



Nexus: Jurnal Sains dan Teknologi

Homepage jurnal: https://ojs.polmed.ac.id/index.php/nexus_sains_dan_teknologi



Produksi Biochar dari Berbagai Sumber Biomassa: Metode, Karakteristik, dan Potensi Pemanfaatan

Adelia Yesya Putri Hasibuan^a, Ayu Syufiatun Br Tarigan^{a*}, Erna Juwita^b, Nina Hartati^c, Imas Masriah^a, Pina Budiarti Pratiwi^a

^aProgram Studi Teknologi Rekayasa Kimia Industri, Jurusan Teknik Mesin, Politeknik Negeri Medan, 20155, Medan, Indonesia

^bProgram Studi Teknik Mesin, Jurusan Teknik Mesin, Politeknik Negeri Medan, 20155, Medan, Indonesia

^cProgram Studi Teknik Kimia, Jurusan Teknik Kimia, Politeknik Negeri Sriwijaya, 30319, Palembang, Indonesia

*Korespondensi penulis: ayusyufiatuntrg@polmed.ac.id (AST)

Sorotan

- Perbandingan karakteristik biochar dari berbagai sumber biomassa.
- Pengaruh metode konversi termokimia terhadap kualitas biochar.
- Potensi aplikasi biochar dalam pertanian, remediasi lingkungan, dan penyimpanan karbon.

INFO ARTIKEL

Riwayat artikel:

Diajukan pada Mei 2026

Direvisi pada Juni 2026

Disetujui pada Juli 2026

Tersedia daring pada Juli 2026

Kata kunci:

biochar, biomassa, pirolisis, karakteristik, systematic review

Keywords:

biochar, biomass, pyrolysis, characteristics, systematic review

ABSTRAK

Pemanfaatan limbah biomassa sebagai bahan baku biochar merupakan salah satu alternatif yang efektif dalam mengurangi pencemaran lingkungan sekaligus meningkatkan nilai tambah limbah. Penelitian ini bertujuan untuk melakukan *systematic review* terhadap produksi biochar dari berbagai sumber biomassa dengan fokus pada jenis bahan baku, metode produksi, kondisi proses, serta karakteristik biochar yang dihasilkan. Metode yang digunakan meliputi pencarian literatur dari berbagai basis data ilmiah dengan kriteria inklusi dan eksklusi yang telah ditentukan. Hasil kajian menunjukkan bahwa jenis biomassa dan metode produksi sangat mempengaruhi kualitas biochar. Biomassa lignoselulosa cenderung menghasilkan biochar dengan kandungan karbon dan stabilitas tinggi, sedangkan limbah organik menghasilkan biochar yang kaya unsur hara. Proses pirolisis, khususnya pada suhu 400–600°C, merupakan metode yang paling umum digunakan dan mampu menghasilkan biochar dengan sifat fisikokimia yang baik. Selain itu, peningkatan suhu pirolisis diketahui dapat meningkatkan kandungan karbon, stabilitas termal, serta luas permukaan biochar, meskipun dapat menurunkan *yield*. Biochar yang dihasilkan memiliki potensi aplikasi sebagai pembenah tanah, adsorben, serta media penyimpanan karbon yang berkontribusi terhadap mitigasi perubahan iklim. Dengan demikian, pemilihan bahan baku dan kondisi proses yang tepat menjadi faktor penting dalam optimasi produksi biochar yang berkelanjutan.

ABSTRACT

The utilization of biomass waste as a raw material for biochar production is an effective approach to reduce environmental pollution while enhancing the value of waste materials. This study aims to conduct a *systematic review* of biochar production from various biomass sources, focusing on feedstock types, production methods,

process conditions, and resulting biochar characteristics. The methodology involved literature searches from multiple scientific databases using predefined inclusion and exclusion criteria. The results indicate that both biomass type and production method significantly influence biochar quality. Lignocellulosic biomass tends to produce biochar with higher carbon content and stability, while organic waste-derived biochar is richer in nutrients. Pyrolysis, particularly at temperatures of 400–600°C, is the most commonly used method and produces biochar with favorable physicochemical properties. Furthermore, increasing pyrolysis temperature enhances carbon content, thermal stability, and surface area, although it may reduce yield. The resulting biochar shows strong potential for applications in soil amendment, adsorption, and carbon sequestration, contributing to climate change mitigation. Therefore, the selection of appropriate feedstock and process conditions is crucial for optimizing sustainable biochar production.

1. Pendahuluan

Peningkatan jumlah limbah biomassa dari sektor pertanian, perkebunan, dan industri menjadi salah satu permasalahan lingkungan yang perlu mendapatkan perhatian serius. Limbah biomassa seperti sekam padi, jerami, tempurung kelapa, dan limbah organik lainnya umumnya belum dimanfaatkan secara optimal, sehingga berpotensi menimbulkan pencemaran lingkungan apabila tidak dikelola dengan baik. Pengelolaan limbah biomassa yang tidak tepat juga berkontribusi terhadap peningkatan emisi gas rumah kaca dan degradasi lingkungan [1].

Salah satu alternatif pemanfaatan limbah biomassa adalah melalui proses konversi termokimia menjadi biochar. Biochar merupakan material kaya karbon yang dihasilkan dari pemanasan biomassa dalam kondisi terbatas oksigen, seperti pada proses pirolisis, torrefaksi, maupun hydrothermal carbonization. Dalam beberapa tahun terakhir, biochar semakin mendapat perhatian karena sifatnya yang stabil serta potensinya dalam berbagai aplikasi lingkungan dan energi [2, 3].

Biochar memiliki berbagai keunggulan, antara lain mampu meningkatkan kesuburan tanah, memperbaiki sifat fisik dan kimia tanah, serta berperan dalam penyerapan karbon (*carbon sequestration*) yang berkontribusi terhadap mitigasi perubahan iklim. Studi terbaru menunjukkan bahwa biochar dapat meningkatkan stabilitas karbon tanah [4] dan membantu mengurangi emisi CO₂ secara signifikan [5].

Karakteristik biochar yang dihasilkan sangat dipengaruhi oleh jenis biomassa dan kondisi proses yang digunakan, seperti suhu, waktu tinggal, serta metode konversi [6-8]. Biomassa lignoselulosa, limbah pertanian, maupun limbah organik lainnya akan menghasilkan biochar dengan sifat fisikokimia yang berbeda [9]. Selain itu, metode produksi seperti pirolisis lambat, pirolisis cepat, dan hydrothermal carbonization memberikan pengaruh signifikan terhadap yield dan kualitas biochar yang dihasilkan.

Berbagai penelitian terkait produksi biochar dari beragam sumber biomassa telah berkembang pesat dalam beberapa tahun terakhir, dengan tren peningkatan publikasi yang

signifikan dan fokus yang semakin luas pada aspek produksi, karakterisasi, dan aplikasinya [10, 11]. Namun, sebagian besar penelitian maupun artikel tinjauan sebelumnya hanya berfokus pada satu aspek tertentu, seperti jenis biomassa, metode pirolisis, atau aplikasi biochar secara terpisah. Selain itu, belum banyak kajian yang membandingkan secara komprehensif pengaruh berbagai sumber biomassa terhadap karakteristik biochar dengan mempertimbangkan perbedaan metode produksi dan kondisi proses. Akibatnya, informasi mengenai hubungan antara jenis biomassa, metode konversi, karakteristik biochar, dan potensi pemanfaatannya masih tersebar di berbagai publikasi sehingga sulit digunakan sebagai acuan dalam pemilihan teknologi yang paling sesuai.

Berdasarkan latar belakang tersebut, kajian ini dilakukan untuk menyajikan tinjauan yang lebih komprehensif mengenai produksi biochar dari berbagai sumber biomassa dengan membandingkan metode produksi, kondisi proses, karakteristik biochar yang dihasilkan, serta potensi pemanfaatannya. Kajian ini diharapkan dapat memberikan gambaran yang lebih terintegrasi sebagai dasar pengembangan teknologi biochar yang efisien, berkelanjutan, dan sesuai dengan karakteristik biomassa yang tersedia.

2. Metode

Penelitian ini menggunakan metode *systematic review* untuk mengkaji berbagai penelitian mengenai produksi biochar dari berbagai sumber biomassa. Literatur diperoleh dari basis data Google Scholar, ScienceDirect, dan SpringerLink menggunakan kata kunci "*biochar*", "*biomass*", "*pyrolysis*", "*hydrothermal carbonization*", dan "*biochar production*". Pencarian dibatasi pada publikasi tahun 2016–2026 untuk memastikan kebaruan data. Proses seleksi dilakukan melalui identifikasi dan diperoleh sebanyak 50 artikel. Selanjutnya dilakukan proses penyaringan berdasarkan judul, abstrak, dan isi artikel. Artikel yang tidak tersedia dalam bentuk full text, berada di luar rentang tahun publikasi, merupakan duplikasi, atau tidak membahas produksi biochar beserta metode, karakteristik, dan pemanfaatannya secara spesifik dikeluarkan dari kajian. Setelah proses seleksi, 29 artikel memenuhi kriteria inklusi dan dianalisis lebih lanjut. Data dari artikel terpilih dianalisis secara deskriptif dengan membandingkan jenis biomassa, metode produksi, kondisi proses, karakteristik biochar, serta potensi pemanfaatannya, kemudian disajikan dalam bentuk tabel ringkasan untuk mempermudah pembahasan.

3. Hasil Dan Pembahasan

3.1 Sumber Biomassa untuk Produksi Biochar

Berdasarkan hasil kajian literatur, berbagai jenis biomassa dapat dimanfaatkan sebagai bahan baku dalam produksi biochar, antara lain limbah pertanian (sekam padi, jerami, ampas tebu), limbah perkebunan (tempurung kelapa, kulit kopi), serta limbah organik seperti kotoran ternak. Setiap jenis biomassa memiliki komposisi kimia yang berbeda, terutama kandungan

selulosa, hemiselulosa, dan lignin, yang berpengaruh terhadap karakteristik biochar yang dihasilkan. Biomassa lignoselulosa seperti kayu dan tempurung kelapa cenderung menghasilkan biochar dengan kandungan karbon yang lebih tinggi dan struktur pori yang lebih berkembang. Sebaliknya, biomassa seperti kotoran ternak menghasilkan biochar dengan kandungan abu dan nutrisi yang lebih tinggi, sehingga lebih sesuai untuk aplikasi sebagai pupuk organik.

Tabel 1. Perbandingan Produksi dan Karakteristik Biochar dari Berbagai Jenis Biomassa

No	Sumber Biomassa	Metode Produksi	Kondisi Proses	Karakteristik Biochar	Potensi Pemanfaatan	Referensi
1	Sekam Padi	Pirolisis lambat	400-500°C	pH basa, porositas tinggi, C-organik tinggi	Cocok sebagai pembenah tanah dan meningkatkan pH tanah asam	[12]
2	Tempurung Kelapa	Pirolisis lambat	500-600°C	Luas permukaan tinggi, karbon tetap tinggi	Efektif sebagai adsorben logam berat	[13]
3	Serbuk Gergaji	Pirolisis cepat	450-550°C	Struktur lebih halus, yield lebih rendah	Cocok untuk aplikasi energi (biofuel)	[14]
4	Jerami Padi	Torrefaksi	200-300°C	Kandungan karbon meningkat, volatil berkurang	Meningkatkan kualitas bahan bakar padat	[15]
5	Limbah Kulit Pisang	<i>Hydrothermal Carbonization</i> (HTC)	180-250°C	Gugus fungsi aktif tinggi, kadar air tinggi	Potensial untuk adsorpsi zat organik	[16]
6	Kayu (Biomassa Lignoselulosa)	Pirolisis lambat	500°C	Stabilitas karbon tinggi, pori luas	Baik untuk sekuestrasi karbon	[17]
7	Limbah Pertanian	Gasifikasi	>700°C	Kadar abu tinggi, karbon rendah	Lebih cocok untuk produksi energi daripada biochar	[18]
8	Ampas Tebu	Pirolisis lambat	400-500°C	pH netral-basa, kandungan abu sedang	Meningkatkan kesuburan tanah	[19]
9	Kulit Kopi	Pirolisis lambat	450-550°C	Kandungan karbon tinggi, porositas baik	Potensial sebagai adsorben dan soil amendment	[20]
10	Kotoran Ternak	Pirolisis lambat	300-500°C	Nutrien (N, P, K) tinggi	Baik sebagai pupuk organik	[20]

3.2 Metode Produksi Biochar

Metode produksi biochar yang paling umum digunakan adalah pirolisis, baik pirolisis lambat maupun cepat. Pirolisis lambat pada suhu 400–600°C umumnya menghasilkan biochar dengan yield yang lebih tinggi dan struktur yang lebih stabil. Sementara itu, pirolisis cepat lebih difokuskan pada produksi bio-oil sehingga yield biochar relatif lebih rendah [21-23]. Selain pirolisis, metode lain seperti torrefaksi dan *hydrothermal carbonization* (HTC) [24] juga digunakan. Torrefaksi yang berlangsung pada suhu lebih rendah (200–300°C) menghasilkan biochar dengan kandungan volatil yang masih cukup tinggi. Di sisi lain, HTC yang dilakukan dalam kondisi basah menghasilkan biochar dengan gugus fungsi permukaan yang lebih banyak, sehingga potensial untuk aplikasi adsorpsi.

3.3 Pengaruh Kondisi Proses terhadap Karakteristik Biochar

Kondisi proses seperti suhu, waktu tinggal, dan laju pemanasan memiliki pengaruh signifikan terhadap sifat biochar. Peningkatan suhu pirolisis umumnya meningkatkan kandungan karbon tetap dan luas permukaan biochar, namun dapat menurunkan *yield*. Suhu

tinggi ($\geq 500^{\circ}\text{C}$) cenderung menghasilkan biochar dengan struktur yang lebih aromatik dan stabil, sedangkan suhu rendah menghasilkan biochar dengan kandungan gugus fungsi yang lebih tinggi. Selain itu, ukuran partikel biomassa dan kadar air juga mempengaruhi efisiensi proses serta kualitas produk akhir [25, 26].

3.4 Karakteristik Biochar yang Dihasilkan

Karakteristik biochar yang dihasilkan meliputi sifat fisik dan kimia seperti luas permukaan, porositas, pH, kandungan karbon, serta gugus fungsi permukaan. Biochar dari tempurung kelapa dan kayu umumnya memiliki luas permukaan yang tinggi, sehingga cocok digunakan sebagai adsorben. Sebaliknya, biochar dari limbah organik seperti kotoran ternak memiliki kandungan unsur hara seperti nitrogen (N), fosfor (P), dan kalium (K) yang tinggi, sehingga lebih sesuai untuk aplikasi di bidang pertanian. Nilai pH biochar umumnya bersifat netral hingga basa, yang dapat membantu memperbaiki tanah asam [27].

3.5 Potensi Pemanfaatan Biochar

Berdasarkan karakteristiknya, biochar memiliki berbagai potensi pemanfaatan, antara lain sebagai pembenah tanah, media adsorben untuk pengolahan air limbah, serta sebagai material untuk penyimpanan karbon. Biochar dengan luas permukaan tinggi efektif dalam menyerap logam berat dan senyawa organik [10, 28, 29], sedangkan biochar yang kaya nutrisi lebih banyak digunakan dalam sektor pertanian. Selain itu, penggunaan biochar juga berkontribusi terhadap pengurangan emisi karbon melalui mekanisme *carbon sequestration*, sehingga berpotensi sebagai solusi dalam mitigasi perubahan iklim [5].

Secara umum, hasil kajian menunjukkan bahwa pemilihan jenis biomassa dan metode produksi merupakan faktor kunci dalam menentukan kualitas dan potensi aplikasi biochar, sehingga perlu disesuaikan dengan tujuan penggunaan yang diinginkan.

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil *systematic review* yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa jenis biomassa dan metode produksi merupakan dua faktor utama yang menentukan karakteristik biochar. Biomassa lignoselulosa, seperti sekam padi, tempurung kelapa, dan kayu, umumnya menghasilkan biochar dengan kandungan karbon, porositas, dan stabilitas yang lebih tinggi, sedangkan biomassa organik menghasilkan biochar dengan kandungan unsur hara yang lebih baik. Selain itu, pirolisis pada suhu $400\text{--}600^{\circ}\text{C}$ merupakan metode yang paling banyak digunakan karena mampu menghasilkan biochar dengan kualitas fisikokimia yang optimal. Biochar yang dihasilkan berpotensi diaplikasikan sebagai pembenah tanah, adsorben pengolahan limbah, serta media penyimpanan karbon untuk mendukung mitigasi perubahan iklim. Temuan ini menunjukkan bahwa pemilihan bahan baku biomassa dan optimasi kondisi

proses merupakan kunci dalam menghasilkan biochar sesuai dengan tujuan aplikasinya, sekaligus menjadi dasar bagi pengembangan teknologi biochar yang lebih efisien dan berkelanjutan.

Kontribusi Penulis

Naskah ini ditulis melalui kontribusi semua penulis. **A.Y.P. Hasibuan**: penulisan draft asli. **A.S. Tarigan**: pengolah dan penganalisis data. **E. Juwita**: konseptualisasi. **N. Hartati**: metodologi dan visualisasi data. **I. Masriah**: penulisan tinjauan dan penyuntingan. **P. B. Pratiwi**: penyunting draft akhir.

Konflik Kepentingan

Penulis menyatakan bahwa tidak memiliki konflik kepentingan finansial atau hubungan pribadi yang dapat memengaruhi penelitian dalam manuskrip ini.

Daftar Pustaka

- [1] M. P. C. Volpi, J. C. G. Silva, A. Hornung, and M. Ouadi, "Review of the Current State of Pyrolysis and Biochar Utilization in Europe: A Scientific Perspective," Mar. 01, 2024, *Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI)*. doi: 10.3390/cleantechnol6010010.
- [2] F. Mahmood, M. Ali, M. Khan, C. F. M. Magoua, M. Mbeugang, Y. M. Isa, A. N. Kozlov, M. Penzik, X. Xie, H. Yang, S. Zhang, and B. Li, "A review of biochar production and its employment in synthesizing carbon-based materials for supercapacitors," *Industrial Crops and Products*, vol. 227, Art. no. 120830, May 2025, doi: 10.1016/j.indcrop.2025.120830.
- [3] H. Teran-Pradilla, A. V. Bagde, M. del P. Noriega E, and M. C. Paul, "Influence of operating conditions on pyrolysis of oil palm mesocarp fibre biomass for sustainable biochar production and energy recovery," *Biomass Bioenergy*, vol. 213, Oct. 2026, doi: 10.1016/j.biombioe.2026.109425.
- [4] H. Zhou, J. Guo, J. Wang, and H. Liu, "Effects of biochar produced at different pyrolysis temperatures on nitrogen transformation, microbial functional genes, and enzyme activities in saline soils," *Front. Microbiol.*, vol. 17, Mar. 2026, doi: 10.3389/fmicb.2026.1801699.
- [5] R. de J. Paula, V. de A. Pereira, F. L. Latorre, C. O. de S. Nogueira, I. A. de Almeida, P. Silva, O. Ferreira, R. P. de Lima, A. C. da S. Bezerra, and A. R. T. Machado, "Pyrolysis converts urban pruning waste into biochar with soil and climate benefits," *Scientific Reports*, vol. 15, no. 1, Dec. 2025, doi: 10.1038/s41598-025-32360-9.
- [6] H. Lin, Y. Huang, Q. Jin, T. Ma, and Y. Dong, "Effects of biomass components and pyrolysis temperature on the adsorption properties of biochar for heavy metals : A review," Nov. 01, 2025, *Elsevier B.V.* doi: 10.1016/j.jaap.2025.107321.
- [7] W. Jerzak, E. Acha, and B. Li, "Comprehensive Review of Biomass Pyrolysis: Conventional and Advanced Technologies, Reactor Designs, Product Compositions and Yields, and Techno-Economic Analysis," Oct. 01, 2024, *Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI)*. doi: 10.3390/en17205082.

- [8] G. Ren, W. Shi, W. Li, J. Wang, C. Wang, and G. Zhao, "Pyrolysis temperature shapes biochar-mediated soil microbial communities and carbon-nitrogen metabolism," *Front. Microbiol.*, vol. 16, 2025, doi: 10.3389/fmicb.2025.1657149.
- [9] P. Danesh, M. Prussi, A. Salimbeni, V. Negro, and D. Chiaramonti, "Review on Biochar Upgrading Methods for Its Application in Thermochemical Conversion Processes and Critical Materials Recovery," Nov. 01, 2025, *Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI)*. doi: 10.3390/su172210194.
- [10] S. Liu, M. Wu, F. Chen, P. Oleszczuk, C. E. W. Steinberg, B. Pan, and S. Tao, "Biochar application decreases heavy metal accumulation in ants (*Formica japonica*)," *Journal of Hazardous Materials*, vol. 507, Art. no. 141767, Mar. 2026, doi: 10.1016/j.jhazmat.2026.141767.
- [11] H. McIntyre and S. Li, "From Waste to Resource: Evaluating the Impact of Biosolid-Derived Biochar on Agriculture and the Environment," Sep. 01, 2024, *Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI)*. doi: 10.3390/biomass4030045.
- [12] A. Bin Faruque, S. Paul, and M. S. Islam, "Stabilization of Expansive Soil using Rice Husk Biochar and Stimulation of Soil-Native Bacteria: Mechanical and Microstructural Analysis," *KSCE Journal of Civil Engineering*, p. 100620, Apr. 2026, doi: 10.1016/j.kscej.2026.100620.
- [13] A. B. Duwieuah, R. K. N. Otoo, and A. Z. Imoro, "Comparison of the adsorption performance of coconut husk and palm kernel shells biochars for the removal of toxic metals from mining wastewater," *Waste Management Bulletin*, vol. 3, no. 4, Dec. 2025, doi: 10.1016/j.wmb.2025.100249.
- [14] L. Zhang and B. Wang, "Catalytic effect of modified-biochar on secondary conversion of volatiles from pine sawdust fast pyrolysis," *Biomass Bioenergy*, vol. 212, Sep. 2026, doi: 10.1016/j.biombioe.2026.109317.
- [15] D. S. Upadhyay, A. Chaudhary, T. Parthkumar, and P. Kaushal, "Thermochemical treatment of rice straw via torrefaction: A physicochemical characteristics of biomass and biocoal pellets with different natural binders," *Biomass Bioenergy*, vol. 208, May 2026, doi: 10.1016/j.biombioe.2025.108898.
- [16] S. A. Maung, A. R. Ayub, W. Xu, J. Wang, and Z. Yue, "Experimental and DFT-based optimization of nitrilotriacetic acid-modified banana peel biochar for efficient multi-metal removal and reusability," *J. Environ. Chem. Eng.*, vol. 14, no. 1, Feb. 2026, doi: 10.1016/j.jece.2025.120814.
- [17] H. Baniasadi, R. Abidnejad, Z. Fathi, K. Meinander, A. Koistinen, E. Kontturi, and E. Lizundia, "Dynamic biogenic carbon accounting and functional properties of wood biochar from five species," *Chemical Engineering Journal*, vol. 532, Art. no. 174573, Mar. 15, 2026, doi: 10.1016/j.cej.2025.174573.
- [18] H. Hinsene, N. Sukpirom, N. Bhawawet, and A. Imyim, "Deep eutectic solvent-modified magnetic biochar from sugarcane bagasse for enhanced removal of toxic metals and pharmaceuticals," *Sep. Purif. Technol.*, vol. 394, Jul. 2026, doi: 10.1016/j.seppur.2026.137339.
- [19] J. Eraliev, A. Ghosh, T. Paul, J. J. Yee, and S. H. Park, "Valorization of waste mussel shells and spent coffee grounds into calcium-rich biochar for sustainable phosphate recovery for soil amendment," *Environ. Technol. Innov.*, vol. 40, Nov. 2025, doi: 10.1016/j.eti.2025.104634.
- [20] J. Ma, W. Yang, S. Li, Z. Yang, C. Qiao, D. Liu, and M. Wang, "Comprehensive effects of tea branch biochar on antibiotic resistance profiles and C/N/S cycling in the compost microbiota of animal manure," *Science of the Total Environment*, vol. 957, Art. no. 177457, Nov. 2024, doi: 10.1016/j.scitotenv.2024.177457.

- [21] X. Gao, M. Tan, S. Jiang, Z. Huang, C.-Z. Li, T. Lei, Z. Wang, Y. Zhu, and L. Hui, "Pyrolysis of torrefied rice straw from gas-pressurized and oxidative torrefaction: Pyrolysis kinetic analysis and the properties of biochars," *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, vol. 157, Art. no. 105238, Jun. 2021, doi: 10.1016/j.jaap.2021.105238.
- [22] Y. Li, R. Gupta, Q. Zhang, and S. You, "Review of biochar production via crop residue pyrolysis: Development and perspectives," Feb. 01, 2023, *Elsevier Ltd.* doi: 10.1016/j.biortech.2022.128423.
- [23] Z. Wang, S. Guo, Z. Li, Z. Chen, Q. Wang, G. Chen, T. Lei, and X. Yan, "Co-pyrolysis of biomass and plastics with biochar as catalyst for production of aliphatic hydrocarbons," *Energy*, vol. 351, Art. no. 140873, May 15, 2026, doi: 10.1016/j.energy.2026.140873.
- [24] M. Velez, H. A. Murillo, A. Debut, P. Ducos, D. Niebieskikwiat, F. J. Torres, and S. Ponce, "Green synthesis of Co-Ag biochar catalysts from rice husk using hydrothermal carbonization concentrate for efficient NaBH_4 hydrolysis," *Journal of Environmental Chemical Engineering*, vol. 13, no. 6, Art. no. 120410, Nov. 2025, doi: 10.1016/j.jece.2025.120410.
- [25] T. Lee, G. Park, H. Cha, H. Nam, H. W. Kim, and E. E. Kwon, "Biochar utilization in thermochemical biodiesel production from perilla seed," *Chemical Engineering Journal*, vol. 525, Dec. 2025, doi: 10.1016/j.cej.2025.170661.
- [26] J. Wang, Z. Xiong, and Y. Kuzyakov, "Biochar stability in soil: Meta-analysis of decomposition and priming effects," May 01, 2016, *Blackwell Publishing Ltd.* doi: 10.1111/gcbb.12266.
- [27] A. H. Lahori, Z. Guo, Z. Zhang, R. Li, A. Mahar, M. K. Awasthi, F. Shen, T. A. Sial, F. Kumbhar, P. Wang, and S. Jiang, "Use of biochar as an amendment for remediation of heavy metal-contaminated soils: Prospects and challenges," *Pedosphere*, vol. 27, no. 6, pp. 991–1014, Dec. 2017, doi: 10.1016/S1002-0160(17)60490-9.
- [28] Y. Deng, T. Zhang, and Q. Wang, "Biochar Adsorption Treatment for Typical Pollutants Removal in Livestock Wastewater: A Review," in *Engineering Applications of Biochar*, InTech, 2017. doi: 10.5772/intechopen.68253.
- [29] C. Li, J. Zhang, M. Xu, J. Dong, S. Wang, P. Li, and H. Cai, "Effects of biochar application frequency on soil nutrients and crop quality: Evidence from eight-year field experiments in two contrasting soils," *Environmental Technology & Innovation*, vol. 42, Art. no. 104932, Jun. 2026, doi: 10.1016/j.eti.2026.104932.