracking," *J. Kinet.*, vol. 9, no. 03, hal. 1–6, 2018, [Daring]. Tersedia pada: <https://jurnal.polsri.ac.id/index.php/kimia/index>
- [11] M. L. Henriksen, C. B. Karlsen, P. Klarskov, dan M. Hinge, "Plastic Classification Via in-line Hyperspectral Camera Analysis and Unsupervised Machine Learning," *Vib. Spectrosc.*, vol. 118, no. September 2021, hal. 103329, 2022, doi: 10.1016/j.vibspec.2021.103329.
- [12] M. Minduro, I. N. Suarnadwipa, dan K. Astawa, "Pengaruh Variasi Sampah Plastik Jenis High Density Polyethylene (HDPE) , Low Density Polyethylene (LDPE) , dan Polypropylene (PP) Terhadap Volume Minyak Hasil Pirolisis," *J. Ilm. Tek. Desain Mek.*, vol. 13, no. 3, 2024.
- [13] T. R. Hidayani, E. Pelita, dan G. Gusfiyesi, "Analisis Sifat Fisika Pemanfaatan Pati Tandan Kosong Sawit dan Limbah Plastik LDPE sebagai Bahan Pembuatan Plastik Biodegradabel," *Maj. Kulit, Karet, dan Plast.*, vol. 33, no. 1, hal. 29, 2017, doi: 10.20543/mkpk.v33i1.2202.
- [14] N. Hidayati *et al.*, "Karakteristik Sampah Plastik di Laguna Segara Anakan Cilacap," *Pros. Semin. Nas. Lahan Suboptimal ke-10 Tahun 2022*, vol. 6051, hal. 293–301, 2022.
- [15] W. U. Eze, R. Umunakwe, H. C. Obasi, M. I. Ugbaja, C. C. Uche, dan I. C. Madufor, "Plastics Waste Management: A Review of Pyrolysis Technology," *Clean Technol. Recycl.*, vol. 1, no. 1, hal. 50–69, 2021, doi: 10.3934/ctr.2021003.
- [16] M. S. Cahyono, M. R. P. Liestiono, dan C. Widodo, "Proses Pirolisis Sampah Plastik dalam Rotary Drum Reactor dengan Variasi Laju Kenaikan Suhu," *Pros. Semin. Nas. Teknoka*, vol. 3, no. 2502, hal. 63, 2019, doi: 10.22236/teknoka.v3i0.2917.
- [17] A. Vijayakumar dan J. Sebastian, "Pyrolysis Process to Produce Fuel from Different Types of Plastic - A review," *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 396, no. 1, hal. 0–8, 2018, doi: 10.1088/1757-899X/396/1/012062.
- [18] W. J. Liu, W. W. Li, H. Jiang, dan H. Q. Yu, "Fates of Chemical Elements in Biomass during Its Pyrolysis," *Chem. Rev.*, vol. 117, no. 9, hal. 6367–6398, 2017, doi: 10.1021/acs.chemrev.6b00647.
- [19] S. A. Salaudeen, P. Arku, dan A. Dutta, *Gasification of Plastic Solid Waste and Competitive Technologies*. Elsevier Inc., 2018. doi: 10.1016/B978-0-12-813140-4.00010-8.
- [20] M. Kusenbergh *et al.*, "Opportunities and Challenges for the Application of Post-Consumer Plastic Waste Pyrolysis Oils as Steam Cracker Feedstocks: To Decontaminate or not to Decontaminate?," *Waste Manag.*, vol. 138, hal. 83–115, 2022, doi: 10.1016/j.wasman.2021.11.009.
- [21] R. Miandad, M. A. Barakat, A. S. Aburiazza, M. Rehan, dan A. S. Nizami, "Catalytic Pyrolysis of Plastic Waste: A Review," *Process Saf. Environ. Prot.*, vol. 102, hal. 822–838, 2016, doi: 10.1016/j.psep.2016.06.022.
- [22] T. K. Dhaniswara dan Dian Fahriani, "Produksi Bahan Bakar Minyak (BBM) dari Sampah Botol Plastik Bekas Air Minum dengan Metode Pirolisis," *J. Res. Technol.*, vol. 7, no. 1, hal. 83–92, 2021, doi: 10.55732/jrt.v7i1.413.
- [23] Seri Maulina dan Feni Sari Putri, "Pengaruh Suhu, Waktu, Dan Kadar Air Bahan Baku Terhadap Pirolisis Serbuk Pelepeh Kelapa Sawit," *J. Tek. Kim. USU*, vol. 6, no. 2, hal. 35–40, 2017, doi: 10.32734/jtk.v6i2.1581.
- [24] A. A. Pagestu dan Y. Robbani, "Pemanfaatan Limbah Plastik Menjadi Bahan Bakar dengan Menggunakan Metode Pirolisis dan Penambahan Katalis Zeolit," Institut Teknologi Sepuluh Nopember, 2018.
- [25] I. Janajreh, I. Adeyemi, S. S. Raza, dan C. Ghenai, "A Review of Recent Developments and Future Prospects in Gasification Systems and Their Modeling," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 138, no. February, hal. 110505, 2021, doi: 10.1016/j.rser.2020.110505.

- [26] A. Antelava *et al.*, “Energy Potential of Plastic Waste Valorization: A Short Comparative Assessment of Pyrolysis versus Gasification,” *Energy and Fuels*, vol. 35, no. 5, hal. 3558–3571, 2021, doi: 10.1021/acs.energyfuels.0c04017.
- [27] K. G. Burra dan A. K. Gupta, “Synergistic Effects in Steam Gasification of Combined Biomass and Plastic Waste Mixtures,” *Appl. Energy*, vol. 211, no. July 2017, hal. 230–236, 2018, doi: 10.1016/j.apenergy.2017.10.130.
- [28] H. Xu dan B. Shi, “Design and System Evaluation of Mixed Waste Plastic Gasification Process Based on Integrated Gasification Combined Cycle System,” *Processes*, vol. 10, no. 3, 2022, doi: 10.3390/pr10030499.
- [29] P. Basu, *Biomass Gasification and Pyrolysis*. Elsevier Inc., 2010.
- [30] M. Mojaver, R. Hasanzadeh, T. Azdast, dan C. B. Park, “Comparative Study on Air Gasification of Plastic Waste and Conventional Biomass Based on Coupling of AHP/TOPSIS Multi-Criteria Decision Analysis,” *Chemosphere*, vol. 286, no. P3, hal. 131867, 2022, doi: 10.1016/j.chemosphere.2021.131867.
- [31] F. Zhang *et al.*, “Current Technologies for Plastic Waste Treatment: A review,” *J. Clean. Prod.*, vol. 282, hal. 124523, 2021, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.124523.
- [32] N. Kholidah, “Pengaruh Temperatur terhadap Persentase Yield pada Proses Perengkahan Katalitik Sampah Plastik menjadi Bahan Bakar Cair,” *ALKIMIA J. Ilmu Kim. dan Terap.*, vol. 2, no. 1, hal. 28–33, 2018, doi: 10.19109/alkimia.v2i1.2259.
- [33] M. Sogancioglu, E. Yel, dan G. Ahmetli, “Pyrolysis of Waste High Density Polyethylene (HDPE) and Low Density Polyethylene (LDPE) Plastics and Production of Epoxy Composites with Their Pyrolysis Chars,” *J. Clean. Prod.*, vol. 165, hal. 369–381, 2017, doi: 10.1016/j.jclepro.2017.07.157.
- [34] S. Honus, S. Kumagai, G. Fedorko, V. Molnár, dan T. Yoshioka, “Pyrolysis gases produced from individual and mixed PE, PP, PS, PVC, and PET—Part I: Production and physical properties,” *Fuel*, vol. 221, no. January, hal. 346–360, 2018, doi: 10.1016/j.fuel.2018.02.074.
- [35] A. Ephraim, D. Pham Minh, D. Lebonnois, C. Peregrina, P. Sharrock, dan A. Nzihou, “Co-pyrolysis of Wood and Plastics: Influence of Plastic Type and Content on Product Yield, Gas Composition and Quality,” *Fuel*, vol. 231, no. July 2017, hal. 110–117, 2018, doi: 10.1016/j.fuel.2018.04.140.
- [36] D. A. Lubis, A. Arifin, dan Y. Fitrianiingsih, “Pengolahan Sampah Plastik HDPE (High Density Polyethylene) dan PET (Polyethylene Terephthalate) Sebagai Bahan Bakar Alternatif dengan Proses Pirolisis,” *J. Ilmu Lingkung.*, vol. 20, no. 4, hal. 735–742, 2022, doi: 10.14710/jil.20.4.735-742.
- [37] C. Cao, C. Bian, G. Wang, B. Bai, Y. Xie, dan H. Jin, “Co-Gasification of Plastic Wastes and Soda Lignin in Supercritical Water,” *Chem. Eng. J.*, vol. 388, no. December 2019, hal. 124277, 2020, doi: 10.1016/j.cej.2020.124277.
- [38] M. Ajorloo, M. Ghodrat, J. Scott, dan V. Strezov, “Experimental Analysis of The Effects of Feedstock Composition on the Plastic and Biomass Co-Gasification Process,” *Renew. Energy*, vol. 231, no. June, 2024, doi: 10.1016/j.renene.2024.120960.
- [39] Y. Hu *et al.*, “Investigation of Biomass Gasification Potential in Syngas Production: Characteristics of Dried Biomass Gasification Using Steam as the Gasification Agent,” *Energy and Fuels*, vol. 34, no. 1, hal. 1033–1040, 2020, doi: 10.1021/acs.energyfuels.9b02701.
- [40] M. N. Kaydouh dan N. El Hassan, “Thermodynamic Simulation of the Co-Gasification of Biomass and Plastic Waste for Hydrogen-Rich Syngas Production,” *Results Eng.*, vol. 16, no. August, 2022, doi: 10.1016/j.rineng.2022.100771.
- [41] L. N. Qolifah, N. E. Wahyuningsih, dan Y. H. Darundiati, “Karakteristik Risiko Kesehatan Non Karsinogenik Akibat Paparan Gas SO₂ dan NO₂ pada Pemulung di TPA Jatibarang Kota Semarang,” *J. Kesehat. Lingkung. Indones.*, vol. 23, no. 1, hal. 50–58, 2024, doi: 10.14710/jkli.23.1.50-58.
- [42] S. Saxena, “Pyrolysis and beyond: Sustainable valorization of plastic waste,” *Appl. Energy Combust. Sci.*, vol. 21, no. July 2024, 2025, doi: 10.1016/j.jaecs.2024.100311.
- [43] A. S. Ouedraogo, R. S. Frazier, dan A. Kumar, “Comparative Life Cycle Assessment of Gasification and Landfilling for Disposal of Municipal Solid Wastes,” *Energies*, vol. 14, no. 21, 2021, doi: 10.3390/en14217032.