

Kajian Literatur : Konversi Termokimia Biomassa Untuk Pengelolaan Lingkungan Dan Produksi Material Baru

¹Irnanda Pratiwi, ²Susila Arita, ³Leily Nurul Komariah

¹Ilmu Teknik, Universitas Sriwijaya, Palembang

^{2,3}Teknik Kimia, Universitas Sriwijaya, Palembang

E-mail: ¹irnanda_pratiwi@univ-tridianti.ac.id, ²susilaarita@ft.unsri.ac.id,
³leilynurul@unsri.ac.id

ABSTRAK

Proses konversi termokimia dapat menghasilkan berbagai produk, mulai dari listrik dan panas hingga bahan bakar cair (seperti biodiesel) dan bahan kimia bernilai tinggi. Ini memberikan fleksibilitas untuk memenuhi berbagai kebutuhan energi. Penelitian ini menggunakan metode penelitian kualitatif deskriptif dengan teknik pengumpulan data yaitu studi literatur. Dengan mengoptimalkan berbagai tahap proses konversi biomassa, dari pemilihan bahan baku hingga valorisasi produk, studi bertujuan untuk mengatasi tantangan kritis dalam produksi energi, perlindungan lingkungan, dan konservasi sumber daya, membuka jalan menuju bioekonomi yang lebih berkelanjutan dan sirkular. Lanskap spasial menunjukkan minat global dalam konversi termokimia.

Kata kunci : *Biomassa, Energi, Konversi, Termokimia*

ABSTRACT

Thermochemical conversion processes can produce a variety of products, from electricity and heat to liquid fuels (such as biodiesel) and high-value chemicals. This provides flexibility to meet various energy needs. This study uses a descriptive qualitative research method with a literature review as a data collection technique. By optimizing various stages of the biomass conversion process, from raw material selection to product valorization, the study aims to address critical challenges in energy production, environmental protection, and resource conservation, paving the way towards a more sustainable and circular bioeconomy. The spatial landscape demonstrates the global interest in thermochemical conversion.

Keyword: *Biomass, Energy, Conversion, Thermochemical*

1. PENDAHULUAN

Selama bertahun – tahun, manusia telah mendorong penggunaan berbagai sumber biomassa untuk menghasilkan energi dan bahan bakar. Pemanfaatan bahan bakar biomassa sangat rendah karena eksplorasi energi

fosil konvensional yang relatif murah, mudah ditangani, mudah diangkut, dan mengandung kandungan energi yang tinggi. Namun karena krisis energi yang kuat, kebutuhan akan keberlanjutan, kenaikan harga yang tajam, dan isu lingkungan, perhatian global kembali beralih ke sumber bahan bakar alternatif terbarukan (Kundu, Chatterjee,

Bhattacharyya, Roy, & Kaur, 2018). Pencarian dan pengembangan energi alternatif terbarukan menjadi salah satu solusi pemenuhan energi ke depan (Nawawi et al., 2018). Penggunaan fisik untuk energi Indonesia dengan input energi alam terbarukan menempatkan input energi berbasis biomassa menjadi yang terbesar yang ditunjukkan pada tabel 1.

Tabel 1. Penggunaan Energi Indonesia

<i>Input Energi Alam</i>	<i>Total Penggunaan Fisik untuk Energi Indonesia (Peta Joule)</i>
Input Energi Alam Terbarukan Berbasis Air	86.7
Input Energi Alam Terbarukan Berbasis Angin	1.7
Input Energi Alam Terbarukan Berbasis Surya	2.5
Input Energi Alam Terbarukan Berbasis Biomassa	612.3
Input Energi Alam Terbarukan Berbasis Panas Bumi	61

Banyak bahan baku biomassa berasal dari limbah pertanian dan kehutanan yang tidak terpakai. Pemanfaatan limbah ini membantu mengurangi masalah lingkungan akibat penumpukan sampah organik. Pemanfaatan biomassa sebagai sumber energi lokal dapat mengurangi ketergantungan pada impor bahan bakar fosil dan menciptakan lapangan kerja baru di daerah pedesaan, mulai dari pengumpulan bahan baku hingga peroperasian fasilitas konversi.

Proses konversi termokimia dapat menghasilkan berbagai produk, mulai dari

listrik dan panas hingga bahan bakar cair (seperti biodiesel) dan bahan kimia bernilai tinggi. Ini memberikan fleksibilitas untuk memenuhi berbagai kebutuhan energi.

2. LANDASAN TEORI

Konversi termokimia biomassa adalah proses mengubah bahan baku biomassa seperti limbah pertanian, perkebunan dan kehutanan menjadi produk energi yang lebih bermanfaat, seperti minyak, gas dan arang melalui pemanasan suhu tinggi. Adapun jenis limbah yang dihasilkan dari produk pertanian yang memiliki nilai kalori tinggi adalah limbah kelapa sawit (Hidayati & Ekayuliana, 2022). Proses ini tidak melibatkan oksigen atau hanya sedikit oksigen, sehingga meminimalkan pembakaran dan mengoptimalkan produksi produk energi. Konversi termokimia biomassa memiliki prospek yang sangat menjanjikan untuk masa depan energi, terutama dalam mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil.

Biomassa adalah sumber energi terbarukan karena berasal dari tumbuhan yang dapat ditanam kembali. Selama pertumbuhan, tumbuhan menyerap karbondioksida (CO_2) dari atmosfer melalui proses fotosintesis. Saat biomassa dibakar atau dikonversi, CO_2 yang dilepaskan kembali ke atmosfer akan diserap lagi oleh tumbuhan baru, menjadikannya siklus yang relatif netral karbon. Biomassa juga merupakan material biologis yang berasal dari suatu kehidupan, atau organisme yang masih hidup yang berstruktur karbon dan campuran kimiawi bahan organik yang mengandung hidrogen, nitrogen, oksigen, dan sejumlah kecil dari atom – atom & elemen – elemen lainnya (Ridhuan, Irawan, & Inthifawzi, 2019).

Beberapa metode utama dalam konversi termokimia biomassa, yang masing – masing menghasilkan produk yang berbeda :

- a. **Pirolisis** : merupakan teknologi termokimia yang digunakan untuk mengubah biomassa menjadi energi dan produk kimia tanpa oksigen, yang mencakup biofuel solid, liquid, dan gas (Sarker et al., 2024). Cairan yang dihasilkan dalam proses ini merupakan awal terbentuknya, bio-oil, yang dalam perlakuan selanjutnya bisa menjadi biodiesel atau bioethanol (Novita, Santosa, Nofaldi, Andasuryani, & Fudholi, 2021).
- b. **Gasifikasi** : Proses mengubah biomassa menjadi syngas (campuran gas hydrogen, karbon monoksida, dan metana) dengan memanaskannya pada suhu tinggi (700 – 1200°C) dengan sedikit oksigen atau agen gasifikasi lainnya.
- c. **Pembakaran**: meskipun sering dianggap sebagai proses pembakaran langsung, pembakaran terkontrol pada suhu sangat tinggi (800 – 1400°C) juga termasuk dalam konversi termokimia. Tujuannya adalah menghasilkan panas dan uap yang dapat digunakan untuk pembangkit listrik. Proses ini menggunakan udara berlebih, bukan tanpa oksigen. Reaktor pembakaran biomassa yang umum meliputi perapian, kompor, tungku (tungku dengan boiler, tungku serpihan kayu dan pellet), dan sistem pembakaran industri (sistem pembakaran downdraft, updraft, dan fluidized bed) (Danso-Boateng & Achaw, 2022).
- d. **Torrefaksi** : proses pemanasan biomassa pada suhu rendah (200-300°C) tanpa oksigen. Tujuannya adalah meningkatkan sifat – sifat fisik biomassa, seperti kerapatan energi dan hidrofobisitas (tahan air), sehingga lebih mudah untuk diangkut dan disimpan, serta menjadi bahan bakar pada yang lebih baik.
- e. **Likuifaksi** : proses konversi biomassa menjadi bahan bakar cair,

yang dikenal sebagai bio-oil, dengan menggunakan air bertekanan tinggi sebagai medium pada suhu 200 – 250°C dan tekanan 10-25 MPa (Durak, 2023). Proses ini sering disebut juga sebagai likuifaksi hidrotermal karena bergantung pada penggunaan air panas dan bertekanan.

3. METODOLOGI

Penelitian ini menggunakan metode penelitian kualitatif deskriptif dengan teknik pengumpulan data yaitu studi literatur. Tahap pertama dalam penelitian kajian literatur ini adalah klasifikasi dan kategorisasi pada proses – proses termokimia biomassa yang menghasilkan energi baru dan terbarukan. Tahap kedua pada penelitian ini adalah mengidentifikasi pola dan tren dengan menganalisis kesamaan maupun perbedaan dari temuan – temuan berbagai sumber penelitian. Tahap ketiga pada penelitian ini adalah sistesis informasi yang mana temuan – temuan dari berbagai literatur dapat membentuk pemahaman baru atau konseptualisasi yang lebih utuh.

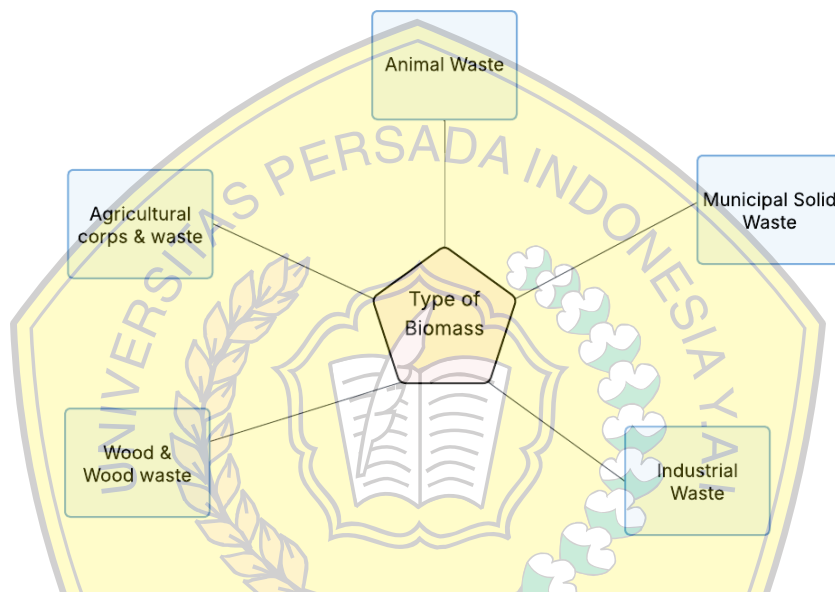
4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Bioenergi adalah jenis bahan bakar yang berasal dari berbagai sumber biomassa termasuk pupuk kandang, lumpur limbah, residu kehutanan, residu pertanian, dan limbah organik pada perkotaan. Bioenergi layak secara ekonomi dan berkelanjutan secara lingkungan. Potensi biofuel, yang ditandai dengan emisi karbon yang rendah dan ketersediaan bahan baku yang melimpah, secara luas diakui sebagai komponen kunci untuk mencapai masa depan yang berkelanjutan.

Industri pengolahan sampah menjadi energi, yang mendukung ekonomi sirkular, telah maju dengan metode yang dapat mengubah berbagai

jenis sampah menjadi energi dan produk bermanfaat melalui proses termokimia dan biokimia. Meskipun teknologi ini membantu mengurangi kebutuhan akan sumber daya tak terbarukan, teknologi ini juga memiliki kekurangan. Konversi termokimia umumnya menghasilkan bahan bakar hayati berkualitas rendah dan menimbulkan biaya produksi yang substansial (Begum, Kumari, Jain, &

Garg, 2024). Sebagai sumber karbon terbarukan, biomassa dapat dikonversikan menjadi bahan kimia dengan potensial prospek yang baik (Zhao, Ma, Huang, Wen, & Hassan, 2022). Biomassa lignoselulosa merupakan campuran selulosa, hemiselulosa, dan lignin dengan kandungan mineral dan ekstraktif yang relatif kecil (Migliaccio et al., 2024)



Gambar 1. Sumber biomassa untuk konversi energi (Danso-Boateng & Achaw, 2022)

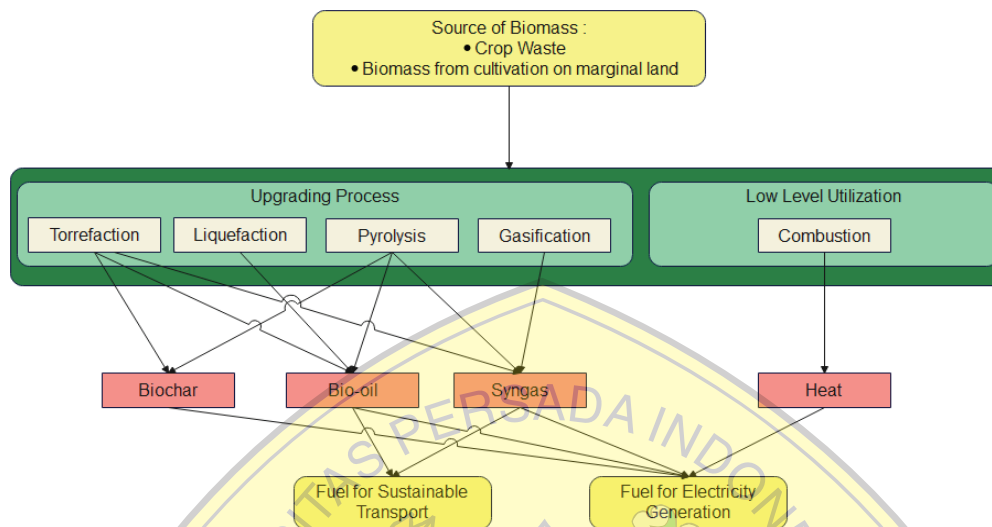
Sumber biomassa dapat dikelompokkan menjadi beberapa bagian yaitu :

1. Limbah pertanian (Agricultural crops and waste) : Jagung, kedelai, tebu, switchgrass, woody plats, tandan kosong sawit, algae, crop & food processing residue
2. Limbah kayu dan pengolahan kayu (Wood and wood waste) : Firewood, wood pellets, wood chips, saw dust, pulp & paper mill black liquor
3. Limbah padat perkotaan (municipal solid waste) : Kertas, kain, wool product, makanan, wood waste.
4. Limbah Industri : paper pulp waste, sewage sludge, textiles

5. Limbah hewan dan peternakan : kotoran hewan, poultry litter.

Proses termokimia untuk masa depan melibatkan penggunaan panas untuk mengkonversi biomassa dan limbah menjadi produk bernilai seperti hidrogen dan bahan bakar bersih, serta mengekstraksi sumber daya melalui siklus pemisahan air. Aplikasi ini dirancang untuk mendukung keberlanjutan dengan mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil, meminimalkan dampak lingkungan, dan mendorong ekonomi sirkular melalui peningkatan efisiensi energi dan pemanfaatan sumber daya terbarukan. Skema potensi biomassa untuk masa depan yang dihasilkan dari

proses termokimia ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2. *Schematic Diagram* Proses Termokimia untuk potensi Biomassa di masa depan (Wang & Wu, 2023)

Perbandingan dari beberapa proses termokimia dan eksperimen serta beberapa penelitian yang telah dilakukan ditunjukkan pada Tabel 2. Keberlanjutan valorisasi biomassa penghasil minyak ditingkatkan dengan memaksimalkan pemanfaatan karbon melalui kombinasi proses pirolisis dan transesterifikasi. (Kim, Park, Lee, Lee, & Kwon, 2026). Oleh karena itu, konversi termokimia sangat penting dalam mendorong pemanfaatan energi biomassa yang berkelanjutan, mengurangi polusi lingkungan, dan meningkatkan lanskap energi secara keseluruhan (Zou et al., 2024). Pirolisis biomassa limbah adalah proses konversi termokimia yang menjanjikan untuk produksi biofuel dan bahan berkelanjutan. Namun, sangat menantang untuk memprediksi dengan akurat sifat dan hasil produk yang terbentuk selama pirolisis (Chinenye Divine et al., 2024). Tahap awal dalam proses konversi batubara menjadi SNG adalah gasifikasi. Selain itu, reaksi

pirolisis dan hidro-pirolisis memiliki potensi untuk menghasilkan berbagai jumlah karbon dan metana (Zhang, Takyi, & Chen, 2024).

Perawatan termokimia dari lumpur berminyak (*Oily Sludge*) telah terbukti menjadi pendekatan yang efektif untuk pemulihan sumber daya dan energi. Namun, migrasi dan emisi polutan potensial telah membatasi pengembangannya lebih lanjut. Dampak lingkungan dari pirolisis, gasifikasi, dan pembakaran OS dievaluasi, terutama berfokus pada senyawa aromatik dalam produk cair, polutan yang mengandung N-, S-, dan Cl dalam produk gas, serta bahan organik sisa dan logam berat dalam residu padat. Ini memberikan pemahaman yang komprehensif tentang implikasi lingkungan dari teknologi perlakuan termokimia untuk OS (Yu et al., 2024).

Tabel 2. Perbandingan dari Proses Termokimia

<i>Proses Konversi Termokimia</i>	<i>Spesifikasi Proses</i>	<i>Eksperimen proses termokimia</i>	<i>Referensi</i>
1. Torfaksi (<i>Torrefaction</i>)	200 - 300°C	Torfaksi kulit kacang Argan telah dipelajari secara laboratorium sebagai proses potensial untuk meningkatkan sifat – sifatnya sebagai bahan bakar. Biomassa ini menunjukkan perilaku yang sangat reaktif bahkan pada suhu torfaksi sedang (200 – 250°C)	(Afailal et al., 2023)
2. Likuifaksi (<i>Liquefaction</i>)	200 - 600°C	Pemilihan pelarut sangat penting dalam pencairan hidrotermal. Air memang ramah lingkungan tetapi kurang produktif, sementara pelarut organik dan bifasik meningkatkan hasil dengan menghambat reaksi samping. Penambahan garam seperti NaCl mengoptimalkan ekstraksi. Katalis berperan penting, karena katalis homogeny sangat reaktif tetapi sulit untuk dipulihkan, sementara katalis heterogen, seperti zeolite dan material berbasis karbon, menawarkan stabilitas dan dapat digunakan kembali sehingga menjanjikan konversi biomassa yang efisien. HTL (Hydrothermal Liquefaction) mengubah limbah susu dengan kadar air tinggi menjadi produk – produk seperti bio-oil, arang, gas, dan zat – zat yang larut dalam air. Teknologi ini masih dalam tahap pengembangan dan belum tersedia secara komersial. Namun HTL berpotensi mencapai swasembada energy dengan mendaur ulang sebagian bio-oil atau arang yang dihasilkan untuk menggerakkan reaktor HTL. Selain itu, HTL efektif dalam membasmi patogen, sehingga bermanfaat untuk pengolahan lumpur. Namun, pada konsentrasi padatan yang sangat rendah, rendemen bio-oil dari HTL mungkin juga rendah, dan viskositasnya mungkin tinggi.	(Qiu, Tao, Wang, Zhang, & Chu, 2025) (Udourioh, Solomon, & Okolie, 2025)
3. Pirolisis (<i>Pyrolysis</i>)	400 – 800°C	Proses ini didasarkan pada prinsip dekomposisi termal, di mana bahan organik dikenakan suhu tinggi dalam lingkungan terkendali, yang menyebabkan pemecahan senyawa organik kompleks menjadi molekul yang lebih sederhana. Sebagai hasil dari pirolisis, fraksi hidrokarbon luas (BHF) diisolasi, yang kemudian mengalami distilasi atmosferik yang menghasilkan fraksi lilin, nafta, dan bensin.	(Durak, 2023) (Jabłońska, Poznańska,

		Pada suhu optimal 400°C, pirolisis PP dan LDPE menghasilkan rendemen minyak masing-masing sebesar 78,3% dan 83,4%, dengan komposisi hidrokarbon yang sangat mirip dengan bahan bakar transportasi konvensional. Analisis GC-MS menunjukkan bahwa PP dan PS dominan menghasilkan hidrokarbon dengan berat molekul lebih rendah (C6–C10), sehingga cocok untuk aplikasi bensin, sedangkan LDPE dan HDPE menghasilkan fraksi yang lebih berat (C16–C22), yang sesuai dengan spesifikasi bahan bakar diesel. Sebaliknya, PVC dan PET ditemukan tidak cocok untuk produksi minyak pirolisis karena rendemen gas tak terkondensasi dan residu padatnya yang tinggi.	Jabłoński, & Dziadas, 2025) (Andalia, Pratiwi, Afrah, Akbar, & Ammarullah, 2025)
4. Gasifikasi (<i>Gasification</i>)	600 – 1200°C	Gasifikasi merupakan teknologi yang sesuai diantara teknologi konversi dalam optimasi <i>olive wood</i> untuk kebutuhan energi. Sehingga dapat menghasilkan energi listrik dan energi panas Limbah Cannabis digunakan sebagai bahan baku untuk memproduksi gas sintesis kaya hidrogen, menggunakan udara dan uap sebagai agen gasifikasi. Uap air diamati meningkatkan kandungan H₂ dalam gas yang dihasilkan. Namun, peningkatan jumlah uap yang berlebihan mengakibatkan penurunan kandungan ini. Di sisi lain, peningkatan suhu justru mendukung perolehan arus H₂ yang tinggi. Di antara nilai rasio ekivalensi yang diteliti, 0,25 menunjukkan hasil terbaik.	(Maggiotto, Colangelo, Milanese, & Risi, 2023) (Lopes, Andrade, Neto, Lavoie, & Vasconcelos, 2024)
5. Pembakaran (<i>Combustion</i>)	800 – 1400°C	Proses recovery fosfor dapat diterapkan dari limbah lumpur abu (<i>sewage sludge ash</i>) dengan menggunakan proses termokimia. Penerapan rangkaian teknologi ini menjanjikan pemanfaatan limbah menjadi produk fosfor yang keberadaannya semakin kompleks dan berpotensi problem di masa depan terkait ketersediaan dan kandungan bahan lainnya yang membahayakan lingkungan dan kesehatan.	(Suhendra & Adam, 2021)

Alternatif untuk pembakaran adalah gasifikasi, yang mengubah biomassa menjadi syngas dan abu. Menggunakan katalis dapat meningkatkan reaksi gasifikasi karena memungkinkan perpindahan panas yang lebih baik di dalam reaktor (Corona-Ruiz, Díaz-Jiménez, & Carlos-Hernández, 2024).

5. KESIMPULAN

Bidang pemanfaatan biomassa dan pengelolaan limbah telah menyaksikan kemajuan luar biasa yang didorong oleh integrasi strategis berbagai perangkat lunak dan metodologi. Pengambilan keputusan multikriteria, simulasi, pengembangan model, dan validasi telah secara signifikan meningkatkan integrasi perangkat lunak untuk optimasi proses, khususnya dalam proses konversi termokimia yang kompleks dan nonlinier di bidang pertanian. Secara keseluruhan, tren dalam penelitian optimasi menggarisbawahi pendekatan holistik terhadap pemanfaatan biomassa berkelanjutan dan pengelolaan limbah, dengan fokus pada inovasi teknologi, integrasi proses, dan pengelolaan lingkungan.

Dengan mengoptimalkan berbagai tahap proses konversi biomassa, dari pemilihan bahan baku hingga valorisasi produk, studi bertujuan untuk mengatasi tantangan kritis dalam produksi energi, perlindungan lingkungan, dan konservasi sumber daya, membuka jalan menuju bioekonomi yang lebih berkelanjutan dan sirkular. Konversi termokimia biomassa pertanian menawarkan kemungkinan untuk diversifikasi produk. Namun, pertimbangan yang cermat terhadap parameter proses dan strategi integrasi sangat penting untuk memaksimalkan hasil dan kualitas produk. Lanskap spasial menunjukkan minat global dalam konversi termokimia; namun, China dan India memimpin dalam jumlah publikasi, menandakan komitmen mereka untuk mengatasi tantangan limbah pertanian.

DAFTAR PUSTAKA

- Afailal, Z., Gil-Lalaguna, N., Fonts, I., Gonzalo, A., Arauzo, J., & Luis Sánchez, J. (2023). Thermochemical valorization of argan nutshells: Torrefaction and air-steam gasification. *Fuel*, 332(September 2022), 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.125970>
- Andalia, W., Pratiwi, I., Afrah, B. D., Akbar, I., & Ammarullah, M. I. (2025). Optimized pyrolysis of household plastic waste in Indonesia for oil production: Hydrocarbon profiling, fuel alternative, and potential biomedical application. *Results in Chemistry*, 15(April), 102247. <https://doi.org/10.1016/j.rechem.2025.102247>
- Begum, Y. A., Kumari, S., Jain, S. K., & Garg, M. C. (2024). A review on waste biomass-to-energy: integrated thermochemical and biochemical conversion for resource recovery. *Environmental Science: Advances*, 3(9), 1197–1216. <https://doi.org/10.1039/d4va00109e>
- Chinenye Divine, D., Hubert, S., Epelle, E. I., Ojo, A. U., Adeleke, A. A., Ogbaga, C. C., ... Okolie, J. A. (2024). Enhancing biomass Pyrolysis: Predictive insights from process simulation integrated with interpretable Machine learning models. *Fuel*, 366(March), 1–18. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2024.131346>
- Corona-Ruiz, S. L., Díaz-Jiménez, L., & Carlos-Hernández, S. (2024). Catalytic gasification as a management strategy for wastes from pecan harvest. *Industrial Crops and Products*, 222(January), 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2024.119563>
- Danso-Boateng, E., & Achaw, O. W.

- (2022). Bioenergy and biofuel production from biomass using thermochemical conversions technologies—a review. In *AIMS Energy* (Vol. 10). <https://doi.org/10.3934/energy.2022030>
- Durak, H. (2023). Comprehensive Assessment of Thermochemical Processes for Sustainable Waste Management and Resource Recovery. *Processes*, 11(2092), 1–39.
- Hidayati, N., & Ekayuliana, A. (2022). Studi Potensial Energi Biomassa dari Limbah Pertanian dan Perkebunan di Indonesia. *Seminar Nasional Inovasi Vokasi*, 1(1), 130–135. Retrieved from <http://prosiding-old.pnj.ac.id/index.php/sniv/article/view/4541>
- Jabłońska, B., Poznańska, G., Jabłoński, P., & Dziadas, M. (2025). Thermochemical conversion of mixed plastics from car dismantling by pyrolysis and distillation and potential applications of the products. *Waste Management*, 206(July), 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2025.115089>
- Kim, J. H., Park, G., Lee, T., Lee, J., & Kwon, E. E. (2026). Strategic way for peach seed valorisation by integrating thermochemical approaches: Transesterification and pyrolysis. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 193(P1), 107377. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2025.107377>
- Kundu, K., Chatterjee, A., Bhattacharyya, T., Roy, M., & Kaur, A. (2018). Thermochemical Conversion of Biomass to Bioenergy: A Review. In *Energy, Environment, and Sustainability*. https://doi.org/10.1007/978-981-10-7518-6_11
- Lopes, F. W. B., Andrade, M. R. D. A., Neto, E. L. D. B., Lavoie, J., & Vasconcelos, B. R. De. (2024). H₂ - rich syngas production from gasification of cannabis waste in a downdraft gasifier. *Biomass and Bioenergy*, 190(August), 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2024.107417>
- Maggiotto, G., Colangelo, G., Milanese, M., & Risi, A. De. (2023). Thermochemical Technologies for the Optimization of Olive Wood Biomass Energy Exploitation: A Review. *Energies*, 16(6772), 1–17.
- Migliaccio, R., Cerciello, F., Oliano, M. M., Russo, C., Apicella, B., & Senneca, O. (2024). Effect of oxidative atmospheres on thermochemical degradation of tobacco: Discriminating between oxidative pyrolysis and combustion. *Fuel*, 374(November 2023), 132313. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2024.132313>
- Nawawi, D. S., Carolina, A., Saskia, T., Darmawan, D., Gusvina, S. L., Wistara, N. J., ... Syafii, W. (2018). Karakteristik kimia biomassa untuk energi. *Ilmu Teknologi Kayu Tropis*, 16(1), 45–51.
- Novita, S. A., Santosa, Nofialdi, Andasuryani, & Fudholi, A. (2021). Artikel Review: Parameter Operasional Pirolisis Biomassa Review Article: Operational Parameters of Biomass Pyrolysis. *Agroteknika*, 4(1), 53–67.
- Qiu, B., Tao, X., Wang, Y., Zhang, D., & Chu, H. (2025). Hydrothermal liquefaction for preparation of liquid fuels and chemicals: Solvent effects, catalysts regulation and thermochemical conversion processes. *Green Energy and Environment*, 10(8), 1727–1750. <https://doi.org/10.1016/j.gee.2024.11009>
- Ridhuan, K., Irawan, D., & Inthifawzi, R. (2019). Pyrolysis Combustion Process with Biomass Type and

- Characteristics of The Liquid Smoke Produced. *Turbo*, 8(1), 69–78.
- Sarker, T. R., Khatun, M. L., Ethen, D. Z., Ali, M. R., Islam, M. S., Chowdhury, S., ... Akm, R. S. (2024). Recent evolution in thermochemical transformation of municipal solid wastes to alternate fuels. *Heliyon*, 10(17), e37105. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e37105>
- Suhendra, S., & Adam, C. (2021). Recovery Fosfor Melalui Proses Termokimia Untuk Bahan Baku Pupuk. *Jurnal Chemurgy*, 5(1), 45. <https://doi.org/10.30872/cmg.v5i1.5929>
- Udourioh, G. A., Solomon, M. M., & Okolie, J. A. (2025). A Review of the Valorization of Dairy Industry Wastes through Thermochemical , Biological , and Integrated Processes for Value-Added Products. *Food Science of Animal Resources*, 45(2), 375–408.
- Wang, Y., & Wu, J. J. (2023). Thermochemical conversion of biomass: Potential future prospects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 187(January), 113754. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113754>
- Yu, H., Lin, F., Guo, X., Luan, C., Li, J., Li, R., ... Chen, G. (2024). Comparison of environmental impacts from pyrolysis, gasification, and combustion of oily sludge. *Journal of Hazardous Materials*, 480(June), 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2024.136014>
- Zhang, Y., Takyi, S. A., & Chen, Q. (2024). Coal conversion to SNG: Thermochemical insights through kinetic-free modeling in entrained flow gasifier. *Case Studies in Thermal Engineering*, 56(March), 104266. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2024.104266>
- Zhao, C., Ma, Z., Huang, C., Wen, J., & Hassan, M. (2022). Editorial : From biomass to bio-energy and biochemicals : conversion , biochemical conversion and its bio-based applications. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 1(October), 1–4. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2022.975171>
- Zou, X., Zhai, M., Liu, G., Wang, T., Guo, L., Zhang, Y., & Liaquat, R. (2024). In-depth understanding of the microscopic mechanism of biochar carbonaceous structures during thermochemical conversion: Pyrolysis, combustion and gasification. *Fuel*, 361(November 2023), 130732. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.130732>