

APLIKASI BIOCHAR DARI BERBAGAI BIOMASSA DALAM MENJAGA KEBERLANJUTAN LINGKUNGAN

Ulfa Triyani A.Latif

Program Studi Biologi, Fakultas Sains dan Ilmu Pengetahuan Alam
Universitas Islam Negeri Alauddin Makassar Indonesia

*Corresponding author: ulfa..triyani@uin-alauddin.ac.id

Abstract. Biochar has emerged as a promising sustainable material with significant potential in environmental preservation and soil improvement. This review examines the application of biochar derived from various biomass sources in maintaining environmental sustainability. The paper synthesizes recent findings on biochar production from agricultural waste materials such as teak leaves, corn residues, rice straw, sawdust, and sugarcane biomass. The physicochemical properties of biochar are influenced by both feedstock composition and pyrolysis temperature, with variations in density (0.49–0.56 g/cm³), moisture content (1.11–4.18%), ash content (20.38–34.24%), and volatile matter (66.82–79.88%). This review highlights the multifaceted applications of biochar including soil amendment, carbon sequestration, heavy metal remediation, and renewable energy production. The utilization of agricultural waste biomass for biochar production addresses two critical environmental challenges simultaneously: waste management and greenhouse gas mitigation. Integration of biochar as a soil amendment demonstrates improved water retention capacity, enhanced nutrient availability, and increased microbial activity in soils. Furthermore, the addition of binders such as clay enhances the mechanical durability of carbonized biopellets, expanding their applicability as sustainable biofuel. The evidence presented in this review demonstrates that biochar application represents a viable and environmentally sound strategy for sustainable development, circular economy promotion, and climate change mitigation.

Keywords: biochar; biomassa; sustainability; soil amendment; carbon sequestration; environmental preservation

Abstrak. Biochar telah muncul sebagai material berkelanjutan yang menjanjikan dengan potensi signifikan dalam pelestarian lingkungan dan perbaikan tanah. Artikel review ini mengkaji aplikasi biochar yang berasal dari berbagai sumber biomassa dalam menjaga keberlanjutan lingkungan. Makalah ini mensintesis temuan terbaru tentang produksi biochar dari limbah pertanian seperti daun jati, limbah jagung, jerami padi, serbuk gergaji, dan biomassa tebu. Sifat fisikokimia biochar dipengaruhi oleh komposisi bahan baku dan suhu pirolisis, dengan variasi kerapatan (0,49–0,56 g/cm³), kadar air (1,11–4,18%), kadar abu (20,38–34,24%), dan zat terbang (66,82–79,88%). Review ini menyoroti aplikasi multifaset biochar termasuk amandemen tanah, sequestrasi karbon, remediasi logam berat, dan produksi energi terbarukan. Pemanfaatan limbah biomassa pertanian untuk produksi biochar mengatasi dua tantangan lingkungan kritis secara bersamaan: manajemen limbah dan mitigasi gas rumah kaca. Integrasi biochar sebagai amandemen tanah menunjukkan peningkatan kapasitas retensi air, ketersediaan nutrisi yang lebih baik, dan peningkatan aktivitas mikroba dalam tanah. Lebih lanjut, penambahan perekat seperti tanah liat meningkatkan daya tahan mekanik biopellet berkarbon, memperluas penerapannya sebagai biofuel berkelanjutan. Bukti yang disajikan dalam review ini menunjukkan bahwa aplikasi biochar mewakili strategi yang layak dan berkelanjutan untuk pembangunan berkelanjutan, promosi ekonomi sirkular, dan mitigasi perubahan iklim.

Kata Kunci: biochar; biomassa; keberlanjutan; amandemen tanah; sequestrasi karbon; pelestarian lingkungan

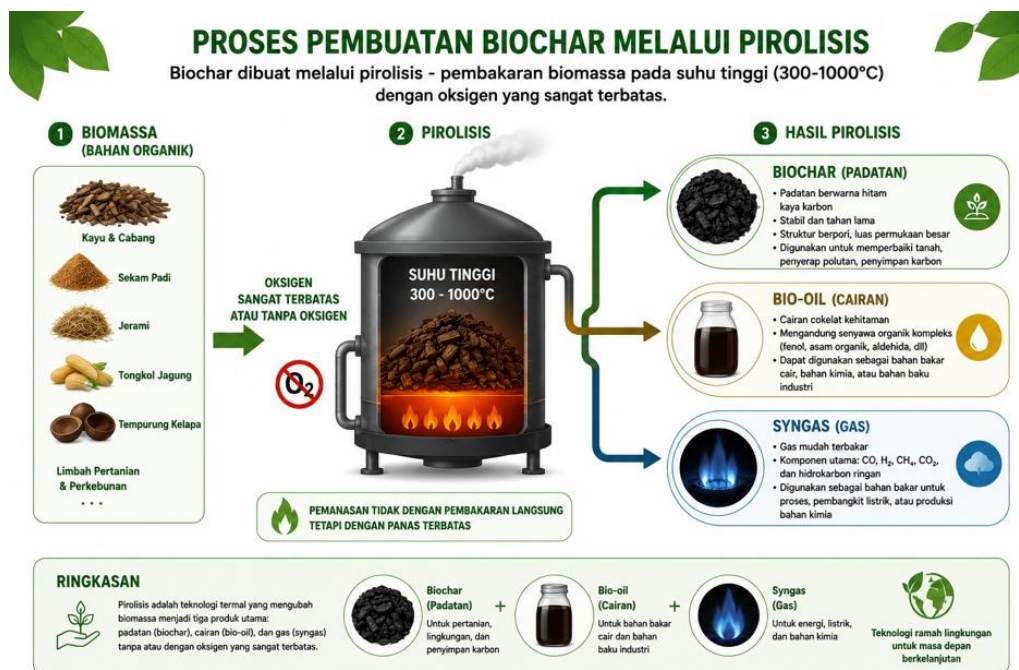
PENDAHULUAN

Krisis lingkungan global yang disebabkan oleh emisi gas rumah kaca dan akumulasi limbah organik menjadi tantangan utama di era modern (Syska & Ropiudin, 2023a). Perubahan iklim, degradasi tanah, dan pencemaran lingkungan telah memicu pencarian solusi inovatif yang berkelanjutan. Salah satu pendekatan paling menjanjikan adalah pemanfaatan biochar sebagai material multifungsi yang dapat mengatasi beberapa masalah lingkungan secara simultan.

Biochar adalah material kaya karbon yang diproduksi melalui pirolisis anaerobik dari biomassa (Khater et al., 2024). Proses termal ini mengonversi limbah organik menjadi arang stabil yang memiliki aplikasi luas dalam pertanian, industri, dan remediasi lingkungan. Berbeda dengan pembakaran konvensional, pirolisis mempertahankan energi dalam bentuk biopellet yang bernilai tinggi sambil mengurangi konten volatil berbahaya (He et al., 2024).

Potensi biochar dalam menjaga keberlanjutan lingkungan mencakup beberapa dimensi penting. Pertama, pemanfaatan limbah biomassa pertanian mengurangi volume limbah yang berakhir di tempat pembuangan akhir. Kedua, biochar berfungsi sebagai penyerap karbon yang stabil, berkontribusi pada mitigasi perubahan iklim. Ketiga, ketika diterapkan ke tanah, biochar meningkatkan retensi air, ketersediaan nutrisi, dan aktivitas biologi tanah. Keempat, biochar dapat digunakan sebagai adsorben untuk membersihkan logam berat dari air dan tanah terkontaminasi (Butler et al., 2023).

Penelitian terbaru menunjukkan bahwa sifat dan kualitas biochar sangat bergantung pada jenis biomassa dan kondisi pirolisis yang digunakan. Khater et al. (2024) melaporkan bahwa biochar yang diproduksi dari berbagai limbah pertanian (jerami padi, serbuk gergaji, limbah tebu, dan daun pohon) memiliki karakteristik fisikokimia yang berbeda-beda. Demikian pula, Ropiudin et al. (2024) menunjukkan bahwa penambahan perekat alami seperti tanah liat dapat meningkatkan stabilitas mekanik biopellet berkarbon, memperluas aplikasinya sebagai biofuel berkualitas tinggi.



Gambar 1. Metode Pirolisis

METODE PENELITIAN

Review artikel ini didasarkan pada analisis komprehensif terhadap publikasi ilmiah terbaru mengenai produksi biochar, karakterisasi fisikokimia, dan aplikasinya dalam keberlanjutan lingkungan. Literatur yang digunakan mencakup artikel penelitian original, laporan teknis, dan review sebelumnya yang dipublikasikan dalam jurnal bereputasi internasional. Fokus utama penelusuran adalah pada temuan mengenai: (1) produksi biochar dari berbagai sumber biomassa, (2) pengaruh kondisi pirolisis terhadap kualitas biochar, (3) aplikasi biochar dalam amandemen tanah dan remediasi lingkungan, dan (4) implementasi biochar dalam strategi keberlanjutan dan ekonomi sirkular.

HASIL DAN PEMBAHASAN

1. Produksi Biochar dari Berbagai Sumber Biomassa

Limbah biomassa pertanian merupakan sumber daya yang berlimpah dan belum dimanfaatkan secara optimal di banyak negara. Khater et al. (2024) mendemonstrasikan produksi biochar berkualitas tinggi dari empat jenis limbah pertanian utama: jerami padi, serbuk gergaji, limbah tebu, dan daun pohon. Penelitian mereka melibatkan pirolisis pada tiga tingkat temperatur berbeda (400°C, 600°C, dan 800°C) selama enam jam.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa hasil biochar menurun secara signifikan dengan peningkatan suhu pirolisis. Pada 400°C, hasil biochar berkisar antara 277,9 hingga 450,1 g/kg, dengan limbah tebu menghasilkan yield tertinggi. Sebaliknya, pada 800°C, hasil menurun drastis hingga 165,0 hingga 322,5 g/kg. Fenomena ini dijelaskan oleh peningkatan laju pembakaran bahan organik dan volatilisasi komponen yang mudah menguap pada temperatur lebih tinggi. Temuan ini konsisten dengan penelitian Jindo et al. (2014) yang melaporkan penurunan serupa dalam produksi biochar dari berbagai limbah pertanian.

Implikasi praktis dari temuan ini adalah bahwa pemilihan temperatur pirolisis harus mempertimbangkan trade-off antara hasil biochar dan kualitas produk. Temperatur lebih rendah (400°C) menghasilkan volume biochar lebih besar namun dengan konten volatil lebih tinggi, sedangkan temperatur lebih tinggi (800°C) menghasilkan biochar dengan sifat permukaan yang ditingkatkan namun dengan volume yang lebih rendah. Untuk aplikasi amandemen tanah, temperatur menengah (600°C) mungkin merupakan kompromi optimal yang seimbang antara yield dan karakteristik produk.

2. Karakterisasi Fisikokimia Biochar dan Faktor Pengaruh

Sifat fisikokimia biochar menentukan kinerja dan aplikasinya dalam berbagai bidang. Khater et al. (2024) melaporkan hasil analisis komprehensif mencakup parameter kerapatan, kadar air, kapasitas retensi air, porositas, pH, daya hantar listrik (EC), bahan organik total, karbon organik, dan kandungan nutrisi mineral. Data yang dikumpulkan memberikan gambaran komprehensif tentang bagaimana jenis biomassa dan kondisi pirolisis mempengaruhi karakteristik akhir biochar.

Kadar air biochar berkisar antara 1,11% hingga 4,18%, dengan nilai terendah diperoleh dari jerami padi pada 800°C dan nilai tertinggi dari daun pohon pada 400°C. Kadar air yang rendah sangat penting untuk keperluan penyimpanan dan transportasi, mengurangi risiko pembusukan biologis dan

memfasilitasi aplikasi praktis. Kapasitas retensi air menunjukkan tren sebaliknya, meningkat dari 12,9 g/g pada 400°C menjadi 27,6 g/g pada 800°C untuk jerami padi, menunjukkan bahwa pirolisis pada temperatur lebih tinggi meningkatkan porositas dan kapasitas penyimpanan air biochar.

Kerapatan massa biochar berkisar antara 161,5 hingga 211,9 kg/m³, dengan serbuk gergaji pada 800°C menunjukkan nilai tertinggi. Parameter ini penting karena mempengaruhi nilai kalor spesifik dan daya tahan mekanik biochar ketika digunakan sebagai bahan bakar atau amandemen tanah. pH biochar secara konsisten meningkat dengan temperatur pirolisis, berkisar dari 6,6 hingga 10,4, dengan limbah tebu menunjukkan nilai terendah (6,6) dan daun pohon menunjukkan nilai tertinggi (10,4) pada 800°C. Peningkatan pH ini berkaitan dengan konsentrasi relatif elemen anorganik yang tidak mengalami pirolisis pada temperatur lebih tinggi (Alghashm et al., 2018).

3. Aplikasi Biochar dalam Amandemen Tanah dan Perbaikan Properti Tanah

Salah satu aplikasi paling signifikan dari biochar adalah penggunaannya sebagai amandemen tanah untuk meningkatkan kualitas dan produktivitas lahan pertanian. Ketika ditambahkan ke tanah, biochar mempengaruhi sifat fisik, kimia, dan biologi tanah secara positif. Kapasitas retensi air yang tinggi dari biochar berkontribusi pada peningkatan ketersediaan air bagi tanaman, terutama pada tanah berpasir atau lahan dengan potensi kekeringan tinggi.

Aspek penting lainnya adalah peran biochar dalam meningkatkan kesuburan tanah. Struktur pori yang luas dari biochar menciptakan habitat bagi mikroba tanah, meningkatkan aktivitas biologi dan proses dekomposisi bahan organik. Selain itu, kehadiran biochar di dalam tanah meningkatkan kapasitas tukar kation (CEC), memfasilitasi retensi dan ketersediaan nutrisi bagi tanaman. Robertson et al. (2012) menunjukkan bahwa amandemen biochar secara signifikan meningkatkan pertumbuhan bibit dan mengubah sifat-sifat tanah hutan subboreal.

Data nutrisi mineral yang dilaporkan oleh Khater et al. (2024) menunjukkan bahwa biochar juga mengandung elemen-elemen penting seperti kalium (0,6–3,5%), fosfor (47,6–134,6 mg/kg), kalsium (241,3–649,0 mg/kg), magnesium (10,9–51,7 mg/kg), dan natrium (1124–1703 mg/kg). Konten nutrisi ini bertambah dengan peningkatan temperatur pirolisis, menjadikan biochar bertemperatur tinggi sebagai sumber nutrisi sekunder potensial untuk tanaman. Namun, penting untuk dicatat bahwa ketersediaan biologi dari nutrisi-nutrisi ini mungkin berbeda tergantung pada bentuk dan keadaannya dalam matriks biochar.

4. Biochar sebagai Agen Remediasi Lingkungan

Luas permukaan spesifik dan kehadiran gugus fungsi pada permukaan biochar menjadikannya material adsorpsi yang efektif untuk menghilangkan kontaminan dari air dan tanah. Khan et al. (2013) melaporkan bahwa biochar yang diproduksi dari tongkol jagung menunjukkan kemampuan pengurangan bioakumulasi PAH (polycyclic aromatic hydrocarbons) yang signifikan pada tanaman setelah aplikasi pada tanah yang terkontaminasi.

Dalam konteks pencemaran logam berat, biochar menunjukkan potensi remediasi yang menjanjikan. Studi menunjukkan bahwa biochar yang diproduksi dari limbah tekstil kapas mampu menahan kadmium dalam jumlah signifikan dalam tanah yang terkontaminasi, mengurangi efek biologis dari logam berat melalui modifikasi struktur morfologis. Mekanisme penyerapan melibatkan kompleks interaksi fisik (adsorpsi permukaan) dan kimia (kompleksasi, substitusi ion), dengan kapasitas yang ditentukan oleh struktur pori dan komposisi mineral biochar.

Kemampuan pH tampilan biochar untuk bereaksi dengan spesies asam dan basa juga berkontribusi pada potensi remediasinya. Biochar bertemperatur tinggi dengan pH lebih besar dari 10 dapat

menetralkan asam dan mengurangi mobilitas logam berat dalam tanah, mencegah pencucian dan kontaminasi air tanah. Aplikasi praktis dari temuan ini mencakup pengembangan sistem penyaring air tercemar dan aplikasi tanah untuk lokasi yang terkena dampak limbah industri.

5. Biopelet Berkarbon: Integrasi Biochar dalam Biofuel Berkelanjutan

Penelitian oleh Ropiudin et al. (2024) memperluas aplikasi biochar dengan mengembangkan biopelet berkarbon yang menggabungkan biochar dengan perekat alami (tanah liat) untuk menciptakan biofuel padat dengan sifat mekanik superior. Biopelet ini diproduksi dari campuran daun jati, tongkol jagung, dan batang jagung dengan berbagai proporsi perekat tanah liat (10%, 20%, dan 30%).

Hasil pengujian menunjukkan bahwa karakteristik fisikokimia biopelet karbonisasi memenuhi sebagian besar persyaratan Standar Nasional Indonesia (SNI 8021:2014) untuk bahan bakar padat. Kadar air biopelet berkisar antara 5,34% hingga 6,82%, semuanya berada di bawah batas maksimum 12% yang ditetapkan standar. Kadar zat terbang berkisar antara 66,82% hingga 79,88%, dengan sebagian besar formulasi memenuhi persyaratan maksimum 80%. Nilai-nilai ini menunjukkan bahwa biopelet karbonisasi dapat berfungsi sebagai biofuel yang efisien dengan emisi asap yang terkontrol.

Penambahan perekat tanah liat memberikan efek signifikan pada daya tahan mekanik biopelet. Perlakuan dengan 30% tanah liat menghasilkan nilai daya tahan terendah (menunjukkan resistansi tinggi terhadap kerusakan mekanik) sebesar 45,83%, sementara perlakuan dengan 10% tanah liat menghasilkan nilai 55,03%. Meskipun perbedaan ini tidak selalu signifikan secara statistik, tren umum menunjukkan bahwa peningkatan konten perekat meningkatkan integritas struktural biopelet, memfasilitasi penanganan, penyimpanan, dan pengangkutan yang lebih baik.

6. Biochar dalam Konteks Ekonomi Sirkular dan Mitigasi Iklim

Dari perspektif ekonomi sirkular dan keberlanjutan lingkungan, aplikasi biochar mewakili paradigma yang transformatif. Proses produksi biochar mengkonversi limbah yang sebaliknya akan menciptakan masalah manajemen limbah menjadi material berharga dengan aplikasi multifungsi. Hal ini mengurangi volume limbah yang dibuang ke tempat pembuangan akhir, meminimalkan emisi metana dari penguraian anaerobik limbah organik, dan menciptakan nilai ekonomi tambahan dari limbah pertanian.

Aspek mitigasi perubahan iklim dari biochar terfokus pada sequestrasi karbon jangka panjang. Biochar adalah bentuk karbon yang sangat stabil, dengan kelayakan hidup ratusan hingga ribuan tahun di dalam tanah. Dengan mengikat karbon dalam bentuk solid yang resisten terhadap mineralisasi biologis, biochar secara efektif menghilangkan CO₂ dari siklus karbon aktif. Ketika dikombinasikan dengan praktik pertanian berkelanjutan lainnya, aplikasi biochar dapat berkontribusi pada pencapaian target emisi gas rumah kaca global.

Lebih lanjut, penggunaan biopelet sebagai pengganti bahan bakar fosil menciptakan manfaat iklim tambahan dengan mengurangi ketergantungan pada sumber energi berbasis karbon fosil. Ketika biopelet dibakar, karbon yang dilepaskan berasal dari absorpsi atmosfer masa lalu tanaman selama pertumbuhan, menjadikan pembakaran biochar secara hitung karbon netral atau bahkan negatif jika dikombinasikan dengan sequestrasi karbon tanah dari penerapan biochar di lahan pertanian.



Gambar 2. Biochar dari berbagai Biomassa

KESIMPULAN

Review artikel ini menyajikan bukti komprehensif bahwa biochar dari berbagai sumber biomassa mewakili solusi multifungsi yang menjanjikan untuk menjaga keberlanjutan lingkungan. Temuan utama mencakup:

1. **Potensi Limbah Biomassa:** Limbah pertanian yang berlimpah seperti jerami padi, serbuk gergaji, limbah tebu, dan daun pohon dapat dikonversi menjadi biochar berkualitas tinggi melalui pirolisis, mengatasi masalah manajemen limbah sekaligus menciptakan material bernilai tambah.
2. **Kontrol Kualitas:** Sifat fisikokimia biochar dapat dioptimalkan melalui pemilihan jenis biomassa dan kondisi pirolisis yang tepat (terutama temperatur), memungkinkan produksi biochar yang disesuaikan dengan aplikasi spesifik.
3. **Aplikasi Amandemen Tanah:** Penerapan biochar sebagai amandemen tanah secara signifikan meningkatkan kapasitas retensi air, ketersediaan nutrisi, dan aktivitas biologi tanah, memberikan manfaat langsung bagi produktivitas pertanian dan kestabilan ekosistem.
4. **Remediasi Lingkungan:** Kemampuan adsorpsi biochar dapat dimanfaatkan untuk remediasi tanah dan air yang terkontaminasi logam berat dan pencemar organik, menawarkan solusi biaya-efektif untuk pembersihan lingkungan.
5. **Biofuel Berkelanjutan:** Integrasi biochar dengan perekat alami menghasilkan biopellet dengan sifat mekanik dan energi yang superior, menyediakan alternatif energi terbarukan yang ramah lingkungan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih kepada Prof. Ahyar Ahmad yang telah membimbing penulis dalam menyelesaikan review artikel ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Alghashm, S., Al-Omran, A., & Aly, A. (2018). Effects of biochar and synthetic polymer on the hydro-physical properties of sandy soils. *Sustainability*, 10(2), 2-18.
- Butler, J. W., Skrivan, W., & Lotfi, S. (2023). Identification of optimal binders for torrefied biomass pellets. *Energies*, 16(8), 3390.
- He, H., Wang, Y., Sun, Y., Sun, W., & Wu, K. (2024). From raw material powder to solid fuel pellet: A state-of-the-art review of biomass densification. *Biomass and Bioenergy*, 186, 107271.
- Jindo, K., Mizumoto, H., Sawada, Y., Sanchez-Monedero, M. A., & Sonoki, T. (2014). Physical and chemical characterization of biochars derived from different agricultural residues. *Biogeosciences*, 11, 6613-6621.
- Khan, S., Wang, N., Reid, B. J., Freddo, A., & Cai, C. (2013). Reduced bioaccumulation of pahs by *Lactuca sativa* l. grown in contaminated soil amended with sewage sludge and sewage sludge derived biochar. *Environmental Pollution*, 175, 64-68.
- Khater, E. S., Bahnasawy, A., Hamouda, R., Sabahy, A., Abbas, W., & Morsy, O. M. (2024). Biochar production under different pyrolysis temperatures with different types of agricultural wastes. *Scientific Reports*, 14, 2625.
- Robertson, S. J., Rutherford, M. P., López-Gutiérrez, J. C., & Massicotte, H. B. (2012). Biochar enhances seedling growth and alters root-symbioses and properties of sub-boreal forest soils. *Canadian Journal of Soil Science*, 92, 329-340.
- Ropiudin, Toibah, Dwiasi, D. W., & Syska, K. (2024). Karakteristik Biopellet Karbonisasi Biomassa Berbasis Daun Jati dan Jagung Menggunakan Perekat Tanah Liat. *Jurnal Agritechno*, 18(1), 1-14.
- Syska, K., & Ropiudin, R. (2023a). Study of 'Green Manufacturing' on Rural Crystal Coconut Sugar SMEs. *Jurnal Keteknik Pertanian Tropis dan Biosistem*, 11(1), 13-27.
- Syska, K., & Ropiudin, R. (2023b). Drying characteristics and hedonic quality of crystal coconut sugar using rotating rack type dryer with energy source from thermal waste and biomass. *Jurnal Agritechno*, 16(1), 19-28.