

REKAYASA RANTAI NILAI BIOCHAR DARI LIMBAH BIOMASSA: INTEGRASI PIROLISIS TERDISTRIBUSI, DENSIFIKASI, COFIRING, DAN PEMANFAATAN INDUSTRI UNTUK DEKARBONISASI SIRKULAR

Romi Djafar^{*1)}, Yunita Djamalu²⁾

^{1,2)} Teknologi Rekayasa Energi Terbarukan Fakultas teknik Universitas Negeri Gorontalo

*e-mail: romidjafarmesin@gmail.com

Asal Negara: Indonesia

ABSTRAK

Transformasi limbah biomassa menjadi biochar dan bahan bakar padat terpadatkan semakin penting karena mampu menghubungkan pengelolaan residu, substitusi bahan bakar fosil, dan dekarbonisasi industri. Tinjauan ini menelaah 57 publikasi unik periode 2020–2026 dari dua hasil ekstraksi bibliografis dan memprioritaskan 49 studi yang tetap relevan setelah deduplikasi serta penyaringan tematik. Analisis disusun menurut rantai nilai: karakteristik bahan baku, pirolisis dan torrefaksi, densifikasi dan pemilihan pengikat, pembakaran serta pembakaran bersama, integrasi proses biologis-termokimia, dan pemanfaatan nonenergi. Hasil sintesis menunjukkan bahwa temperatur konversi merupakan pengungkit utama yang mengendalikan hasil biochar, karbon tetap, nilai kalor, porositas, kestabilan termal, dan reaktivitas. Densifikasi memperbaiki densitas curah, kekuatan mekanik, penyimpanan, dan pengumpanan, tetapi jenis serta dosis pengikat menghasilkan pertukaran antara nilai kalor, abu, emisi, ketahanan air, dan biaya. Bukti terbaru memperluas fungsi biochar dari bahan bakar rumah tangga menuju cofiring pembangkit, injeksi tanur tinggi, reduktor dan pembentuk busa pada rute DRI–EAF, bahan karbon tergrafitisasi, serta sistem pirolisis terdistribusi dengan pemulihan bio-tar dan panas. Namun, manfaat iklim tidak otomatis tercapai karena dipengaruhi sumber biomassa, energi proses, pembakaran terbuka yang dihindari, emisi partikulat, PAH, NO_x, perpindahan logam berat, dan pilihan penggunaan akhir. Tinjauan ini mengusulkan kerangka keputusan berbasis kesesuaian bahan baku–proses–produk, normalisasi kinerja per unit energi, verifikasi mutu menurut standar, dan optimasi multiobjektif. Agenda riset prioritas meliputi model prediktif berbasis pembelajaran mesin, pengikat rendah abu, pengendalian keselamatan debu, validasi industri jangka panjang, serta analisis tekno-ekonomi dan siklus hidup yang membandingkan jalur energi, material, dan sekuestrasi karbon.

Dengan demikian, biochar diposisikan bukan sebagai produk tunggal, melainkan platform karbon sirkular yang harus dirancang sesuai konteks aplikasi lokal.

Kata kunci: biochar; pirolisis biomassa; briket biomassa; densifikasi; cofiring; dekarbonisasi industri; ekonomi sirkular

ABSTRACT

The conversion of biomass waste into biochar and densified solid fuels has become increasingly important because it links residue management, fossil fuel substitution, and industrial decarbonization. This review examines 57 unique publications from 2020–2026 identified through two bibliographic extractions and prioritizes 49 studies that remained relevant after deduplication and thematic screening. The analysis is organized according to the value chain: feedstock characteristics; pyrolysis and torrefaction; densification and binder selection; combustion and cofiring; biological–thermochemical process integration; and non-energy applications. The synthesis shows that conversion temperature is the primary parameter controlling biochar yield, fixed-carbon content, calorific value, porosity, thermal stability, and reactivity. Densification improves bulk density, mechanical strength, storage, and feeding performance. However, binder type and dosage create trade-offs among calorific value, ash content, emissions, water resistance, and cost. Recent evidence has expanded the role of biochar beyond household fuel to include power-plant cofiring, blast-furnace injection, use as a reducing agent and foaming material in the DRI–EAF route, graphitized carbon materials, and distributed pyrolysis systems incorporating bio-tar and heat recovery. Nevertheless, climate benefits are not automatically achieved because they depend on biomass sources, process energy requirements, avoided open burning, particulate emissions, PAHs, NO_x, heavy-metal transfer, and end-use choices. This review proposes a decision-making framework based on feedstock–process–product compatibility, performance normalization per unit of energy, quality verification against applicable standards, and multiobjective optimization. Priority research areas include machine-learning-based predictive models, low-ash binders, dust-safety management, long-term industrial validation, and techno-economic and life-cycle assessments comparing energy, material, and carbon-sequestration pathways. Biochar should therefore be regarded not as a single product but as a circular carbon platform that must be designed according to the local application context.

Keywords: biochar; biomass pyrolysis; biomass briquettes; densification; cofiring; industrial decarbonization; circular economy

1. Pendahuluan

Limbah pertanian, kehutanan, perkotaan, pengolahan pangan, dan lumpur industri membentuk cadangan karbon terbarukan yang besar, tetapi nilainya sering hilang melalui pembakaran terbuka, pembusukan tidak terkendali, atau penimbunan. Pada sistem pertanian, pembakaran residu jerami tetap dipilih karena murah dan cepat, walaupun menghasilkan beban gas rumah kaca dan polutan udara serta menghilangkan unsur hara yang seharusnya dapat dipulihkan (Anand, Kumar, & Kaushal, 2022; Sakhiya et al., 2020; Hou et al., 2023). Pada limbah kebun dan perkotaan, kadar air, densitas curah rendah, variasi abu, dan musim produksi membuat bahan tersebut sulit diperdagangkan sebagai bahan bakar langsung (Maśán et al., 2023; Bača et al., 2024; Ni et al., 2026). Tantangan serupa muncul pada limbah pengolahan batubara, lumpur, ban bekas, dan residu hewani yang mengandung mineral atau kontaminan sehingga memerlukan jalur konversi dan pengendalian mutu yang lebih ketat (Guo et al., 2021; Kolosionis et al., 2021; Sarrion et al., 2023).

Pirolisis, torrefaksi, karbonisasi hidrotermal, dan densifikasi mengubah residu tersebut menjadi biochar, hydrochar, pelet, atau briket dengan densitas energi dan kestabilan yang lebih tinggi. Biochar tidak lagi dipandang hanya sebagai pembenah tanah, tetapi sebagai platform karbon yang dapat diarahkan menjadi bahan bakar padat, bahan campuran cofiring, reduktor metalurgi, adsorben, modifier material, prekursor grafit, dan penyimpanan karbon jangka panjang (Venkatachalam et al., 2024; Z.-H. Zhang et al., 2025; Wu et al., 2025; Jabeen et al., 2024). Perluasan fungsi ini membuat kualitas biochar tidak dapat dinilai hanya dengan satu parameter. Biochar yang baik untuk pembakaran membutuhkan nilai kalor, reaktivitas, dan kadar abu yang sesuai; biochar untuk reduktor memerlukan karbon tetap serta reaktivitas terkontrol; sedangkan biochar untuk adsorpsi atau sekuestrasi lebih bergantung pada porositas, gugus fungsi, dan kestabilan aromatik (Han et al., 2026; Bakhshkandi et al., 2026; A. Chen et al., 2024).

Densifikasi menjadi penghubung penting antara produksi biochar dan penggunaan akhirnya. Serbuk biochar memiliki densitas curah rendah, mudah berdebu, sulit dialirkan, dan menimbulkan biaya penyimpanan maupun pengangkutan yang tinggi. Pembentukan briket atau pelet meningkatkan kekuatan mekanik dan kemudahan penanganan, tetapi pengikat, tekanan, temperatur cetakan, ukuran partikel, dan kadar air dapat mengubah nilai kalor, emisi, ketahanan air, dan abu produk (Ngene et al., 2024; Obi et al., 2022; J. Xu et al., 2022). Bukti terbaru menunjukkan bahwa pengikat lemak hewan

pada briket biochar jarum pinus dapat memberikan keseimbangan energi dan emisi yang lebih baik, sedangkan bentonit menghasilkan kekuatan tinggi tetapi meningkatkan abu dan emisi sulfur (Roy et al., 2026). Pada skala usaha kecil, kinerja pencampuran juga menentukan homogenitas, kapasitas, dan mutu briket; desain mesin pengaduk arang tempurung kelapa menunjukkan bahwa durasi serta putaran yang tepat menjadi bagian dari kontrol proses, bukan sekadar tahap persiapan (Dermawan et al., 2025).

Literatur mutakhir memperlihatkan pergeseran dari eksperimen produk tunggal menuju rekayasa rantai nilai. Pirolisis terdistribusi kini dirancang dengan resirkulasi gas volatil, pemulihan bio-tar, dan pemanfaatan panas; produk biochar kemudian didensifikasi menggunakan pengikat yang sebagian berasal dari produk samping proses (Ni et al., 2026; Bindar et al., 2024). Di sisi aplikasi, campuran biochar–batubara telah diuji pada cofiring pembangkit, injeksi tanur tinggi, dan rute direct reduced iron–electric arc furnace (DRI–EAF), yang menuntut sifat berbeda pada setiap tahapan (Anand, Sakhiya, et al., 2022; Tang et al., 2024; Han et al., 2026). Pada saat yang sama, peningkatan temperatur pirolisis membuka peluang menghasilkan karbon yang lebih tergrafitisasi, tetapi menurunkan hasil padatan dan meningkatkan kebutuhan energi (Bakhshkandi et al., 2026; Xie et al., 2021).

Tinjauan terdahulu banyak memisahkan pembahasan tentang produksi biochar, pengikat briket, pembakaran, sekuestrasi karbon, dan aplikasi industri. Fragmentasi tersebut menyulitkan penentuan kombinasi bahan baku–proses–produk yang paling tepat karena peningkatan satu atribut dapat menurunkan atribut lain. Misalnya, temperatur tinggi meningkatkan karbon tetap dan stabilitas, tetapi mengurangi hasil biochar; pengikat mineral memperkuat briket, tetapi menaikkan abu; penghalusan partikel mempercepat pembakaran, tetapi meningkatkan risiko ledakan debu (Sakhiya et al., 2021; Roy et al., 2026; Saeed et al., 2021). Oleh karena itu, tinjauan ini menyusun sintesis terpadu mengenai rekayasa rantai nilai biochar dari limbah biomassa, dengan fokus pada interaksi antara karakteristik bahan baku, kondisi konversi termokimia, densifikasi, kinerja pembakaran, aplikasi industri, dan dampak lingkungan. Kontribusi utamanya adalah kerangka seleksi yang menempatkan penggunaan akhir sebagai titik awal desain, bukan sebagai keputusan setelah biochar diproduksi.

2. Metode Tinjauan dan Kerangka Analisis

Dua berkas ekstraksi bibliografis digabungkan dan dideduplikasi berdasarkan DOI, judul, serta tahun publikasi. Proses tersebut menghasilkan 57 publikasi unik periode 2020–2026;

setelah penyaringan relevansi, 49 studi digunakan dalam sintesis utama. Korpus mencakup artikel penelitian, artikel tinjauan, bab buku, dan prosiding yang membahas bahan baku biomassa, pirolisis, torrefaksi, karbonisasi hidrotermal, densifikasi, pembakaran, cofiring, aplikasi metalurgi, pemodelan, dampak lingkungan, serta pemanfaatan nonenergi. Literatur terbaru tahun 2024–2026 diprioritaskan untuk mengidentifikasi arah perkembangan, sedangkan studi 2020–2023 digunakan untuk menjelaskan mekanisme, tren kuantitatif, dan basis pembandingan (Han et al., 2026; Roy et al., 2026; Ni et al., 2026; Ngene et al., 2024).

Ekstraksi informasi dilakukan pada enam dimensi. Pertama, karakter bahan baku meliputi kadar air, abu, komposisi unsur, nilai kalor, dan jenis kontaminan. Kedua, kondisi konversi meliputi temperatur, laju pemanasan, waktu tinggal, tekanan, dan penggunaan katalis. Ketiga, sifat produk mencakup hasil biochar, karbon tetap, porositas, nilai kalor, densitas, kekuatan tekan, ketahanan jatuh, dan stabilitas termal. Keempat, kinerja penggunaan meliputi penyalaan, lama pembakaran, efisiensi termal, emisi, reaktivitas, serta kompatibilitas dengan peralatan. Kelima, aspek lingkungan dan keselamatan meliputi gas rumah kaca, NO_x, CO, SO_x, PAH, logam berat, ledakan debu, dan pengelolaan abu. Keenam, aspek sistem mencakup biaya, skala, integrasi produk samping, dan pilihan penggunaan akhir (Khan et al., 2023; Obi et al., 2022; Ngene et al., 2024).

Sintesis dilakukan secara tematik dan berbasis rantai sebab-akibat. Karakteristik bahan baku diperlakukan sebagai penentu kebutuhan pra-perlakuan dan jendela operasi konversi; kondisi konversi menentukan struktur serta komposisi biochar; struktur produk memengaruhi densifikasi, aliran, reaktivitas, dan emisi; seluruh tahap akhirnya menentukan kelayakan ekonomi serta manfaat iklim. Temuan kuantitatif dipertahankan sesuai kondisi masing-masing studi dan tidak dianggap berlaku universal. Sebagai contoh, nilai kalor yang tinggi tidak otomatis menunjukkan produk terbaik bila dicapai dengan pengikat mahal, kebutuhan energi proses tinggi, atau emisi yang meningkat (Roy et al., 2026; Ni et al., 2026; Mainkaew et al., 2023).

3. Heterogenitas Bahan Baku dan Kebutuhan Pra-perlakuan

Kualitas biochar berawal dari heterogenitas bahan baku. Residu lignoselulosa seperti jerami, serbuk gergaji, pelepah sawit, limbah kebun, jarum pinus, dan tempurung umumnya memiliki volatil tinggi dan abu lebih rendah daripada lumpur atau residu hewani, tetapi kandungan alkali, silika, dan klorin dapat menimbulkan slagging, fouling, atau korosi saat dibakar (Sakhiya et al., 2021; Maśán et al., 2023; Roy et al., 2026). Limbah pengolahan buah yang dianalisis memiliki kadar air awal sekitar 15%, nilai kalor bawah rata-rata 16,5 MJ/kg, dan abu

sekitar 4,9%, sehingga sebagian besar berpotensi digunakan langsung di fasilitas pengolahan lokal (Bača et al., 2024). Sebaliknya, limbah daun perkotaan dapat memiliki kadar air dan abu tinggi serta nilai kalor rendah, sehingga tidak semua fraksi limbah hijau sesuai untuk pelletisasi tanpa pemilahan (Maśán et al., 2023).

Ukuran partikel dan kadar air menentukan penggilingan, pencampuran, densifikasi, serta keselamatan. Biomassa berserat sulit dihaluskan dibanding batubara, sedangkan fraksi sangat halus memiliki kecepatan rambat api dan risiko ledakan lebih besar (Saeed et al., 2021). Pada perangkat pencacah dan pengangkut udara jerami padi, pengaturan kecepatan impeller, jumlah serta sudut bilah, dan geometri saluran menghasilkan aliran yang lebih seragam serta meningkatkan densitas dan produktivitas briket (S. Chen et al., 2022). Dengan demikian, unit persiapan bahan baku perlu dinilai sebagai bagian dari sistem energi: konsumsi listrik, distribusi ukuran, kehilangan debu, dan kestabilan aliran harus dimasukkan ke neraca proses.

Pengeringan dan karbonisasi perlu disesuaikan dengan karakter intrinsik bahan. Pada residu pertanian, kenaikan temperatur pirolisis umumnya menurunkan hasil biochar tetapi meningkatkan karbon, pH, luas permukaan, dan nilai kalor (Sakhiya et al., 2021; Sakhiya et al., 2020). Pada limbah kayu alder, torrefaksi dan pirolisis menghasilkan nilai kalor hingga 27,9–29,7 MJ/kg pada temperatur tinggi, menunjukkan potensi sebagai bahan bakar padat tanpa asap (Mokrzycki et al., 2020). Namun, peningkatan temperatur tidak selalu ekonomis karena energi proses naik dan sebagian karbon berpindah ke gas atau minyak. Penggunaan panas balik, resirkulasi gas volatil, atau pemanfaatan bio-tar sebagai pengikat dapat memperbaiki efisiensi sistem (Ni et al., 2026; Bindar et al., 2024).

4. Rekayasa Konversi Termokimia dan Sifat Biochar

Temperatur merupakan variabel paling konsisten dalam mengubah hasil dan mutu biochar. Pirolisis jerami padi pada 300–600 °C menunjukkan penurunan hasil padatan, sementara pH, volume pori, luas permukaan, dan nilai kalor meningkat; efisiensi energi dan eksergi sistem juga meningkat pada temperatur lebih tinggi (Sakhiya et al., 2021). Studi lain pada jerami padi memperlihatkan kenaikan karbon tetap, karbon elemental, dan nilai kalor seiring temperatur, sekaligus penurunan emisi gas rumah kaca dibanding pembakaran jerami mentah (Sakhiya et al., 2020). Pada biochar pelet batang jagung, temperatur tinggi meningkatkan kestabilan dan kekerasan, tetapi kinerja pembakaran terbaik justru dilaporkan pada sekitar 400 °C, sehingga produk paling stabil tidak selalu paling reaktif sebagai bahan bakar (Xie et al., 2021).

Pola yang sama tampak pada serbuk gergaji. Pirolisis vakum 300–500 °C menghasilkan biochar

tertinggi pada 300 °C, bio-oil maksimum sekitar 450 °C, dan syngas serta keluaran energi tertinggi mendekati 500 °C (Trada et al., 2022). Artinya, optimasi tidak dapat dilakukan hanya berdasarkan hasil biochar; tujuan proses harus ditentukan terlebih dahulu, apakah memaksimalkan padatan, minyak, gas, atau total pemulihan energi. Pada pelepah sawit, pirolisis 500 °C dengan resirkulasi gas volatil menghasilkan biochar berpori yang memenuhi standar dan menurunkan potensi pemanasan global dibanding pengomposan alami maupun pirolisis tradisional (Bindar et al., 2024). Integrasi panas dan gas proses menjadi kunci untuk mengurangi penalti energi pada temperatur tinggi.

Studi 2026 memperluas hubungan temperatur-struktur menuju potensi grafitisasi. Biochar dari ban bekas, kayu poplar, dan jerami gandum yang dipirolisis 500–800 °C menunjukkan peningkatan karbon, aromatisasi, luas permukaan, keteraturan kristalin, dan kestabilan termal pada temperatur lebih tinggi, meskipun hasil biochar menurun (Bakhshkandi et al., 2026). Perubahan tersebut penting bagi aplikasi elektroda, material tahan panas, atau karbon metalurgi, tetapi tidak otomatis menguntungkan untuk pembakaran karena volatil yang terlalu rendah dapat memperlambat penyalaan. Dengan demikian, temperatur harus dipilih berdasarkan “spesifikasi fungsi” dan bukan asumsi bahwa karbonisasi maksimum selalu terbaik.

Torrefaksi berada di antara pengeringan dan pirolisis intensif. Proses ini meningkatkan kerapuhan, densitas energi, dan kemudahan penggilingan sambil mempertahankan hasil padatan lebih tinggi. Briket biochar jarum pinus ter-torrefaksi mencapai nilai kalor hingga 31,20 MJ/kg ketika menggunakan

pengikat lemak hewan 20%, dengan penyalaan cepat dan emisi rendah (Roy et al., 2026). Tinjauan aplikasi biomassa pada DRI–EAF juga menyarankan biomassa ter-torrefaksi sebagai kompromi biaya dan fungsi ketika biochar berkadar karbon tetap sangat tinggi terlalu mahal (Han et al., 2026). Ini menunjukkan bahwa jalur termokimia ringan dapat lebih sesuai untuk skala industri bila kebutuhan proses tidak mensyaratkan karbonisasi penuh.

Karbonisasi hidrotermal menawarkan keunggulan untuk bahan baku basah. Limbah taman dan kebun yang diproses pada 180–230 °C menghasilkan hydrochar dengan nilai kalor 21–25 MJ/kg, abu rendah, dan indeks pembakaran yang baik; air proses kemudian dapat dicerna secara anaerob untuk menghasilkan metana (Ipiales et al., 2022). Pada limbah daging dan tulang ayam, perlakuan hidrotermal asam menghasilkan bio-oil dengan nilai kalor sekitar 38 MJ/kg, melarutkan fosfor serta nitrogen ke fase cair, memungkinkan pemulihan struvit dan produksi metana (Sarrion et al., 2023). Jalur ini memperlihatkan bahwa sistem terbaik dapat menghasilkan energi sekaligus memulihkan nutrisi, tetapi penggunaan asam, korosi, pemisahan padat-cair, dan pengelolaan air proses perlu dinilai.

Tabel 1 merangkum bukti kunci bahwa satu kondisi proses tidak dapat memenuhi seluruh sasaran. Temperatur rendah mempertahankan hasil padatan; temperatur menengah sering memberi pembakaran baik; temperatur tinggi meningkatkan aromatisasi, porositas, dan stabilitas. Integrasi produk samping, pemulihan panas, dan pemodelan prediktif menjadi jalan untuk mengurangi pertukaran tersebut (Ni et al., 2026; Trada et al., 2022; Mari Selvam & Balasubramanian, 2023).

Tabel 1. Pengaruh bahan baku dan kondisi konversi terhadap sifat biochar serta pemulihan energi

Bahan baku/sistem	Teknologi/kondisi	Kinerja utama	Manfaat/implikasi	Batasan/risiko	Ref.
Jerami padi	Pirolisis lambat 300–600 °C	HHV 17,63–20,13 MJ/kg; luas permukaan meningkat; hasil biochar menurun	Peningkatan energi dan eksersi pada temperatur tinggi	Trade-off hasil padatan dan kebutuhan energi	Sakhiya et al. (2021)
Serbuk gergaji	Pirolisis vakum 300–500 °C	Biochar maksimum 60,67% pada 300 °C; bio-oil maksimum 40,67% pada 450 °C	Produk dapat diarahkan ke padat, cair, atau gas	Optimum berubah menurut produk sasaran	Trada et al. (2022)
Pelet batang jagung	Pirolisis 300–800 °C dan mikro-CT	Biochar 400 °C memberi pembakaran terbaik; temperatur tinggi meningkatkan stabilitas	Pemetaan struktur internal dan sifat kimia	Stabilitas tinggi tidak selalu berarti reaktivitas terbaik	Xie et al. (2021)
Pelepah sawit	Pirolisis dua ruang 500 °C, 30 menit	Hasil 39,99%; HHV 22,55 MJ/kg; GWP 21,1% lebih rendah dari pirolisis tradisional	Resirkulasi volatil dan produksi lebih bersih	Efisiensi energi proses masih terbatas	Bindar et al. (2024)
Limbah kebun bambu/kayu	Pirolisis terdistribusi 400 °C; HPMC–bio-tar 3:1	HHV arang cetak 25,47–25,88 MJ/kg; kekuatan 143–172 N/cm	Pemulihan bio-tar dan panas memperkuat sirkularitas	Harga jual dipengaruhi bahan habis pakai dan tenaga kerja	Ni et al. (2026)
Limbah taman dan kebun	HTC 180–230 °C + pencernaan anaerob	Hydrochar 21–25 MJ/kg; metana 253–326 mL/g COD	Pemulihan energi dari padatan dan air proses	Memerlukan pengelolaan air proses	Ipiales et al. (2022)
Ban, kayu poplar, jerami gandum	Pirolisis 500–800 °C	Karbon, porositas, kristalinitas, dan stabilitas meningkat	Peluang prekursor grafit dan karbon industri	Hasil biochar turun dan energi proses naik	Bakhshkandi et al. (2026)

Bahan baku/sistem	Teknologi/kondisi	Kinerja utama	Manfaat/implikasi	Batasan/risiko	Ref.
Sewage sludge	Karbonisasi 400–700 °C + pencucian	HCl meningkatkan karbon 20% dan menurunkan abu 50%	Mengurangi slagging, fouling, dan logam	Menghasilkan larutan pencuci yang perlu diolah	Kolosionis et al. (2021)
Beragam biomassa	Pirolisis gelombang mikro + XGBoost	Prediksi hasil dan HHV dengan $R^2 \approx 0,91$	Mendukung optimasi berbasis data	Kinerja bergantung cakupan dan mutu basis data	Mari Selvam & Balasubramanian (2023)

Catatan: Angka dipertahankan sesuai kondisi eksperimen pada publikasi sumber dan tidak diekstrapolasi sebagai nilai universal.

5. Densifikasi, Pengikat, dan Mutu Bahan Bakar Padat

Densifikasi mengubah serbuk atau arang rapuh menjadi produk dengan bentuk, densitas, dan kekuatan yang dapat ditangani. Tinjauan pengikat briket menunjukkan bahwa metodologi pengujian masih sangat beragam, padahal densitas, ketahanan jatuh, kekuatan tekan, ketahanan air, kadar air, abu, dan nilai kalor perlu dibandingkan dengan prosedur yang konsisten (Obi et al., 2022). Tinjauan biochar briquetting yang lebih baru memperkirakan dosis pengikat optimum umumnya 5–15%, tetapi rentang tersebut bergantung pada bahan baku dan temperatur pirolisis; durabilitas produk sering berada pada kisaran 70–90% (Ngene et al., 2024). Literatur 2026 memperlihatkan bahwa pemilihan pengikat bukan sekadar persoalan kekuatan, melainkan optimasi simultan antara energi dan dampak lingkungan (Roy et al., 2026).

Pengikat organik cenderung mempertahankan nilai kalor lebih baik, tetapi dapat memengaruhi emisi dan ketahanan air. Pada briket jarum pinus ter-torrefaksi, lemak hewan 20% menghasilkan nilai kalor tertinggi, penyalan sekitar lima detik, pembakaran sekitar 45 menit, CO rendah, dan tidak terdeteksi SO_x maupun NO_x; sebaliknya, bentonit menghasilkan kekuatan tekan dan shatter index tertinggi tetapi meningkatkan abu serta SO_x (Roy et al., 2026). Pada briket biochar dari limbah jagung, sekam padi, dan tempurung kelapa, optimasi rasio biomassa–pengikat menghasilkan nilai kalor 7.192 kcal/kg dan abu 3,57%; kadar air di bawah 10% membantu penyalan serta memperpanjang waktu

bakar (Heriyanti et al., 2025). Temuan tersebut menguatkan bahwa pengikat harus dinilai melalui matriks kinerja, bukan satu indikator mekanik.

Tekanan, temperatur cetakan, dan urutan karbonisasi juga menentukan kualitas. Pelet arang serbuk gergaji–lumpur dengan H₃PO₄ mencapai densitas sekitar 1.279 kg/m³ dan kekuatan tekan 18,7 MPa pada temperatur cetakan 80 °C, tekanan 100 MPa, dan karbonisasi 500 °C; hasil padatan menurun ketika temperatur karbonisasi naik (J. Xu et al., 2022). Pada briket limbah kayu eukaliptus, tekanan pemadatan memengaruhi temperatur pembakaran, sedangkan produk menunjukkan durabilitas yang memadai untuk penanganan, transportasi, dan pemakaian kembali pada tungku serta boiler (Sena et al., 2021). Briket biochar–kotoran sapi dari beberapa residu juga menghasilkan nilai kalor tinggi, tetapi variasi komposisi menunjukkan bahwa biomassa dan pengikat biologis tidak dapat dipertukarkan tanpa karakteristikasi (Deb Majumder et al., 2021).

Standar mutu perlu menghubungkan produk dengan konteks penggunaan. Sistem rumah tangga membutuhkan penyalan mudah, emisi CO rendah, dan keamanan penyimpanan; boiler memerlukan ukuran seragam, abu terkendali, serta slagging rendah; tanur metalurgi membutuhkan karbon tetap, reaktivitas, kekuatan, dan aliran injeksi (Khan et al., 2023; Han et al., 2026). Penilaian yang hanya menggunakan nilai kalor dapat meloloskan produk rapuh, higroskopis, atau beremisi tinggi. Tabel 2 menunjukkan bagaimana perubahan bahan baku, pengikat, dan kondisi pemadatan menghasilkan kombinasi mutu yang berbeda.

Tabel 2. Bukti densifikasi, pembakaran, cofiring, dan pemanfaatan industri biochar

Bahan baku/sistem	Teknologi/kondisi	Kinerja utama	Manfaat/implikasi	Batasan/risiko	Ref.
Biochar jarum pinus	Briket; pengikat 15–30 wt%	Lemak hewan 20%: 31,20 MJ/kg, penyalan 5 s, pembakaran 45 menit	Keseimbangan energi dan emisi yang baik	Bentonit lebih kuat tetapi abu dan SO _x lebih tinggi	Roy et al. (2026)
Residu jagung, sekam, tempurung	Karbonisasi dan optimasi pengikat	7.192 kcal/kg; abu 3,57%; moisture <10%	Bahan bakar terakses untuk ekonomi sirkular	Mutu bergantung rasio dan kontrol kadar air	Heriyanti et al. (2025)
Serbuk gergaji–lumpur	H ₃ PO ₄ ; 80 °C; 100 MPa; karbonisasi 500 °C	Densitas 1.279 kg/m ³ ; kekuatan 18,7 MPa	Kekuatan melebihi arang komersial	Hasil turun pada temperatur karbonisasi tinggi	J. Xu et al. (2022)
Limbah hijau perkotaan	Pelletisasi enam bahan baku	Durabilitas 96,3–98,8%; LHV 11,3–16,2 MJ/kg	Cabang dan tanaman tahunan memenuhi standar	Daun gugur bermasalah karena moisture dan abu	Mašán et al. (2023)
Arang tempurung kelapa	Mesin pengaduk 44,4 rpm, motor 2 HP	Pencampuran 12 menit menghasilkan massa campuran terbaik	Mendukung kapasitas UMKM	Perlu validasi kontinuitas dan homogenitas skala besar	Dermawan et al. (2025)

Bahan baku/sistem	Teknologi/kondisi	Kinerja utama	Manfaat/implikasi	Batasan/risiko	Ref.
Fine slag–corncob char	Co-combustion multirasio	Penyalan membaik; Ea minimum 132,19 kJ/mol pada rasio tertentu	Sinergi katalitik, pori, dan termal	Abu dapat menghambat reaksi	Jia et al. (2024)
Straw char–antrasit	Injeksi tanur tinggi	Campuran 50:50 cotton straw char mencapai efisiensi 74%	Substitusi karbon fosil di metalurgi	Reaktivitas dan aliran injeksi harus dikendalikan	Tang et al. (2024)
Biomassa/biochar untuk DRI–EAF	Reduktor, karburisator, dan foaming agent	Biomassa mentah sesuai DRI; biochar terpadatkan lebih sesuai EAF	Dekarbonisasi rute baja berbasis listrik	Biaya karbon tetap tinggi dan fluiditas injeksi	Han et al. (2026)
Biochar jerami padi/gandum	Cofiring pembangkit	Potensi 19,80 TWh dari 10,53 Mt biochar	Menghindari pembakaran terbuka dan mengganti batubara	Bergantung logistik, efisiensi, dan baseline	Anand, Sakhiya, et al. (2022)

Catatan: Angka dipertahankan sesuai kondisi eksperimen pada publikasi sumber dan tidak diekstrapolasi sebagai nilai universal.

6. Pembakaran, Cofiring, dan Dekarbonisasi Industri

Kinerja pembakaran biochar ditentukan oleh devolatilisasi, struktur pori, ukuran partikel, densitas, mineral, dan suplai oksigen. Pada jerami kedelai, temperatur 873–973 K dinilai memberikan kompromi yang lebih baik antara pemanfaatan energi dan emisi CO–NO_x; temperatur lebih tinggi mempercepat kehilangan massa tetapi meningkatkan konsumsi energi proses (Q. Xu et al., 2020). Pada tumpukan jerami, diameter dan ketebalan memengaruhi laju rambat api, laju kehilangan massa, serta temperatur nyala, menunjukkan bahwa geometri penyimpanan berhubungan langsung dengan risiko kebakaran (Li et al., 2022). Pada biomassa terpulverisasi, partikel halus merambatkan api lebih cepat daripada partikel kasar dan memiliki konsentrasi ledakan minimum yang lebih rendah (Saeed et al., 2021). Karena itu, peningkatan grindability melalui torrefaksi harus dibarengi kontrol debu dan proteksi ledakan.

Cofiring biochar dengan batubara menawarkan substitusi fosil tanpa mengganti seluruh infrastruktur. Analisis residu jerami di India memperkirakan bahwa biochar berkualitas tinggi dari jerami padi dan gandum dapat menghasilkan listrik sekitar 19,80 TWh dan mengurangi beban emisi dibanding pembakaran terbuka (Anand, Sakhiya, et al., 2022). Studi lain menunjukkan bahwa konversi jerami padi menjadi biochar menurunkan emisi gas rumah kaca secara substansial dibanding pembakaran residu mentah, sekaligus menyediakan potensi listrik pada efisiensi pembangkit 25–30% (Sakhiya et al., 2020). Namun, manfaat aktual bergantung pada energi pirolisis, transportasi, rasio cofiring, efisiensi boiler, dan perlakuan terhadap karbon biogenik.

Co-combustion juga dapat memulihkan karbon dari limbah batubara. Pemisahan fraksi kaya karbon dari fine slag gasifikasi meningkatkan nilai kalor dan mengurangi mineral yang menempel pada partikel (Guo et al., 2021). Penambahan sawdust char memperbaiki penyalan dan combustibility, dengan efek sinergis kuat pada komposisi tertentu serta penurunan energi aktivasi (Guo et al., 2021). Pada campuran fraksi kaya karbon dan corncob char, penambahan biomassa menurunkan temperatur

penyalan dan meningkatkan pembakaran melalui katalisis logam, struktur pori, dan efek termal; energi aktivasi minimum dilaporkan pada rasio tertentu (Jia et al., 2024). Bukti ini mendukung prinsip bahwa sinergi harus dibuktikan, bukan diasumsikan, karena interaksi abu juga dapat menghasilkan efek antagonis.

Dampak lingkungan co-combustion melampaui emisi gas. Pada campuran fine slag dan corncob char, pembakaran bersama menurunkan polutan gas dan kecenderungan sintering pada kondisi tertentu, tetapi logam berat menunjukkan perilaku berbeda: Cr dan Ni lebih banyak tertahan di bottom ash, sedangkan Cu, Zn, As, Cd, dan Pb cenderung berpindah ke fly ash atau gas buang (Jia et al., 2023). Risiko Cr, Zn, Cd, dan As tetap tinggi menurut evaluasi lingkungan, sehingga pengurangan emisi gas tidak boleh dianggap sebagai pengurangan risiko total. Sistem pemisahan partikulat, karakterisasi abu, dan uji pelindian perlu menjadi bagian dari demonstrasi cofiring.

Industri besi dan baja menjadi pasar baru bagi karbon biomassa. Campuran straw char dan batubara pada injeksi tanur tinggi menunjukkan peningkatan pembakaran; campuran cotton straw char–antrasit 50:50 mencapai efisiensi pembakaran sekitar 74%, lebih tinggi daripada campuran batubara pembanding (Tang et al., 2024). Biochar yang rapuh juga lebih mudah digiling, tetapi reaktivitas terlalu tinggi dapat menyebabkan konsumsi karbon sebelum mencapai zona sasaran. Tinjauan DRI–EAF menunjukkan bahwa biomassa tidak diproses dapat berguna sebagai reduktor pada DRI karena volatil reduktif, sedangkan EAF lebih membutuhkan biochar terpadatkan dengan volatil rendah dan reaktivitas terkendali untuk karburisasi serta pembentukan busa slag (Han et al., 2026). Tantangan utama adalah fluiditas injeksi, kekuatan briket, konsistensi karbon, dan biaya biochar berkadar karbon tetap tinggi.

Arah ini mengubah definisi “bahan bakar” menjadi “agen karbon fungsional”. Biochar untuk EAF harus menyediakan karbon pada laju dan lokasi yang tepat; biochar untuk DRI harus mendukung pembentukan gas reduktif; biochar untuk pembangkit harus terbakar lengkap dengan risiko deposit rendah (Han et al., 2026; Tang et al., 2024). Temperatur pirolisis, densifikasi, dan distribusi ukuran harus

disetel sesuai fungsi tersebut. Potensi grafitisasi dari ban bekas dan biomassa pada temperatur tinggi memperlihatkan peluang menghasilkan karbon industri dengan kestabilan dan keteraturan kristalin lebih tinggi (Bakhshkandi et al., 2026), tetapi penggunaan ban memperkenalkan isu logam, sulfur, dan emisi yang tidak sama dengan biomassa murni.

Pergeseran ke aplikasi industri juga membutuhkan normalisasi indikator. Efisiensi pembakaran, penghematan batubara, atau penurunan emisi harus dilaporkan per unit energi atau produk industri, bukan hanya per massa bahan bakar. Biochar memiliki nilai kalor, reaktivitas, dan densitas berbeda sehingga substitusi massa dapat menyesatkan. Pada metalurgi, indikator tambahan meliputi kualitas besi, stabilitas busa slag, konsumsi elektroda, dan produktivitas; pada pembangkit, indikator mencakup heat rate, slagging, unburned carbon, auxiliary power, dan availability (Khan et al., 2023; Han et al., 2026; Ngene et al., 2024). Ketiadaan metrik bersama masih menghambat perbandingan lintas studi dan skala.

7. Integrasi Proses, Ekonomi Sirkular, dan Kinerja Sistem

Sistem biochar yang berkelanjutan perlu memanfaatkan panas, gas, cairan, nutrisi, dan residu, bukan hanya produk padat. Pirolisis terdistribusi limbah kebun yang memulihkan bio-tar dan panas menghasilkan arang cetak dengan nilai kalor sekitar 25,5–25,9 MJ/kg; campuran HPMC–bio-tar juga berfungsi sebagai pengikat, walaupun harga jual minimum masih sangat dipengaruhi bahan habis pakai, tenaga kerja, dan biaya bahan baku (Ni et al., 2026). Model pirolisis dua ruang pada pelepah sawit meresirkulasikan volatil sebagai bahan bakar, menurunkan dampak pemanasan global, dan menghasilkan biochar yang dapat diarahkan ke energi atau pembenah tanah (Bindar et al., 2024). Kedua studi menunjukkan bahwa desain reaktor dan pemanfaatan produk samping dapat lebih menentukan kelayakan daripada hasil biochar semata.

Integrasi biologis–termokimia memperluas pemulihan energi. Karbonisasi hidrotermal limbah taman menghasilkan hydrochar dan air proses yang dapat dicerna untuk menghasilkan metana; kombinasi kedua aliran memulihkan sebagian besar energi bahan baku (Ipiales et al., 2022). Pada sistem lumpur, digestate dari anaerobic digestion dapat diubah menjadi biochar untuk mengurangi residu dan membuka kemungkinan kredit karbon; penggunaan biochar ke tanah menurunkan emisi CO₂ sistem, sedangkan pembakaran biochar digestate memberi kompromi berbeda antara energi, emisi, dan keuntungan (Antônio da Silva et al., 2025). Pada limbah daging dan tulang, integrasi perlakuan hidrotermal, pemulihan struvit, dan pencernaan anaerob menghasilkan bio-oil, nutrisi, dan biogas (Sarrion et al., 2023). Keunggulan sistem terpadu

terletak pada pengurangan residu akhir, tetapi kompleksitas peralatan dan pasar produk juga meningkat.

Aspek ekonomi sering dibatasi oleh biaya pengumpulan dan pra-perlakuan. Limbah hijau perkotaan tersedia dekat konsumen energi tetapi heterogen; residu pertanian tersebar dan musiman; biochar berkualitas metalurgi memerlukan temperatur serta kontrol mutu lebih tinggi (Maśán et al., 2023; Han et al., 2026). Tinjauan pengikat menegaskan bahwa ketersediaan lokal, harga, dosis, dan pengaruh terhadap mutu harus dinilai bersama (Obi et al., 2022; Ngene et al., 2024). Pengikat murah yang meningkatkan abu dapat menurunkan nilai produk atau menaikkan biaya pengelolaan residu. Analisis tekno-ekonomi harus memasukkan listrik pencacahan, pengeringan, pemadatan, penggantian die, debu hilang, serta biaya kepatuhan emisi.

Manfaat iklim bergantung pada baseline. Konversi residu yang sebelumnya dibakar terbuka memberi manfaat besar karena menghindari emisi dan menghasilkan energi; bila residu sebelumnya dikembalikan ke tanah, pengalihannya ke energi dapat mengurangi karbon serta nutrisi tanah (Anand, Kumar, & Kaushal, 2022; Z. Zhang et al., 2022). Aplikasi biochar ke tanah dapat menurunkan emisi CO₂ atau N₂O pada kondisi tertentu, tetapi hasil dipengaruhi bahan baku, temperatur produksi, dosis, tekstur, pH, air, nitrogen, dan aktivitas mikroba (C. Chen et al., 2023; C. Chen et al., 2024; C. Chen et al., 2025). Oleh karena itu, klaim “karbon netral” atau “karbon negatif” harus didukung batas sistem yang jelas dan perbandingan dengan penggunaan residu alternatif.

8. Emisi, Abu, Keselamatan, dan Penjaminan Mutu

Penurunan emisi tidak dapat disimpulkan hanya dari perubahan bahan bakar. Biomassa dan biochar umumnya memiliki sulfur lebih rendah daripada batubara, tetapi NO_x dipengaruhi nitrogen bahan, temperatur, udara, dan waktu tinggal. Pembakaran jerami kedelai menunjukkan pola CO dan NO_x nonlinier terhadap temperatur (Q. Xu et al., 2020). Briket jarum pinus dengan pengikat berbeda menghasilkan profil emisi berbeda; bentonit meningkatkan SO_x akibat kontribusi mineral, sedangkan pengikat organik tertentu memberikan emisi lebih rendah (Roy et al., 2026). Karena itu, pengujian harus dilakukan pada kondisi udara dan beban yang terkontrol serta dilaporkan per unit energi berguna.

Abu menentukan operabilitas dan penggunaan akhir. Limbah buah dengan abu rendah relatif mudah digunakan sebagai biofuel lokal (Bača et al., 2024), sedangkan limbah daun, sekam, lumpur, atau pengikat mineral dapat meningkatkan residu serta risiko deposit (Maśán et al., 2023; Yiga & Lubwama, 2020; Kolosionis et al., 2021). Pada co-combustion fine slag–biochar, beberapa logam berat tertahan di

bottom ash dan sebagian lain berpindah ke fly ash atau gas (Jia et al., 2023). Abu harus diuji komposisi, titik leleh, pelindian, dan kesesuaian pemanfaatan sebelum dikategorikan sebagai produk samping aman.

Keselamatan fisik sama pentingnya dengan emisi kimia. Serbuk biomassa halus mempunyai kecepatan rambat api tinggi dan konsentrasi ledakan minimum rendah (Saeed et al., 2021). Tumpukan jerami menunjukkan perubahan laju rambat api dan kehilangan massa sesuai diameter serta ketebalan (Li et al., 2022). Densifikasi mengurangi debu dan meningkatkan penyimpanan, tetapi briket higroskopis dapat retak, terdegradasi, atau mengalami pemanasan biologis bila kadar air tinggi. Sistem produksi memerlukan housekeeping debu, ventilasi, grounding, deteksi panas, pemisahan sumber penyalan, dan prosedur penyimpanan.

Penjaminan mutu harus mengikuti penggunaan akhir dan standar yang berlaku. Literatur biofuel menekankan pentingnya prosedur ASTM, ISO, BS EN, atau standar nasional untuk pengujian fisik, mekanik, dan kimia (Khan et al., 2023). Uji yang minimum meliputi moisture, ash, volatile matter, fixed carbon, nilai kalor, densitas, durabilitas, kekuatan tekan, ketahanan air, emisi, dan perilaku abu. Untuk aplikasi industri, perlu tambahan grindability, flowability, reaktivitas CO₂, komposisi alkali-klorin, dan kontaminan logam (Han et al., 2026; Ngene et al., 2024). Pelaporan kondisi uji secara lengkap penting karena hasil antar laboratorium tidak dapat dibandingkan bila tekanan, ukuran sampel, laju pemanasan, atau basis massa berbeda.

9. Kerangka Seleksi Teknologi dan Agenda Riset

Kerangka seleksi yang diusulkan dimulai dari definisi fungsi akhir. Tahap pertama adalah menentukan apakah produk ditujukan untuk pembakaran rumah tangga, boiler, cofiring pembangkit, metalurgi, adsorpsi, material konstruksi, atau sekuestrasi. Setiap fungsi membutuhkan kombinasi berbeda antara volatil, karbon tetap, porositas, kekuatan, abu, dan reaktivitas (Han et al., 2026; Wani & Garg, 2024; A. Chen et al., 2024). Tahap kedua adalah pemetaan bahan baku yang mencakup sifat fisik-kimia, pasokan, kontaminan, radius transportasi, dan penggunaan alternatif. Bahan baku yang sangat basah dapat lebih cocok untuk HTC, sementara residu kering dan berserat cocok untuk torrefaksi atau pirolisis (Ipiales et al., 2022; Venkatachalam et al., 2024).

Tahap ketiga adalah pemilihan jendela konversi. Temperatur rendah dipilih bila hasil padatan dan gugus fungsi penting; temperatur menengah sering memberi kompromi pembakaran; temperatur tinggi dipilih untuk stabilitas, porositas, atau grafitisasi (Sakhiya et al., 2021; Xie et al., 2021; Bakhshkandi et al., 2026). Tahap keempat adalah rekayasa densifikasi yang menguji jenis pengikat,

dosis, kadar air, ukuran partikel, tekanan, temperatur die, dan waktu pencampuran (Roy et al., 2026; J. Xu et al., 2022; Dermawan et al., 2025). Desain eksperimen perlu menggunakan optimasi multiobjektif agar kekuatan tidak dicapai dengan mengorbankan nilai kalor atau emisi.

Tahap kelima adalah validasi pembakaran atau fungsi industri. Untuk biofuel, pengujian mencakup penyalan, burnout, efisiensi, CO, NO_x, SO_x, partikulat, dan abu. Untuk metalurgi, perlu pengujian injeksi, reaktivitas, pembentukan gas reduktif, stabilitas slag, dan kualitas produk (Tang et al., 2024; Han et al., 2026). Tahap keenam adalah evaluasi sistem: konsumsi energi, biaya, emisi siklus hidup, residu, keselamatan, serta pasar produk samping (Ni et al., 2026; Antônio da Silva et al., 2025; Khan et al., 2023). Teknologi hanya layak bila peningkatan kinerja produk lebih besar daripada beban tambahan proses.

Beberapa kesenjangan riset menonjol. Pertama, data jangka panjang skala industri masih terbatas. Banyak studi berhenti pada TGA, briket laboratorium, atau tungku kecil, sehingga keausan peralatan, perubahan mutu bahan baku, deposit, dan availability belum terukur (Ngene et al., 2024; Obi et al., 2022). Kedua, interaksi pengikat-abu-emisi belum dipetakan secara sistematis. Studi terbaru memperlihatkan trade-off nyata antara bentonit, lemak, pati, dan pengikat komposit (Roy et al., 2026; Ni et al., 2026), tetapi belum ada basis data yang memungkinkan rekomendasi universal.

Ketiga, standarisasi indikator masih lemah. Nilai kalor dilaporkan pada basis berbeda, durabilitas menggunakan prosedur beragam, dan emisi sering tidak dinormalisasi per energi. Harmonisasi protokol akan mempercepat transfer teknologi (Khan et al., 2023; Obi et al., 2022). Keempat, keselamatan debu belum terintegrasi dalam optimasi proses. Torrefaksi dan penghalusan meningkatkan grindability tetapi juga memperbesar bahaya ledakan (Saeed et al., 2021). Kelima, analisis siklus hidup perlu membandingkan pembakaran, aplikasi tanah, material, dan produk karbon industri, bukan hanya membandingkan biochar dengan batubara (Anand, Kumar, & Kaushal, 2022; Jabeen et al., 2024; Wani & Garg, 2024).

10. Kesimpulan

Rantai nilai biochar yang efektif harus dirancang dari penggunaan akhir menuju bahan baku. Temperatur konversi mengontrol pertukaran antara hasil padatan, reaktivitas, nilai kalor, porositas, dan stabilitas; densifikasi memperbaiki penanganan tetapi menambahkan pertukaran baru melalui jenis pengikat, tekanan, air, dan abu. Literatur terbaru menunjukkan perluasan aplikasi dari briket rumah tangga menuju cofiring, pemulihan karbon fine slag, injeksi tanur tinggi, DRI-EAF, dan karbon tergrafitisasi (Roy et al., 2026; Jia et al., 2024; Han et al., 2026; Bakhshkandi et al., 2026).

Manfaat lingkungan tidak otomatis mengikuti peningkatan karbon tetap atau substitusi batubara. Energi proses, baseline pengelolaan residu, emisi pembakaran, PAH, logam berat, abu, dan keselamatan debu dapat mengubah hasil akhir (Matamba et al., 2020; Jia et al., 2023; Saeed et al., 2021). Integrasi panas, gas, bio-tar, air proses, biogas, dan nutrisi memperbesar pemulihan sumber daya, tetapi meningkatkan kompleksitas serta kebutuhan pasar produk (Ni et al., 2026; Ipiales et al., 2022; Sarrion et al., 2023).

Arah pengembangan yang paling kuat adalah optimasi multiobjektif berbasis standar, pengikat rendah abu, peralatan terdistribusi yang efisien, model prediktif berbasis data, dan validasi industri jangka panjang. Biochar sebaiknya diperlakukan sebagai platform karbon sirkular: fraksi berkualitas tinggi diarahkan ke fungsi material atau industri bernilai tinggi, fraksi yang sesuai digunakan untuk energi, dan manfaat iklim diverifikasi melalui batas sistem yang transparan (Ngene et al., 2024; Khan et al., 2023; Jabeen et al., 2024).

Daftar Pustaka

- Anand, A., Sakhiya, A.K., Aier, I., Kakati, U., Kumar, V., & Kaushal, P. (2022). Assessment of electricity generation potential from biochar in Northern India. *Energy and Climate Change*, 3, 100068. <https://doi.org/10.1016/j.egycc.2021.100068>
- Anand, A., Kumar, V., & Kaushal, P. (2022). Biochar and its twin benefits: Crop residue management and climate change mitigation in India. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 156, 111959. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111959>
- Antônio da Silva, M., de Mello, B., Gomes Rodrigues, B.C., Ribeiro, C.A., Pastre Fertonani, I.A., & Sarti, A. (2025). Combination of anaerobic digestion and sludge biochar for bioenergy conversion: Estimation and evaluation of energy production, CO₂ emission, and cost analysis. *Journal of Environmental Management*, 374, 123974. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.123974>
- Bakhshkandi, A.F., Gholizadeh, M., Fabrega, S.M., & Clarens, F. (2026). Evaluating the graphitization potential for bio-char derived from waste tire, poplar wood, and wheat straw through pyrolysis. *Environmental Progress and Sustainable Energy*. <https://doi.org/10.1002/ep.70340>
- Bača, P., Mašán, V., Vanýsek, P., Burg, P., Binar, T., Suchý, P., & Vaňková, L. (2024). Evaluation of the Thermal Energy Potential of Waste Products from Fruit Preparation and Processing Industry. *Applied Sciences (Switzerland)*, 14(3), 1080. <https://doi.org/10.3390/app14031080>
- Bindar, Y., Steven, S., Kresno, S.W., Hernowo, P., Restiawaty, E., Purwadi, R., & Prakoso, T. (2024). Large-scale pyrolysis of oil palm frond using two-box chamber pyrolyzer for cleaner biochar production. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 14(5), 6421–6434. <https://doi.org/10.1007/s13399-022-02842-1>
- Chen, A., Shen, T., Guan, J., Wei, X., Wang, J., & Xing, S. (2024). Revolutionizing conventional adsorbents: Strengthening dimethyl phthalate adsorption through N/P co-doping macroscopic robust porous carbon. *Journal of Cleaner Production*, 434, 140176. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.140176>
- Chen, C., Wang, K., Cai, P., & Dai, Z. (2023). Biochar application to reduce CO₂ emissions from farmland and increase crop yields: a 22-year study based on big data analysis and ideal scenario modeling. *Environmental Science and Pollution Research*. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-28256-8>
- Chen, C., Wang, K., & Zhu, H. (2024). Meta-Analysis of N₂O Emissions as Affected by Biochar Amendment in Northern China. *Water, Air, and Soil Pollution*, 235(4), 238. <https://doi.org/10.1007/s11270-024-07043-2>
- Chen, C., Wang, K., & Zhu, H. (2025). Using DNDC models with two assimilation algorithms to simulate N₂O emissions from a farmland after biochar added. *Ecological Modelling*, 510, 111279. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2025.111279>
- Chen, S., Ding, H., Tang, Z., Zhao, Y., Ding, Z., & Su, Z. (2022). Fluid Movement Law and Influencing Factors of Shredding on Rice Straw Briquetting Machines. *Agronomy*, 12(6), 1439. <https://doi.org/10.3390/agronomy12061439>
- Deb Majumder, S., Ghosh, A., & De, S. (2021). Experimental Investigation of briquettes formed from various sources of biochar mixed with cow dung as alternate source of energy - A West Bengal study. *Materials Today: Proceedings*, 46, 7996–8001. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.02.721>
- Dermawan, D., Tangkemanda, A., & Muttaqin, A.N. (2025). Design and Construction of a Mixing Machine in the Process of Manufacturing Coconut Shell Charcoal Briquettes. *Engineering Proceedings*, 84(1), 28. <https://doi.org/10.3390/engproc2025084028>
- Guo, Y., Guo, F., Zhou, L., Guo, Z., Miao, Z., Liu, H., Zhang, X., Wu, J., & Zhang, Y. (2021). Investigation on co-combustion of coal gasification fine slag residual carbon and sawdust char blends: Physiochemical properties, combustion characteristic and kinetic behavior. *Fuel*, 292, 120387. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.120387>
- Han, C., Wei, G., Zhu, R., Wang, Q., & Xiao, D. (2026). Comprehensive review of biomass applications in DRI-based electric arc furnace steelmaking. *International Journal of Hydrogen Energy*, 202, 153109. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2025.153109>
- Heriyanti, A.P., Bakri, S.N.S., Jabbar, A., Kholil, P.A., Amelia, R.N., Savitri, E.N., Atunnisa, R., Dewi, S.H., & Sultan, H. (2025). Exploring Biochar Briquettes from Biomass Waste for Sustainable Energy. *Advance Sustainable Science, Engineering and Technology*, 7(3), 0250303. <https://doi.org/10.26877/7mhm6t05>
- Hou, J., Yu, C., Xu, Y., Li, H., Cai, A., Ye, M., Ma, Z., Cui, G., & Zhu, J. (2023). Reimagining carbon emission mitigation in sustainable agriculture: uncovering farmers' propensity for straw recycling. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 7, 1288763. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2023.1288763>

18. Ipiates, R.P., Mohedano, A.F., Diaz, E., & de la Rubia, M.A. (2022). Energy recovery from garden and park waste by hydrothermal carbonisation and anaerobic digestion. *Waste Management*, 140, 100–109. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2022.01.003>
19. Jabeen, M., Gaikwad, K.B., Allu, P.R., Sharma, J., Janakiraman, N., & Elchuri, S.V. (2024). Biological carbon sequestration for environmental sustainability. In *Decarbonization Strategies and Drivers to Achieve Carbon Neutrality for Sustainability* (pp. 223–257). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-13607-8.00005-5>
20. Jia, W., Guo, Y., Guo, F., Li, H., Li, Y., Zhang, Y., Wu, J., & Si, C. (2023). Co-combustion of carbon-rich fraction from coal gasification fine slag and biochar: Gas emission, ash sintering, heavy metals evolutions and environmental risk evaluation. *Chemical Engineering Journal*, 471, 144312. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2023.144312>
21. Jia, W., Li, Y., Li, H., Guo, Y., Wang, H., Guo, S., Guo, F., Zhang, Y., Wu, J., & Si, C. (2024). Synergistic co-combustion of carbon-rich fraction from coal gasification fine slag and corncob char: Performance, mechanism, kinetics, and thermodynamics. *Journal of the Energy Institute*, 112, 101481. <https://doi.org/10.1016/j.joei.2023.101481>
22. Khan, S.A., Kumar, D., Kumar, S., Isha, A., D' Silva, T.C., Chandra, R., & Vijay, V.K. (2023). Biofuel applications: Quality control and assurance, techno-economics and environmental sustainability. In *Biofuel Extraction Techniques* (pp. 367–420). Wiley. <https://doi.org/10.1002/9781119829522.ch13>
23. Kolosionis, A., Kastanaki, E., Veksha, A., Wang, H., He, C., Lisak, G., & Giannis, A. (2021). The Effects of Washing Techniques on Thermal Combustion Properties of Sewage Sludge Chars. *International Journal of Environmental Research*, 15(2), 285–297. <https://doi.org/10.1007/s41742-021-00312-6>
24. Li, C., Xu, W., Cheng, H., Du, W., Yang, R., & Zhang, H. (2022). Experimental study of fire propagation and heat transfer of biomass straw fuel with different stacked diameters and thicknesses. *Fuel*, 315, 123260. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.123260>
25. Mainkaew, A., Pattiya, A., & Jansri, S.N. (2023). Optimization of elephant dung green fuel briquette production using a low-pressure densification technique and its characterizations, and emissions. *Bioresource Technology Reports*, 21, 101328. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2022.101328>
26. Mari Selvam, S., & Balasubramanian, P. (2023). Influence of Biomass Composition and Microwave Pyrolysis Conditions on Biochar Yield and its Properties: a Machine Learning Approach. *Bioenergy Research*, 16(1), 138–150. <https://doi.org/10.1007/s12155-022-10447-9>
27. Matamba, T., Tahmasebi, A., Khoshk Rish, S., & Yu, J. (2020). Promotion Effects of Pressure on Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and H₂ Formation during Flash Pyrolysis of Palm Kernel Shell. *Energy and Fuels*, 34(3), 3346–3356. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.9b04409>
28. Mašán, V., Burg, P., Souček, J., Slany, V., & Vašík, L. (2023). Energy Potential of Urban Green Waste and the Possibility of Its Pelletization. *Sustainability (Switzerland)*, 15(23), 16489. <https://doi.org/10.3390/su152316489>
29. Mokrzycki, J., Gazińska, M., Fedyna, M., Karcz, R., Lorenc-Grabowska, E., & Rutkowski, P. (2020). Pyrolysis and torrefaction of waste wood chips and cone-like flowers derived from black alder (*Alnus glutinosa* L. Gaertn.) for sustainable solid fuel production. *Biomass and Bioenergy*, 143, 105842. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2020.105842>
30. Ngene, G.I., Bouesso, B., González Martínez, M., & Nzihou, A. (2024). A review on biochar briquetting: Common practices and recommendations to enhance mechanical properties and environmental performances. *Journal of Cleaner Production*, 469, 143193. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.143193>
31. Ni, L., Huang, A., He, Y., Gao, Q., Rong, S., Zhong, Y., Liu, S., & Liu, Z. (2026). Distributed biomass pyrolysis equipment applied in the field of yard waste treatment: equipment design, recycling of by-products, physico-chemical analysis of products, economic efficiency analysis. *Renewable Energy*, 256, 124012. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2025.124012>
32. Obi, O.F., Pecenka, R., & Clifford, M.J. (2022). A Review of Biomass Briquette Binders and Quality Parameters. *Energies*, 15(7), 2426. <https://doi.org/10.3390/en15072426>
33. Roy, M., Chakravarty, S., Kishore, B., & Kundu, K. (2026). Sustainable fuel production: briquetting and characterization of torrefied pine needle biochar. *Biofuels*. <https://doi.org/10.1080/17597269.2025.2605772>
34. Saeed, M.A., Farooq, M., Anwar, A., Abbas, M.M., Soudagar, M.E.M., Siddiqui, F.A., Shakir, M.A., Nizami, A.-S., Chaudhry, I.A., Pettinau, A., Andrews, G.E., & Phylaktou, H.N. (2021). Flame propagation and burning characteristics of pulverized biomass for sustainable biofuel. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 11(2), 409–417. <https://doi.org/10.1007/s13399-020-00875-y>
35. Sakhiya, A.K., Anand, A., Aier, I., Baghel, P., Vijay, V.K., & Kaushal, P. (2020). Sustainable utilization of rice straw to mitigate climate change: A bioenergy approach. *Materials Today: Proceedings*, 46, 5366–5371. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.08.795>
36. Sakhiya, A.K., Anand, A., Aier, I., Vijay, V.K., & Kaushal, P. (2021). Suitability of rice straw for biochar production through slow pyrolysis: Product characterization and thermodynamic analysis. *Bioresource Technology Reports*, 15, 100818. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2021.100818>
37. Sarrion, A., Ipiates, R.P., de la Rubia, M.A., Mohedano, A.F., & Diaz, E. (2023). Chicken meat and bone meal valorization by hydrothermal treatment and anaerobic digestion: Biofuel production and nutrient recovery. *Renewable Energy*, 204, 652–660. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.01.005>

38. Sena, A.S., Nahime, B., Lima, E.C., Lobo, F.A., Akasaki, J.L., & Dos Santos, I.S. (2021). Characterization of briquettes produced from eucalyptus wood waste generated in agro-industries. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 25(11), 794–798. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v25n11p794-798>
39. Tang, C., Pan, J., Zhu, D., Guo, Z., Yang, C., & Li, S. (2024). Optimizing Combustion Efficiency in Blast Furnace Injection: A Sustainable Approach Using Biomass Char and Coal Mixtures. *Sustainability (Switzerland)*, 16(14), 6140. <https://doi.org/10.3390/su16146140>
40. Trada, A., Chaudhary, A., Patel, D., & Upadhyay, D.S. (2022). An alternative fuel production from sawdust through batch-type pyrolysis reactor: Fuel properties and thermodynamic analysis. *Process Safety and Environmental Protection*, 167, 332–342. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2022.09.023>
41. Venkatachalam, C.D., Sengottian, M., Ravichandran, S.R., Sekar, S., & Bhuvaneshwaran, P. (2024). Thermochemical Conversion: An Approach for the Production of Energy Materials from Biomass. In *Biomass Energy for Sustainable Development* (pp. 35–61). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781003406501-3>
42. Wani, I., & Garg, A. (2024). Critical review on use of biochar as a modifier in asphaltic binders for pavement construction: Critical review on use of biochar as a modifier in asphaltic binders...: I. Wani, A. Garg. *Environment, Development and Sustainability*, e0247390. <https://doi.org/10.1007/s10668-024-05784-y>
43. Wu, Y., Zhang, X., Gao, L., Huang, M., Cai, B., & Zhang, J. (2025). Technical progress in resource utilization of straw powder/fiber. *Huagong Jinzhan/Chemical Industry and Engineering Progress*, 44(6), 3509–3523. <https://doi.org/10.16085/j.issn.1000-6613.2024-0666>
44. Xie, R., Zhu, Y., Zhang, H., Zhang, P., & Han, L. (2021). Effects and mechanism of pyrolysis temperature on physicochemical properties of corn stalk pellet biochar based on combined characterization approach of microcomputed tomography and chemical analysis. *Bioresource Technology*, 329, 124907. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.124907>
45. Xu, J., Zhang, S., Song, X., Liu, H., Shi, Y., & Hu, N. (2022). Effects of densification and carbonization process on properties of charcoal pellets prepared from sawdust and sludge with H3PO4 as additives. *Taiyangneng Xuebao/Acta Energiæ Solaris Sinica*, 43(7), 451–457. <https://doi.org/10.19912/j.0254-0096.tynxb.2020-1147>
46. Xu, Q., Peng, W., & Ling, C. (2020). An experimental analysis of soybean straw combustion on both CO and NOx emission characteristics in a tubular furnace. *Energies*, 13(7), 1587. <https://doi.org/10.3390/en13071587>
47. Yiga, V.A., & Lubwama, M. (2020). Thermogravimetric analysis of agricultural residue carbonized briquettes for domestic and industrial applications. *MRS Advances*, 5(20), 1039–1048. <https://doi.org/10.1557/adv.2019.485>
48. Zhang, Z., Li, N., Sun, Z., Yin, G., Zhang, Y., Bai, W., Feng, L., & Yang, J. (2022). Fall Straw Incorporation with Plastic Film Cover Increases Corn Yield and Water Use Efficiency under a Semi-Arid Climate. *Agriculture (Switzerland)*, 12(12), 2151. <https://doi.org/10.3390/agriculture12122151>
49. Zhang, Z.-H., Liu, M.-Y., Zhang, B., Sun, Z., & Yuan, T.-Q. (2025). Sustainable biofuel production through thermochemical and biological conversion technologies. In *Biofuels from Lignocellulosic Materials* (pp. 87–137). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-21527-8.00017-4>