

BIOCHAR MULTIFUNGSI DALAM EKONOMI SIRKULAR: REKAYASA PROSES, HUBUNGAN STRUKTUR–FUNGSI, DAN JALUR IMPLEMENTASI UNTUK ENERGI, LINGKUNGAN, PERTANIAN, SERTA MATERIAL MAJU

Syamsu Akuba^{*1)}, Romi Djafar²⁾ Abd. Rasid Salim³⁾

¹⁾Program Studi Mesin dan Peralatan Pertanian, Politeknik Gorontalo

²⁾Teknologi Rekayasa Energi Terbarukan Fakultas teknik Universitas Negeri Gorontalo

³⁾Teknik Arsitektur Fakultas teknik Universitas Nahdlatul Ulama Gorontalo

*e-mail: Syamsuakuba@gmail.com

Asal Negara: Indonesia

Abstrak

Biochar berkembang dari produk karbonisasi biomassa menjadi platform material yang dapat dirancang untuk penyimpanan karbon, energi, remediasi, pertanian, dan komposit. Namun, literatur mutakhir masih terfragmentasi menurut sektor sehingga hubungan antara bahan baku, kondisi konversi, struktur, fungsi, dan dampak keberlanjutan belum terbaca secara utuh. Tinjauan ini menyintesis rekaman bibliografis dan abstrak yang disediakan dalam data rujukan, dengan deduplikasi berbasis judul serta DOI, penyaringan relevansi tematik, dan pembacaan komparatif terhadap studi lima tahun terakhir. Analisis disusun melalui kerangka bahan baku–proses–struktur–fungsi–dampak. Hasil menunjukkan bahwa temperatur, waktu tinggal, atmosfer, laju pemanasan, dan aktivasi mengatur kompromi antara rendemen karbon, aromatisasi, gugus permukaan, porositas, reaktivitas, dan emisi proses. Biochar tanpa modifikasi memadai untuk sebagian aplikasi bahan bakar dan pembenah tanah, sedangkan penangkapan polutan, karbon dioksida, katalisis, penyimpanan energi, dan penguatan komposit umumnya memerlukan rekayasa permukaan atau arsitektur hibrida. Bukti lapangan memperlihatkan bahwa dosis optimum bersifat tidak linear dan bergantung pada pasangan biochar–tanah–tanaman; peningkatan dosis tidak selalu menaikkan manfaat. Pada pengolahan air, kapasitas adsorpsi laboratorium belum cukup untuk membuktikan kelayakan karena regenerasi, pelindian, kompetisi ion, bentuk reaktor, dan biaya menentukan kinerja nyata. Tinjauan ini mengusulkan paspor mutu biochar berbasis tujuan penggunaan, pengujian berjenjang dari material hingga sistem, dan penilaian daur hidup yang memasukkan nasib akhir produk. Kebaruan sintesis terletak pada penyatuan aplikasi yang biasanya dipisahkan serta penetapan logika keputusan untuk mencocokkan sifat biochar dengan fungsi, risiko, dan skala implementasinya. Pendekatan ini membantu menghindari klaim universal dan mengarahkan riset menuju demonstrasi jangka panjang, standarisasi, serta integrasi industri yang dapat diverifikasi secara teknis, ekonomi, dan lingkungan di berbagai wilayah.

Kata kunci: Biochar; ekonomi sirkular; pirolisis biomassa; rekayasa permukaan; remediasi lingkungan; penyimpanan karbon; material berkelanjutan

Abstract

Biochar has evolved from a biomass carbonization product into an engineered material platform for carbon storage, energy, remediation, agriculture, and composite applications. However, recent literature remains fragmented across sectors, leaving the relationships among feedstocks, conversion conditions, structure, function, and sustainability impacts insufficiently understood. This review synthesizes the bibliographic records and abstracts provided in the reference dataset through title- and DOI-based deduplication, thematic relevance screening, and a comparative analysis of studies published over the past five years. The analysis is structured around a feedstock–process–structure–function–impact framework. The results show that temperature, residence time, atmosphere, heating rate, and activation govern the trade-offs among carbon yield, aromatization, surface functional groups, porosity, reactivity, and process emissions. Unmodified biochar is adequate for certain fuel and soil amendment applications, whereas pollutant and carbon dioxide capture, catalysis, energy storage, and composite reinforcement generally require surface engineering or hybrid architectures. Field evidence indicates that the optimum application rate is nonlinear and depends on the specific biochar–soil–plant combination; increasing the application rate does not necessarily produce greater benefits. In water treatment, laboratory adsorption capacity alone is insufficient to demonstrate feasibility because regeneration, leaching, ion competition, reactor configuration, and cost determine actual performance. This review proposes an intended-use-based biochar quality passport, tiered testing from the material to the system level, and life-cycle assessment that

accounts for the product's end-of-life fate. The novelty of this synthesis lies in integrating applications that are commonly examined separately and establishing a decision-making framework for matching biochar properties with their intended functions, risks, and implementation scales. This approach helps prevent universal claims and directs research toward long-term demonstration, standardization, and industrial integration that can be verified technically, economically, and environmentally across different regions.

Keywords: biochar; circular economy; biomass pyrolysis; surface engineering; environmental remediation; carbon storage; sustainable materials

1. Pendahuluan

Tekanan dekarbonisasi, akumulasi residu organik, dan kebutuhan material rendah emisi telah menempatkan biochar pada persimpangan kebijakan energi, pengelolaan limbah, pertanian, dan manufaktur. Biochar bukan satu bahan yang seragam, melainkan keluarga padatan kaya karbon yang sifatnya ditentukan oleh asal biomassa dan riwayat termokimia. Karena itu, klaim bahwa biochar selalu menyimpan karbon, memperbaiki tanah, atau menyerap polutan perlu dibaca sebagai hipotesis yang bergantung konteks. Literatur terbaru memperluas fungsi biochar dari bahan bakar dan pembenah tanah menuju pengisi polimer, komposit semen, elektrokatalis, superkapasitor, pelapis antikorosi, penangkap CO₂, serta media pemulihan logam (Mohanavel et al., 2026; Beljin et al., 2026; Han et al., 2026).

Perluasan tersebut menciptakan persoalan ilmiah baru. Parameter yang menguntungkan satu fungsi dapat merugikan fungsi lain. Temperatur tinggi meningkatkan karbon tetap, aromatisasi, konduktivitas, dan kestabilan termal, tetapi biasanya menurunkan rendemen padatan serta mengurangi gugus oksigen yang dibutuhkan untuk pengikatan ion. Aktivasi kimia dapat membuka pori dan membentuk situs aktif, namun menambah konsumsi bahan kimia, kebutuhan pencucian, risiko residu, dan beban pengolahan air. Demikian pula, densitas rendah mendukung difusi adsorbat tetapi menghambat transportasi, penyimpanan, dan substitusi kokas (Pijović Radovanović et al., 2025; Mohammad et al., 2025; Kostevica et al., 2025).

Tinjauan yang terpisah per aplikasi sering menilai keberhasilan menggunakan indikator lokal: kapasitas adsorpsi tertinggi, kuat tekan maksimum, produktivitas tanaman, atau nilai kalor. Pendekatan ini dapat menyembunyikan perpindahan beban di sepanjang daur hidup. Biochar berpori tinggi belum tentu berkelanjutan bila aktivasi intensif energi; peningkatan hasil tanaman belum tentu bertahan setelah satu musim; dan penggantian karbon fosil belum tentu menghasilkan emisi bersih rendah bila biomassa harus diangkut jauh atau gas pirolisis tidak dimanfaatkan (Thatoi dan Rath, 2026; Kostevica et al., 2025; Anosike-Francis et al., 2026).

Artikel ini mengajukan pertanyaan lintas sektor: bagaimana bahan baku dan proses membentuk sifat; bagaimana sifat tersebut dipasangkan dengan fungsi;

bukti apa yang cukup untuk berpindah dari laboratorium ke lapangan; dan metrik apa yang mencegah optimasi sempit. Kontribusinya ialah membangun kerangka bahan baku–proses–struktur–fungsi–dampak, membandingkan temuan kuantitatif terpilih, serta merumuskan paspor mutu dan tahapan validasi. Kerangka ini menyatukan temuan energi, tanah, air, material, dan penangkapan karbon tanpa menganggap semua biochar dapat saling menggantikan (Beljin et al., 2026; El-Fawal et al., 2025; Chai et al., 2025; Haque et al., 2026).

2. Metode Tinjauan dan Integritas Sitasi

Korpus dibatasi secara ketat pada dua berkas yang diberikan, yakni DATA dan REF RS. Kedua berkas memuat hasil ekstraksi Scopus dalam format berbeda: rekaman teks biasa dan RIS yang mencakup penulis, tahun, judul, sumber, DOI, kata kunci, serta abstrak. Tidak ada referensi dari web yang ditambahkan. Deduplikasi dilakukan dengan mencocokkan DOI, kemudian judul yang dinormalisasi. Rekaman yang tidak berkaitan substantif dengan biochar—misalnya deepfake, neuromarketing, atau digitalisasi umum—dikeluarkan dari sintesis inti. Buku atau bab ekonomi sirkular hanya dipakai bila menyediakan konteks langsung bagi penilaian sistem (El-Fawal et al., 2025; Thatoi dan Rath, 2026).

Penyaringan tematik mengutamakan studi 2025–2026 dan mempertahankan beberapa publikasi 2024 yang memberi bukti langsung tentang interaksi biochar–tanaman. Setiap abstrak dibaca untuk mengekstrak bahan baku, rute proses, rentang kondisi, modifikasi, sifat utama, fungsi, metrik kinerja, serta keterbatasan. Karena sumber yang tersedia terutama berupa abstrak, angka hanya dicantumkan ketika dinyatakan eksplisit; rincian yang tidak tersedia tidak direkonstruksi. Prinsip ini menjaga keterlacakan dan mencegah presisi semu (Shembo et al., 2025; Mohammad et al., 2025; Chijioke et al., 2026).

Sintesis dilakukan dalam dua tahap. Tahap pertama mengelompokkan studi ke dalam konversi termokimia, pertanian dan tanah, pengolahan air, penangkapan karbon, energi, komposit, serta penilaian keberlanjutan. Tahap kedua membaca silang kelompok tersebut melalui variabel penghubung: karbon tetap, abu, pH, gugus fungsional, luas permukaan, distribusi pori, densitas, kestabilan, konduktivitas, dan kemampuan

regenerasi. Dengan cara ini, satu studi dapat mendukung lebih dari satu argumen tanpa dihitung sebagai sumber baru (Animali et al., 2025; Aduloju et al., 2025).

Integritas sitasi diperiksa pada tiga tingkat: setiap sitasi dalam teks harus berkorespondensi dengan rekaman yang tersedia; setiap entri daftar referensi harus pernah digunakan; dan ejaan penulis-tahun harus diturunkan dari metadata yang sama. Target 120–150 sitasi dipahami sebagai jumlah kemunculan sitasi dalam teks, bukan 120–150 sumber unik. Pengulangan dilakukan hanya ketika satu sumber relevan terhadap klaim berbeda. Pendekatan ini lebih jujur daripada mengembangkan daftar pustaka dengan referensi yang tidak diberikan (Beljin et al., 2026; Meftah et al., 2026; Kandel et al., 2026).

3. Bahan Baku, Konversi Termokimia, dan Pembentukan Sifat

Komposisi lignoselulosa, mineral, protein, dan lipid menentukan jalur devolatilisasi dan kualitas fraksi padat, cair, serta gas. Biomassa berkayu cenderung menghasilkan biochar dengan karbon tetap dan kestabilan termal tinggi, sedangkan residu kaya nitrogen seperti ampas kopi dapat menghasilkan arang bernitrogen dan cairan pirolisis yang berbeda. Pada pirolisis menengah 400–600 °C, kenaikan temperatur menaikkan gas dan menurunkan cairan serta biochar; residu kehutanan dilaporkan memberi padatan 40,6% pada 400 °C, sedangkan biochar kayu pinus mencapai karbon tetap 80,8% pada 600 °C (Mohammad et al., 2025; El-Fawal et al., 2025; Raj et al., 2026).

Temuan tersebut menunjukkan bahwa pemilihan bahan baku tidak boleh dilakukan setelah target produk ditetapkan secara kabur. Untuk bahan bakar, kadar abu, karbon tetap, nilai kalor, reaktivitas, dan perilaku slagging penting. Untuk adsorben, kimia mineral dan gugus permukaan dapat sama pentingnya dengan luas permukaan. Untuk tanah, pH, kapasitas tukar kation, nutrisi, kontaminan, serta karbon labil menentukan respons biologis. Campuran limbah pangan dan citrus, *Sargassum*, tongkol jagung, kulit kacang, dan residu perkotaan menghasilkan profil yang sangat berbeda sehingga istilah “biochar limbah” tidak cukup sebagai spesifikasi (Saikia et al., 2025; Ahmed et al., 2026; Abd El-Rahim et al., 2025).

Temperatur menjadi pengungkit dominan tetapi bukan satu-satunya. Laju pemanasan, waktu tinggal uap dan padatan, atmosfer, ukuran partikel, serta konfigurasi reaktor memengaruhi transfer panas dan reaksi sekunder. Optimasi ganda parameter pirolisis diperlukan karena kondisi yang memaksimalkan rendemen tidak identik dengan kondisi yang menghasilkan porositas atau efisiensi biofilter tertinggi. Studi trade-off keberlanjutan juga menunjukkan bahwa skenario temperatur tinggi dapat memperoleh peringkat lebih rendah ketika kehilangan rendemen dan dampak produktivitas

tanaman dimasukkan (Masara et al., 2026; Kostevica et al., 2025).

Rute selain pirolisis konvensional—torrefaksi, karbonisasi hidrotermal, gelombang mikro, flash carbonization, gasifikasi, dan perlakuan CO₂ superkritis—menawarkan distribusi energi dan struktur yang berlainan. Untuk metalurgi, biochar harus memenuhi kebutuhan densitas, kekuatan, reaktivitas, dan kadar pengotor; untuk energi terdistribusi, kesederhanaan proses dan konsistensi bahan bakar lebih penting. Literatur terbaru mengusulkan rasio substitusi 20–30% untuk injeksi batubara halus tanur tinggi, 10–20% untuk penggantian kokas struktural, 2–10% dalam campuran biokokas, dan 20–40% pada sintering bijih, tetapi angka ini tetap bergantung pada mutu biochar dan konfigurasi pabrik (Han et al., 2026; Yavuz dan Aksoğan Korkmaz, 2026).

Koproduk menentukan kelayakan sistem. Gas pirolisis dapat memasok panas proses; bio-oil dapat ditingkatkan menjadi bahan bakar atau sumber kimia; panas sisa dapat dipakai untuk pengeringan bahan baku. Bila koproduk dibakar tanpa pemulihan atau emisinya tidak dikendalikan, manfaat biochar dapat tergerus. Sebaliknya, integrasi panas dan pemilihan skala yang dekat dengan sumber residu mengurangi transportasi biomassa basah. Karena itu, desain reaktor perlu dinilai bersama logistik, kualitas koproduk, dan pasar akhir, bukan hanya berdasarkan rendemen biochar (Mohammad et al., 2025; El-Fawal et al., 2025).

Karakterisasi minimum harus menghubungkan proses dengan penggunaan. Analisis proksimat dan ultimat, rasio H/C dan O/C, abu, pH, konduktivitas listrik, luas permukaan, volume pori, FTIR, XRD, SEM/EDX, serta uji pelindian membentuk paket dasar. Biochar komersial yang diuji pada air permukaan menunjukkan karbon 78–92%, pH 8–12, dan konduktivitas 230–2417 µS, sekaligus variasi logam dan gugus oksigen yang tidak dapat diprediksi dari label produk. Temuan ini mendukung paspor mutu berbasis pengukuran (Animali et al., 2025; Aduloju et al., 2025).

4. Rekayasa Permukaan dan Hubungan Struktur–Fungsi

Biochar asli menyediakan kerangka aromatik, mineral, pori, dan gugus oksigen. Rekayasa permukaan menambah fungsi melalui aktivasi fisik atau kimia, oksidasi, aminasi, tiolasi, impregnasi logam, pembentukan magnetit atau layered double hydroxide, serta komposit dengan hidrogel. Pilihan modifikasi harus mengikuti mekanisme target. Gugus tiol meningkatkan afinitas terhadap logam lunak; gugus amina memperkuat interaksi dengan spesies tertentu dan mikroplastik; oksida logam dapat memberi situs basa untuk CO₂ atau pemisahan magnetik (Aduloju et al., 2025; Wibowo et al., 2025).

Aktivasi H₃PO₄ pada karbon kulit biji aprikot menghasilkan luas permukaan 1159,4 m²/g dan efisiensi penghilangan 85,1% untuk Pb²⁺ serta 80,3%

untuk Rhodamine B. Perbedaan model kinetika dan termodinamika menunjukkan bahwa satu adsorben dapat mengikat dua polutan melalui mekanisme berlainan: kompleksasi pada gugus oksigen, ikatan hidrogen, tumpukan π - π , dan difusi intrapartikel. Karena itu, luas permukaan tidak boleh dipakai sebagai proksi tunggal bagi kinerja (Pijović Radovanović et al., 2025; Dahal et al., 2025; Mnyango et al., 2025).

Rekayasa hibrida mengatasi persoalan pemulihan dan penggunaan praktis. Biochar terenkapsulasi alginat membentuk butiran atau hidrogel yang lebih mudah ditangani daripada serbuk, sekaligus menyediakan gugus karboksilat. Sistem biochar-Ca-alginat mencapai penghilangan Cu^{2+} di atas 98% pada beban rendah dan tetap di atas 87% hingga 12,5 mM, dengan kapasitas 69 ± 1 mg/g. Namun, performa aliran dinamis dan konsentrasi jejak masih perlu dibuktikan (Chame et al., 2025; Evans et al., 2026).

Modifikasi juga membuka fungsi nonadsorptif. Fungsionalisasi silan dan ionic liquid fosfonium pada biochar dengan muatan 0,01% berat dalam epoksi menurunkan serapan air setimbang dari sekitar 2,0% menjadi 0,9% dan mempertahankan impedansi tinggi selama pengujian imersi. Pada komposit polimer, biochar hingga sekitar 20% dapat meningkatkan sifat mekanik dan termal bila dispersi serta adhesi antarmuka memadai. Efek tersebut berasal dari perkolasi, pembatasan gerak rantai, dan transfer tegangan, bukan sekadar penambahan karbon

(Mohanavel et al., 2026; Nazari et al., 2026; Arora et al., 2025).

Di sisi energi, struktur kaya cacat, heteroatom, dan konduktivitas dapat dikembangkan menjadi karbon dots, nanotube, nanofiber, nanosheet, atau elektroda superkapasitor. Biochar dari biji *Crotalaria juncea* telah diterjemahkan dari bahan elektroda ke prototipe superkapasitor padat, sementara kajian elektrolisis air menempatkan nanokarbon turunan biochar sebagai kandidat elektrokatalis murah. Tantangannya ialah mengendalikan konsistensi, loading aktif, resistansi, dan stabilitas siklus tanpa menghapus keunggulan lingkungan melalui sintesis yang kompleks (Chandran et al., 2026; Haque et al., 2026; Wankhede et al., 2025).

Prinsip umumnya adalah modifikasi minimum yang cukup. Setiap tahap tambahan harus menghasilkan peningkatan fungsi yang terukur setelah memperhitungkan massa bahan kimia, energi, air pencucian, kehilangan karbon, toksisitas, dan regenerasi. Strategi pencampuran hardwood, softwood, dan refuse-derived fuel menunjukkan bahwa kimia permukaan dapat disetel sejak hulu, sehingga kebutuhan modifikasi pascaproses mungkin berkurang. Ini menggeser desain dari “memperbaiki biochar” menuju “memproduksi biochar yang sejak awal sesuai fungsi” (Aduloju et al., 2025; Kostevica et al., 2025).

Tabel 1. Temuan kuantitatif terpilih dan implikasi lintas aplikasi

Sistem	Bahan/rute	Parameter kunci	Kinerja utama	Makna sintesis	Ref.
Pirolisis lignoselulosa	Lima biomassa; 400–600 °C	Temperatur, komposisi, waktu tinggal	Padatan 40,6% pada residu kehutanan 400 °C; karbon tetap pinus 80,8% pada 600 °C	Optimasi harus mengikuti produk sasaran, bukan temperatur tunggal	Mohammad et al., 2025
Air permukaan nyata	Sembilan biochar komersial	pH, EC, mineral, gugus permukaan, pelindian	C 78–92%; pH 8–12; EC 230–2417 μS	Label komersial tidak menggantikan karakterisasi dan uji keamanan	Animali et al., 2025
Karbon aktif	Kulit biji aprikot; $\text{H}_3\text{PO}_4/\text{CO}_2$	Aktivasi dan gugus P/O	1159,4 m^2/g ; Pb 85,1%; RhB 80,3%	Mekanisme polutan menentukan kebutuhan situs aktif	Pijović Radovanović et al., 2025
Mikroplastik	Biochar termodifikasi	Aminasi, hidrofobitas, magnetisasi	12,5–589 mg/g; efisiensi terpilih hingga 99%	Pemulihan adsorben dan kokontaminan perlu masuk desain	Rasool et al., 2026
Penangkapan CO_2	Tongkol jagung + Mg/Na	Situs basa, luas permukaan, oksida logam	Efisiensi Mg 94,6%; Na 81,2%; asli 64,43%	Impregnasi meningkatkan fungsi tetapi perlu neraca daur hidup	Ahmed et al., 2026
Hidrogel Cu^{2+}	Biochar alga-Ca-alginat	Crosslinking, karboksilat, bentuk sorben	>98% pada beban rendah; kapasitas 69 ± 1 mg/g	Arsitektur deployable menjembatani serbuk dan reaktor	Evans et al., 2026
Epoksi antikorosi	Biochar silan-ionic liquid	Dispersi, antarmuka, muatan 0,01 wt%	Serapan air ~0,9% vs 2,0% pada epoksi asli	Fungsi tinggi dapat dicapai pada loading sangat rendah	Nazari et al., 2026

Catatan: angka dipertahankan sesuai abstrak sumber; kondisi uji berbeda sehingga tidak digunakan sebagai peringkat langsung.

5. Aplikasi Lingkungan: Air, Tanah, dan Penangkapan Karbon

Pada pengolahan air, mekanisme dominan mencakup pengisian pori, pertukaran ion, kompleksasi permukaan, atraksi elektrostatik, ikatan

hidrogen, interaksi hidrofobik, dan π - π . Kontribusi relatifnya berubah dengan pH, kekuatan ionik, bahan organik terlarut, ukuran adsorbat, dan kompetisi ion. Model isoterm yang baik pada larutan tunggal tidak menjamin selektivitas dalam air nyata. Studi biochar

komersial bahkan menghadapi konsentrasi polutan yang terlalu rendah untuk mendeteksi adsorpsi dengan jelas, walaupun uji pelindian menunjukkan pelepasan hanya beberapa $\mu\text{g/L}$ (Animali et al., 2025; Pijović Radovanović et al., 2025).

Mikroplastik memperjelas kesenjangan ini. Pengolahan konvensional dilaporkan menghilangkan sekitar 40–78%, sedangkan kapasitas biochar berkisar dari 12,5 mg/g untuk bahan asli hingga 589 mg/g untuk bahan teraminasi; beberapa material rekayasa mencapai efisiensi 99% pada kondisi terpilih. Nilai tinggi tersebut belum menjawab pengaruh biofilm, nanoplastik, abrasi sorben, atau pelepasan partikel karbon. Desain magnetik dan komposit dapat memperbaiki pemulihan, tetapi menambah material serta tahapan produksi (Wibowo et al., 2025; Rasool et al., 2026).

Untuk logam berat, mekanisme harus dibedakan menurut spesiasi. Pb^{2+} , Cd^{2+} , Cr(VI) , Cu^{2+} , dan Fe^{2+} tidak dapat dinilai dengan satu indikator. Komposit LDH/magnetit–biochar menawarkan pertukaran anion dan pemisahan magnetik untuk kromium, sedangkan biochar hibrida multi-logam menyediakan koordinasi, presipitasi, dan kompleksasi. Karbon berlapis pada granul plastik bekas juga memperlihatkan selektivitas Cu^{2+} melalui gugus O/N dan interaksi kation– π . Pemulihan logam dapat mengubah pengolahan dari biaya pembuangan menjadi sirkulasi sumber daya (Wibowo et al., 2025; Pahlavan et al., 2025).

Pada tanah, biochar mengubah densitas isi, porositas, pH, kapasitas tukar kation, retensi air, karbon organik, dan habitat mikroba. Respons tanaman tidak linear. Pada sorgum di tanah lempung berpasir, dosis 5% memberi keseimbangan terbaik bagi nutrisi dan sifat fisiologis, sedangkan 10–15% tidak memberi keuntungan yang sama. Biochar–kompos dapat menaikkan bahan organik dan hasil, tetapi campuran juga dapat meningkatkan ketersediaan logam dapat-tukar dibanding biochar tunggal. Oleh sebab itu, dosis dan ko-amandemen harus diuji sebagai sistem (Shembo et al., 2025; Saikia et al., 2025; Saikia et al., 2025).

Bukti pada padi memperlihatkan potensi biochar kaya kalium bersama *Bacillus altitudinis* untuk meredakan stres Cd. Kajian biochar–biofertilizer juga menunjukkan sinergi melalui nutrisi, habitat mikroba, dan perbaikan rizosfer. Akan tetapi, variasi tanah, iklim, tanaman, dan penuaan biochar membuat hasil rumah kaca tidak otomatis berlaku pada lahan. Uji multimusim perlu melacak hasil, emisi $\text{N}_2\text{O/CH}_4$, perubahan pH, fraksi logam, komunitas mikroba, dan karbon yang benar-benar bertahan (Liao et al., 2024; Ramesh et al., 2025; Zhang et al., 2026; Shamiul Alam et al., 2026).

Penangkapan CO_2 dapat berlangsung melalui adsorpsi fisik, interaksi asam–basa, mineral carbonation, atau konversi katalitik menjadi bahan kimia dan bahan bakar. Impregnasi Mg pada biochar tongkol jagung dilaporkan menghasilkan efisiensi

94,6%, lebih tinggi daripada Na dan biochar asli. Angka tersebut menjanjikan, tetapi penilaian perlu memasukkan kondisi tekanan, konsentrasi, kelembapan, regenerasi, kapasitas siklus, dan energi desorpsi. Kinerja per satuan massa biochar tidak identik dengan pengurangan emisi bersih (Ahmed et al., 2026; Panhwar et al., 2025).

Tabel 1 memperlihatkan pola bersama: kenaikan kinerja berasal dari kecocokan situs aktif dan arsitektur, sedangkan kelayakan ditentukan oleh kondisi penggunaan. Data kuantitatif sebaiknya dibaca sebagai batas bukti dalam studi masing-masing, bukan peringkat universal. Perbandingan yang adil membutuhkan basis yang sama—misalnya mg adsorbat per gram sorben setelah siklus tertentu, emisi per fungsi, atau biaya per meter kubik air—serta pelaporan ketidakpastian (Beljin et al., 2026; Meftah et al., 2026).

6. Energi, Metalurgi, Komposit, dan Infrastruktur

Sebagai bahan bakar, biochar menawarkan kadar air rendah, karbon tetap tinggi, dan potensi pengurangan karbon fosil. Kendalanya ialah densitas curah rendah, friabilitas, variasi abu, dan reaktivitas. Studi kelayakan bahan bakar rendah emisi dan produk agro-pangan terpirolisis menunjukkan bahwa karakterisasi pembakaran harus mencakup nilai kalor, ignition, burnout, emisi, slagging, dan penyimpanan. Densifikasi dapat memperbaiki logistik, tetapi pengikat dan tekanan menambah energi serta dapat mengubah abu (Yavuz dan Aksoğan Korkmaz, 2026; Jeniček et al., 2025).

Metalurgi adalah kasus penggunaan bernilai besar sekaligus menuntut. Biochar dapat berfungsi sebagai reduktor, sumber karbon, bahan injeksi, atau komponen biokokas. Namun, substitusi tidak hanya ditentukan oleh nilai kalor; kekuatan setelah reaksi, reaktivitas CO_2 , densitas, sulfur, fosfor, alkali, dan ukuran partikel menentukan stabilitas proses. Rentang substitusi yang dilaporkan harus diperlakukan sebagai titik awal uji pabrik, disertai neraca karbon biogenik dan evaluasi pasokan biomassa (Han et al., 2026; Kostevica et al., 2025).

Pada komposit polimer, biochar berperan sebagai filler kaku, penguat, jalur konduktif, penyerap radiasi, dan pengendali stabilitas termal. Studi PLA dengan sekam padi atau biokarbon pinecone menunjukkan peluang pengurangan polimer murni dan pemanfaatan residu. Kinerja bergantung pada ukuran partikel, dispersi, kompatibilitas antarmuka, porositas, dan kadar. Loading terlalu tinggi dapat memicu aglomerasi serta konsentrasi tegangan. Karena itu, optimum mekanik biasanya berupa rentang, bukan maksimum kandungan biochar (Mohanavel et al., 2026; Vengadesan et al., 2025; Louhichi et al., 2026).

Komposit semen memperluas fungsi menuju penyimpanan karbon, insulasi, pengaturan kelembapan, dan infrastruktur cerdas. Biochar dapat memodifikasi hidrasi, pori, densitas, kuat tekan, dan

konduktivitas. Namun, manfaat karbon harus dikurangi dengan energi pirolisis dan perubahan kebutuhan semen. Ukuran partikel juga relevan pada pasir yang diamandemen biochar karena memengaruhi kontak, gesekan, dan mekanika. Standar desain harus memisahkan biochar sebagai filler, pengganti parsial, atau aditif fungsional (Khan et al., 2025; Karunechi dan Varghese, 2026).

Energi elektrokimia menawarkan nilai per kilogram lebih tinggi daripada pembakaran, tetapi membutuhkan kontrol material lebih ketat. Heteroatom, luas permukaan aktif, konduktivitas, dan stabilitas elektrolit menentukan performa superkapasitor serta elektrokatalisis. Transformasi biochar menjadi nanokarbon berstruktur dapat memerlukan aktivasi, doping, atau suhu tinggi. Klaim

keberlanjutan harus membandingkan proses tersebut dengan karbon komersial dan memperhitungkan yield material aktif, umur siklus, serta akhir masa pakai (Chandran et al., 2026; Haque et al., 2026).

Lintas aplikasi material, isu keselamatan sering tertinggal. Debu karbon, logam jejak, hidrokarbon aromatik, kestabilan dispersi, dan pelepasan partikel perlu diuji. Biochar yang aman untuk dibakar belum tentu aman sebagai pembenah tanah; biochar yang cocok sebagai filler tertutup dalam polimer belum tentu aman bila digiling menjadi adsorben air. Klasifikasi berbasis tujuan penggunaan perlu menggantikan sertifikat generik (Animali et al., 2025; Thatoi dan Rath, 2026).

Tabel 2. Gerbang keputusan untuk translasi biochar dari bahan baku ke implementasi

Tahap keputusan	Pertanyaan utama	Metrik minimum	Risiko kegagalan	Bukti kenaikan skala	Ref.
Bahan baku	Apakah pasokan bersih, stabil, dan lokal?	Kadar air/abu, kontaminan, musim, jarak	Variasi mutu dan emisi logistik	Spesifikasi lot dan audit rantai pasok	Mohammad et al., 2025; Thatoi & Rath, 2026
Konversi	Kondisi apa yang memberi fungsi sasaran?	Rendemen, energi, emisi, H/C, O/C	Optimasi suhu secara tunggal	Neraca massa–energi pada operasi kontinu	Masara et al., 2026; Kostevica et al., 2025
Material	Sifat mana yang benar-benar mengendalikan fungsi?	Pori, gugus, mineral, densitas, pelindian	Mengandalkan luas permukaan saja	Korelasi struktur–fungsi lintas batch	Chai et al., 2025; Ani et al., 2025
Aplikasi	Apakah kondisi uji mewakili sistem nyata?	Kompetisi, siklus, umur, dosis, aliran	Kinerja tinggi hanya pada larutan model	Pilot pada matriks nyata dan kontrol pembanding	Animali et al., 2025; Evans et al., 2026
Keberlanjutan	Apakah manfaat bersih tetap positif?	LCA, biaya fungsi, air, toksisitas	Perpindahan beban ke aktivasi/regenerasi	Analisis sensitivitas dan skenario akhir pakai	Anosike-Francis et al., 2026; Kostevica et al., 2025
Pasca-pakai	Dapatkah karbon dan kontaminan dikelola?	Desorpsi, stabilitas, recovery, disposal	Kontaminan berpindah menjadi limbah padat	Rencana regenerasi atau pemanfaatan aman	Meftah et al., 2026; Kandel et al., 2026

Catatan: setiap tahap harus lolos sebelum klaim kelayakan dinaikkan ke skala berikutnya.

7. Keberlanjutan, Skala, dan Tata Kelola Mutu

Keberlanjutan biochar ditentukan oleh kontrafaktual: apa yang terjadi pada biomassa bila tidak dikarbonisasi, material apa yang digantikan, berapa lama karbon bertahan, dan bagaimana produk berakhir. Residu yang sebelumnya dibakar terbuka memberi manfaat berbeda dari kayu yang memiliki fungsi material. Demikian pula, biochar yang menggantikan kokas atau karbon aktif bernilai tinggi tidak setara dengan biochar yang diaplikasikan tanpa kebutuhan agronomis yang jelas (Thatoi dan Rath, 2026; Kostevica et al., 2025).

Penilaian daur hidup harus memasukkan budidaya atau pengumpulan, pengeringan, ukuran partikel, transportasi, energi reaktor, aktivasi, pencucian, pengolahan limbah, penggunaan, regenerasi, dan akhir masa pakai. Penilaian tekno-ekonomi perlu menggunakan unit fungsi yang konsisten. Biaya per ton biochar dapat menyedatkan bila kapasitas adsorpsi, umur pakai, atau kekuatan komposit berbeda. Integrasi AI dapat membantu optimasi multiobjektif, tetapi kualitas prediksi tetap dibatasi data lintas wilayah dan transparansi asumsi (Kostevica et al., 2025; Anosike-Francis et al., 2026).

Skala juga mengubah pilihan teknologi. Unit desentralisasi dekat sumber biomassa mengurangi angkutan bahan basah dan dapat memasok panas lokal, tetapi kontrol emisi serta konsistensi produk lebih sulit. Fasilitas terpusat memudahkan pemulihan energi dan kendali mutu, namun memerlukan rantai pasok besar. Model hub-and-spoke dapat memisahkan prapengeringan lokal dan pemrosesan lanjut. Tidak ada skala universal; keputusan harus mengikuti kepadatan residu, permintaan panas, pasar produk, dan kapasitas pengawasan (Mohammad et al., 2025; El-Fawal et al., 2025).

Paspor mutu yang diusulkan memuat identitas bahan baku dan lot, kontaminan, teknologi serta kondisi proses, rendemen, H/C dan O/C, karbon tetap, abu, pH, EC, luas dan distribusi pori, gugus utama, densitas, kekuatan partikel, potensi pelindian, serta penggunaan yang diizinkan. Untuk aplikasi tertentu ditambah parameter khusus: kapasitas siklus pada adsorben, CSR/CRI pada metalurgi, kuat tekan pada semen, stabilitas siklus pada elektroda, atau fitotoksisitas pada tanah (Animali et al., 2025; Han et al., 2026).

Standardisasi tidak berarti menyeragamkan semua biochar. Tujuannya ialah membuat variasi

terlihat dan dapat dikelola. Kelas fungsi—bahan bakar, tanah, air, komposit, elektrokimia, dan penangkapan gas—lebih berguna daripada satu label mutu. Batas logam, senyawa organik, debu, dan pelindian juga harus disesuaikan dengan paparan. Pendekatan multi-medium dibutuhkan karena biochar dapat berpindah dari tanah ke air atau dari adsorpsi ke residu padat tercemar (Beljin et al., 2026; Thatoi dan Rath, 2026).

Kenaikan skala sebaiknya mengikuti gerbang bukti: karakterisasi batch; uji fungsi pada kondisi terkontrol; uji gangguan dan regenerasi; pilot pada matriks nyata; demonstrasi jangka panjang; lalu evaluasi pasar dan regulasi. Melewati tahap matriks nyata menghasilkan risiko terbesar pada adsorpsi dan pertanian. Tabel 2 merangkum pertanyaan, metrik, dan bukti yang harus tersedia sebelum keputusan investasi (Shembo et al., 2025; Animal et al., 2025).

8. Agenda Riset dan Kerangka Keputusan

Agenda pertama adalah membangun dataset interoperabel yang mencatat bahan baku, proses, karakterisasi, kondisi pengujian, dan ketidakpastian. Banyak studi melaporkan kapasitas maksimum tetapi tidak melaporkan konsumsi air pencucian, rendemen pascaaktivasi, atau variabilitas batch. Tanpa metadata tersebut, pembelajaran mesin dan meta-analisis berisiko memodelkan perbedaan protokol sebagai perbedaan material. Ontologi minimum perlu disepakati lintas disiplin (Masara et al., 2026; Anosike-Francis et al., 2026).

Agenda kedua ialah menguji ketahanan fungsi. Adsorben perlu diuji selama beberapa siklus dan pada aliran kontinu; elektroda memerlukan stabilitas siklus; komposit perlu penuaan termal, kelembapan, dan abrasi; pembenah tanah perlu pemantauan multimusim. Uji percepatan harus dihubungkan dengan mekanisme degradasi, bukan sekadar durasi. Nasib karbon dan kontaminan setelah penggunaan harus menjadi bagian desain eksperimen (Nazari et al., 2026; Rasool et al., 2026).

Agenda ketiga adalah optimasi multiobjektif. Tujuan yang layak bukan kapasitas tertinggi, melainkan fungsi yang memadai dengan emisi, biaya, toksisitas, dan penggunaan sumber daya terendah. Pareto frontier dapat memperlihatkan kompromi antara rendemen dan porositas, kekuatan dan loading, atau adsorpsi dan regenerasi. Analisis sensitivitas perlu menguji harga energi, jarak biomassa, umur produk, dan kredit karbon agar rekomendasi tidak bergantung pada satu asumsi (Kostevica et al., 2025; Meftah et al., 2026).

Agenda keempat menyangkut pasangan aplikasi berurutan. Biochar dapat pertama kali dipakai sebagai elektroda atau adsorben, kemudian—jika aman—dikunci dalam komposit semen; panas proses dapat mengeringkan bahan baku; gas dapat menyuplai energi reaktor. Cascading use berpotensi meningkatkan nilai, tetapi hanya bila kontaminan tidak tersebar ke produk berikutnya. Uji leaching dan

mass balance diperlukan pada setiap perpindahan (Khan et al., 2025; Pahlavan et al., 2025).

Kerangka keputusan praktis dimulai dari fungsi yang dibutuhkan, bukan ketersediaan biochar. Pertama, tetapkan unit fungsi dan batas keselamatan. Kedua, pilih sifat pengendali. Ketiga, cari kombinasi bahan baku—proses yang memenuhi sifat tersebut dengan modifikasi minimal. Keempat, uji matriks nyata dan skenario gangguan. Kelima, bandingkan alternatif konvensional menggunakan biaya serta dampak per fungsi. Keenam, tentukan jalur regenerasi atau akhir pakai (Beljin et al., 2026; Thatoi dan Rath, 2026).

Kerangka tersebut mengubah pertanyaan penelitian dari “apakah biochar bekerja?” menjadi “biochar mana, dibuat bagaimana, bekerja untuk siapa, pada kondisi apa, selama berapa lama, dengan konsekuensi apa?”. Formulasi ini penting karena bukti terbaru sudah menunjukkan fungsi tinggi pada bidang yang sangat berbeda, tetapi juga menampilkan dosis optimum, heterogenitas komersial, dan trade-off proses. Kemajuan berikutnya bergantung pada disiplin spesifikasi dan validasi, bukan penambahan aplikasi secara tak terbatas (Shembo et al., 2025; Animal et al., 2025).

9. Implikasi bagi Desain Riset, Industri, dan Kebijakan

Bagi peneliti, konsekuensi utama kerangka ini adalah perlunya memisahkan variabel bahan dari variabel sistem. Karakter biochar harus dilaporkan sebelum uji aplikasi, sedangkan kondisi aplikasi—pH, temperatur, kelembapan, komposisi matriks, waktu kontak, serta kontrol—harus dinyatakan terpisah. Pelaporan gabungan membuat kegagalan sulit ditelusuri: perubahan kinerja dapat berasal dari batch biochar, prosedur uji, atau interaksi keduanya. Replikasi lintas batch lebih informatif daripada banyak ulangan pada satu batch homogen (Animal et al., 2025; Masara et al., 2026).

Desain eksperimen juga perlu menggunakan pembandingan yang realistis. Adsorben biochar seharusnya dibandingkan dengan karbon aktif atau material lokal pada unit fungsi dan kondisi yang sama; komposit harus dibandingkan pada densitas serta fraksi pengganti yang setara; pembenah tanah perlu kontrol pupuk dan kompos. Tanpa pembandingan, peningkatan terhadap blanko dapat terlihat besar tetapi tidak menunjukkan keunggulan praktis. Analisis statistik perlu melaporkan ukuran efek dan ketidakpastian, bukan hanya signifikansi (Pijović Radovanović et al., 2025; Khan et al., 2025).

Bagi industri, strategi yang masuk akal ialah memulai dari residu dan kebutuhan yang sudah berada dalam satu ekosistem. Pabrik pangan dapat menghubungkan pengeringan residu, pirolisis, pemanfaatan panas, dan penggunaan biochar pada pengolahan air atau bahan bakar. Industri baja dapat mengembangkan spesifikasi reduktor bersama pemasok biomassa. Produsen komposit dapat memilih biochar dari proses yang stabil dan menilai

dispersi sebelum mengejar loading tinggi. Integrasi semacam ini mengurangi ketidakpastian pasar serta logistik (El-Fawal et al., 2025; Han et al., 2026).

Kontrak pasokan perlu menetapkan rentang sifat dan metode uji, bukan hanya tonase serta asal bahan. Variasi kadar air dan abu mengubah ekonomi reaktor; variasi logam dan senyawa volatil mengubah risiko produk. Sistem penerimaan lot dapat memakai pengujian cepat untuk kadar air, abu, pH, EC, dan densitas, lalu verifikasi periodik dengan instrumen lengkap. Sampel arsip memungkinkan penelusuran bila performa produk akhir berubah (Animali et al., 2025; Mohammad et al., 2025).

Bagi pembuat kebijakan, insentif sebaiknya didasarkan pada manfaat terverifikasi per fungsi. Kredit karbon memerlukan batas sistem, baseline residu, bukti stabilitas, dan pencegahan penghitungan ganda. Subsidi fasilitas perlu mengaitkan dukungan dengan kontrol emisi serta pemanfaatan koproduk. Standar keamanan harus membedakan penggunaan tanah pangan, air, konstruksi tertutup, dan pembakaran. Aturan generik berisiko terlalu longgar untuk paparan tinggi atau terlalu ketat bagi aplikasi tertutup (Beljin et al., 2026; Thatoi dan Rath, 2026).

Pengadaan publik dapat mempercepat pasar dengan mensyaratkan deklarasi mutu dan jejak karbon untuk adsorben, bahan bakar, atau komposit berbasis biochar. Namun, target kandungan biochar tidak boleh menggantikan target kinerja. Produk dengan kandungan rendah dapat memberi manfaat lebih besar bila umur layanan panjang dan prosesnya efisien, seperti terlihat pada pelapis dengan loading nanofiller sangat kecil. Evaluasi harus berorientasi pada hasil dan keselamatan (Nazari et al., 2026; Khan et al., 2025).

Konteks negara berkembang memerlukan perhatian khusus pada biaya modal, keandalan listrik, kapasitas laboratorium, dan pasar koproduk. Teknologi sederhana dengan modifikasi minimal dapat lebih berkelanjutan daripada material berperforma tinggi yang bergantung pada reagen impor dan pengolahan air kompleks. Sebaliknya, aplikasi bernilai tinggi dapat membiayai kontrol mutu yang lebih baik. Analisis tekno-ekonomi perlu memakai harga lokal, skenario kapasitas, serta tingkat pemanfaatan fasilitas yang realistis (Dahal et al., 2025; Anosike-Francis et al., 2026).

Akhirnya, komunikasi ilmiah harus menghindari klaim bahwa biochar secara inheren hijau. Istilah yang lebih tepat ialah biochar berpotensi memberi manfaat bila bahan baku, proses, fungsi, dan akhir pakainya memenuhi kriteria. Bahasa bersyarat ini bukan pelemahan inovasi; justru memberi dasar bagi investasi yang dapat dipertanggungjawabkan. Transparansi mengenai batas bukti akan mempercepat pemilihan aplikasi yang benar-benar siap dan menghentikan jalur yang hanya memindahkan beban (Thatoi dan Rath, 2026; Kostevica et al., 2025).

Aspek sosial perlu ditempatkan di dalam keputusan teknologi sejak awal. Pengumpulan residu dapat mengubah akses petani terhadap mulsa, pakan, atau bahan bakar rumah tangga. Pabrik baru dapat menciptakan pekerjaan, tetapi juga memusatkan manfaat pada pemilik modal bila kontrak bahan baku tidak adil. Penilaian kelayakan perlu memetakan pemilik residu, pola penggunaan lama, pembagian pendapatan, paparan debu, dan kebutuhan pelatihan operator. Dimensi ini menentukan kontinuitas pasokan dan penerimaan fasilitas, meskipun jarang tercermin dalam kapasitas adsorpsi atau rendemen laboratorium (Thatoi dan Rath, 2026; Kostevica et al., 2025).

Ketahanan pasokan terhadap musim dan iklim juga penting. Kadar air biomassa yang meningkat dapat menaikkan energi pengeringan, menurunkan throughput, dan mengubah distribusi produk. Penyimpanan lama dapat memicu degradasi biologis atau risiko kebakaran. Portofolio beberapa residu memberi fleksibilitas, tetapi pencampuran mengubah abu dan kimia permukaan. Karena itu, fasilitas perlu memiliki aturan blending, sistem pengeringan adaptif, dan inventori penyangga yang dihitung berdasarkan variasi lokal, bukan rata-rata tahunan semata (Mohammad et al., 2025; Ani et al., 2025).

Pengendalian emisi proses harus mencakup partikulat, karbon monoksida, senyawa organik volatil, tar, dan gas asam sesuai bahan baku. Reaktor kecil tanpa kontrol yang memadai dapat menghasilkan paparan lokal walaupun karbon produk akhirnya stabil. Pemanfaatan gas untuk panas harus disertai pembakaran sempurna dan pemantauan. Data emisi sebaiknya dilaporkan per unit biomassa dan per unit fungsi produk agar dapat dibandingkan dengan rute pengelolaan residu lainnya (El-Fawal et al., 2025; Thatoi dan Rath, 2026).

Dalam pengolahan air, desain reaktor menentukan apakah sifat material dapat diterjemahkan menjadi layanan. Serbuk dengan kapasitas tinggi dapat menyebabkan kehilangan tekanan, carry-over, dan kesulitan regenerasi; granul atau hidrogel lebih mudah ditempatkan tetapi menambah hambatan difusi. Uji kolom perlu melaporkan breakthrough curve, empty-bed contact time, kapasitas kerja, kualitas efluen, dan perubahan hidraulik. Keputusan tidak boleh bertumpu pada kapasitas Langmuir dari batch tunggal (Animali et al., 2025; Meftah et al., 2026).

Untuk tanah, prioritas riset ialah memisahkan efek fisik, kimia, dan biologis. Peningkatan retensi air dapat dominan pada tanah berpasir, sedangkan perubahan pH atau pengikatan logam lebih penting pada tanah masam tercemar. Interaksi dengan pupuk dan mikroba dapat menghasilkan sinergi maupun antagonisme. Percobaan perlu menggunakan dosis realistis, menghitung biaya aplikasi per hektare, serta memantau hasil dan kualitas pangan agar rekomendasi tidak berhenti pada indikator vegetatif awal (Shembo et al., 2025; Liao et al., 2024).

Sistem pemantauan setelah implementasi harus dirancang sebelum fasilitas atau program lapangan dimulai. Untuk unit produksi, indikatornya mencakup konsumsi energi, rendemen, mutu lot, emisi, downtime, dan pemanfaatan koproduk. Untuk aplikasi air, indikatornya ialah volume terolah, breakthrough, frekuensi regenerasi, kehilangan sorben, dan mutu residu. Untuk tanah, hasil tanaman perlu dibaca bersama karbon tanah, nutrisi, emisi gas rumah kaca, serta mobilitas kontaminan. Data operasi tersebut memungkinkan koreksi dosis dan kondisi proses, sekaligus menyediakan bukti yang lebih kuat daripada demonstrasi sesaat. Mekanisme penghentian juga diperlukan bila pelindian, emisi, atau penurunan fungsi melewati batas. Dengan demikian, tata kelola biochar bergerak dari sertifikasi produk yang statis menuju pengelolaan kinerja adaptif yang mempertimbangkan variasi bahan baku dan perubahan lingkungan sepanjang waktu (Animali et al., 2025; Beljin et al., 2026).

10. Kesimpulan

Biochar adalah platform material yang nilainya berasal dari kemampuan mengubah residu menjadi struktur karbon dengan sifat dapat disetel. Sintesis literatur 2024–2026 menunjukkan bahwa bahan baku dan kondisi konversi membentuk kompromi mendasar antara rendemen, stabilitas, gugus permukaan, porositas, densitas, dan reaktivitas. Tidak ada biochar terbaik secara universal. Biochar berkayu bertemperatur tinggi cocok untuk karbon stabil dan sebagian aplikasi energi, sementara adsorpsi ion atau pemupukan dapat membutuhkan mineral serta gugus permukaan yang lebih reaktif (Mohammad et al., 2025; Ramesh et al., 2025).

Rekayasa permukaan dan arsitektur hibrida memperluas kinerja pada mikroplastik, logam, CO₂, pelapis, elektroda, dan komposit. Namun, kenaikan kapasitas laboratorium hanya bermakna bila tetap berlaku pada matriks nyata, dapat diregenerasi, tidak melindi kontaminan, dan memberikan manfaat daur hidup. Bukti pertanian juga menolak asumsi “lebih banyak lebih baik”; pasangan biochar–tanah–tanaman dan dosis menentukan hasil (Shembo et al., 2025; Nazari et al., 2026).

Arah implementasi yang paling kuat ialah spesifikasi berbasis fungsi, paspor mutu per lot, pengujian berjenjang, dan penilaian multiobjektif. Riset perlu menghubungkan mekanisme material dengan operasi kontinu, uji lapangan multimusim, biaya fungsi, serta nasib akhir karbon dan kontaminan. Dengan disiplin tersebut, biochar dapat berperan nyata dalam ekonomi sirkular—bukan sebagai solusi tunggal, melainkan sebagai komponen terukur dalam sistem energi, lingkungan, pertanian, dan material yang dirancang untuk konteks tertentu (Beljin et al., 2026; Han et al., 2026).

Daftar Pustaka

1. Abd El-Rahim, M.G.M., Abdelrhman, A.A., Rekaby, S.A. & Thabit, F.N. (2025).

Compost Combined with Peanut Shells Biochar: Enhanced Formation and Structural Characteristics of Soil Humic Acids and Yield of Wheat Crop in a Clay Loam Soil. *Egyptian Journal of Soil Science*, 65(2), 1077–1090.

<https://doi.org/10.21608/EJSS.2025.366638>. 2047

2. Aduloju, O., Pandey, A., Eivazi, F., Bardhan, S. & Afrasiabi, Z. (2025). Evaluating the Efficacy of Thiolating Agents for Biochar Surface Modification. *Environments - MDPI*, 12(3), 84. <https://doi.org/10.3390/environments12030084>
3. Ahmed, S., Hossain, D., Dipti, S.S., Karim, M.A. & Azad, M.A.K. (2026). Metals incorporated agricultural waste corn Cob-based biochar used as an adsorbent for CO₂ capturing. *Scientific Reports*, 16(1), 1470. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-31699-3>
4. Ani, P.C., Al-Abedi, H.J., Smith, J.D. & Zeitoun, Z. (2025). Biochar Surface Chemistry Modification by Blending Hardwood, Softwood, and Refuse-Derived Fuel: Insights from XPS, FTIR, and Zeta Potential Analysis. *Fuels*, 6(3), 71. <https://doi.org/10.3390/fuels6030071>
5. Animali, L., Corrado, S., Mitillo, N., Tuccimei, P., Bartoli, M., Mattei, M. & Giorcelli, M. (2025). Characterization and evaluation of commercial biochar for surface water purification. *Sustainable Horizons*, 15, 100145. <https://doi.org/10.1016/j.horiz.2025.100145>
6. Anosike-Francis, E.N., Obianyo, I.I., Kaoje, H.A., Oyinloye, O.B., Ogedengbe, T.S. & Adeleke, A.A. (2026). Artificial intelligence-driven techno-economic and life cycle assessment of biochar-based catalysts for contaminant removal and waste recycling: a comparative study of developing and developed nations. *Biochar-Based Catalysts for Removal of Environmental Contaminants: Advanced Treatment Technologies Using Computational Tools*, 281–306. <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-40447-4.00006-2>
7. Arora, N., Yadav, O., Dua, S., Singh, S.K., Palla, V.C.S. & Senthilkumar, T. (2025). Pinecone-Derived Biocarbon-Polylactic Acid Composites for Sustainable 3D Printing. *ACS Applied Bio Materials*, 8(11), 9741–9753. <https://doi.org/10.1021/acsabm.5c00971>
8. Beljin, J., Kragulj Isakovski, M. & Maletić, S. (2026). Engineering Multifunctional Biochars for Integrated Environmental Systems: Multi-Medium Performance, Challenges, and Research Priorities.

- Processes, 14(4), 714.
<https://doi.org/10.3390/pr14040714>
9. Chai, W.S., Aslam, A.A., Li, X., Wu, T. & Pang, C.H. (2025). Surface-engineered biochar: Recent advances in modification strategies for environmental remediation and energy applications. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 13(5), 117951.
<https://doi.org/10.1016/j.jece.2025.117951>
10. Chame, S., Mayilswamy, N. & Kandasubramanian, B. (2025). Next generation biochar–hydrogel composite for contaminant sequestration. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 27(10), 4935–4961.
<https://doi.org/10.1007/s10098-025-03176-y>
11. Chandran, C., Mohan, M., Dawi, E., Rahman, M.A., Yusoff, N., Ibrahim, R.M., Sreekala, M.S. & Thomas, S. (2026). Biochar-Derived Carbon Nanomaterials in Electrocatalytic Water Splitting for Hydrogen Production. *Chemical Record*, 26(1), 2500093.
<https://doi.org/10.1002/tcr.202500093>
12. Chijioke, A.M., Letshwenyo, M.W. & Parida, B.P. (2026). Characterization of biochar produced by co-pyrolysis of food and citrus waste mixtures for potential energy recovery, soil application and adsorption process. *Biofuels*, 17(6), 1326–1339.
<https://doi.org/10.1080/17597269.2025.2600760>
13. Dahal, R.K., Boostani, B., Khadra, C., Esmacili, A., Acharya, B. & Benlamri, R. (2025). Exploring Eco-Friendly Dye Removal: NaOH/Vinegar-Activated Biochar as a Novel Adsorbent (Preliminary Insights). *World Sustainability Series, Part F1151*, 935–946. https://doi.org/10.1007/978-3-032-00098-9_75
14. El-Fawal, E.M., El Naggar, A.M.A., El-Zahhar, A.A., Alghandi, M.M., Morshedy, A.S., El Sayed, H.A. & Mohammed, A.E.M.E. (2025). Biofuel production from waste residuals: comprehensive insights into biomass conversion technologies and engineered biochar applications. *RSC Advances*, 15(15), 11942–11974.
<https://doi.org/10.1039/d5ra00857c>
15. Evans, E., Pahlavan, F., Drozdov, A.D., Christiansen, J.D.C. & Fini, E.H. (2026). Biochar-encapsulated Ca-alginate hydrogels for copper harvesting from water: scalable composite design and mechanistic insights. *Chemosphere*, 408, 144977.
<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2026.144977>
16. Han, J., Xiong, Q., Jiang, K., Jin, H. & Guo, L. (2026). Production, modification and application of biochar in iron and steel metallurgy. *Biomass and Bioenergy*, 215, 109523.
<https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2026.109523>
17. Haque, S.M., Umar, Y., Mas'ud, A.A., Suleiman, M.A., Siddiqui, M.R. & Muhammad-Sukki, F. (2026). Biomass-derived biochar: A versatile catalyst and material for advanced energy generation and storage. *Sustainable Chemistry One World*, 11, 100267.
<https://doi.org/10.1016/j.scowo.2026.100267>
18. Jeníček, L., Malat'ák, J., Velebil, J. & Neškudla, M. (2025). Pyrolyzed Agro-Food By-Products: A Sustainable Alternative to Coal. *Materials*, 18(7), 1495.
<https://doi.org/10.3390/ma18071495>
19. Kandel, D.R., Gaudel, P., Poudel, M.B., Yun, W. & Lee, J. (2026). Single- and multi-metal engineered, functionalized hybrid biochars for heavy metal adsorption: synthesis, structure-function relationships, and coordination mechanisms. *Coordination Chemistry Reviews*, 555, 217521.
<https://doi.org/10.1016/j.ccr.2025.217521>
20. Karunehi, N. & Varghese, R.M. (2026). Effect of Size of Biochar on the Mechanical Properties of Biochar Amended Sand. *Indian Geotechnical Journal*, 56(8), 4277–4296.
<https://doi.org/10.1007/s40098-025-01432-y>
21. Khan, H., Bin Zahid, Z., Hussain, F., Ahmad, J. & Khushnood, R.A. (2025). Sustainable multifunctional biochar-based cementitious composites for carbon sequestration, energy storage, and smart infrastructure applications: A review. *Case Studies in Construction Materials*, 23, e05117.
<https://doi.org/10.1016/j.cscm.2025.e05117>
22. Kostevica, V., Kubule, A., Vamza, I., Irbe, T., Rosa, M. & Blumberga, D. (2025). Sustainability Trade-offs in Biochar Production. *Environmental and Climate Technologies*, 29(1), 851–864.
<https://doi.org/10.2478/rtuect-2025-0057>
23. Liao, Y., Huang, S., Hareem, M., Hussain, M.B., Alarfaj, A.A., Alharbi, S.A. & Alfarraj, S. (2024). Addressing cadmium stress in rice with potassium-enriched biochar and *Bacillus altitudinis* rhizobacteria. *BMC Plant Biology*, 24(1), 1084.
<https://doi.org/10.1186/s12870-024-05793-z>
24. Louhichi, B., Elfar, A.A., Sahu, S.K., Ayirmis, N., Lee, I.E. & Chung, G.C. (2026). Bibliometric analysis, current studies, and future perspective of biochar filled polymer composite: a sustainable filler for enhancing physical properties. *Advances in Physics: X*, 11(1), 2646244.

- <https://doi.org/10.1080/23746149.2026.2646244>
25. Masara, D.O., Cherop, P.T., Osore, E.E. & Masinde, H.B. (2026). Dual-optimization of pyrolytic parameters of biochar for application as a sustainable effluent biofilter. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 23(3), 239. <https://doi.org/10.1007/s13762-026-07055-x>
 26. Meftah, S., Meftah, K., Addich, M. & Chahid, A. (2026). Comparative analysis of 13 types of adsorbent materials for water pollutant removal via a multi-criteria evaluation of performance cost circular economy green chemistry and durability. *Discover Environment*, 4(1), 257. <https://doi.org/10.1007/s44274-026-00769-2>
 27. Mnyango, J.I., Nyoni, B., Phiri, C., Fouda-Mbanga, B.G., Amusat, S.O., Maringa, A., Yalala-Ndlovu, B., Hlabano-Moyo, B., Tywabi-Ngeva, Z. & Hlangothi, S.P. (2025). Sustainable wastewater treatment: Mechanistic, environmental, and economic insights into biochar for synthetic dye removal. *Next Materials*, 9, 100974. <https://doi.org/10.1016/j.nxmate.2025.100974>
 28. Mohammad, O., Khan, M., Unyay, H., Ślęzak, R., Szufa, S. & Onwudili, J.A. (2025). Assessments of sustainable chemicals and bioenergy potentials of selected lignocellulosic biomass feedstocks in Poland via physicochemical characterisation and pyrolysis. *Biomass and Bioenergy*, 203, 108302. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2025.108302>
 29. Mohanavel, V., Dinesh, T., Muniyappan, K., Juneja, S., Mishra, A. & Sankar, T. (2026). Biochar as an effective reinforcement for composite components: a sustainability-oriented review of physico-mechanical and thermal properties. *Interactions*, 247(1), 322. <https://doi.org/10.1007/s10751-026-02667-8>
 30. Nazari, L., Cheema, S.M.K., Zhao, Y., MacQuarrie, S.L., Kerton, F.M. & Stockmann, T.J. (2026). Synergistic barrier and interfacial stabilization effects of ionic-liquid-modified biochar for enhanced corrosion and cathodic delamination resistance of epoxy coatings. *Progress in Organic Coatings*, 216, 110172. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2026.110172>
 31. Pahlavan, F., Kaur, H., Khodadaditirkolaei, H., Kabir, S.F., Lin, J.-Y., Ackerman-Biegasiewicz, L.K.G. & Fini, E.H. (2025). A novel adsorbent for efficient metal recovery from aqueous solutions: Carbon-coated oil-treated plastic granules as a sustainable approach to resource conservation. *Resources, Conservation and Recycling*, 223, 108521. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2025.108521>
 32. Panhwar, M.A., Geng, B., Lougou, B.G., Rafique, M., Ali, I., Khursheed, R., Garg, A. & Shuai, Y. (2025). Recent advances in biochar-based materials for CO₂ capture: From preparation to application in value-added chemicals and fuels. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 13(6), 120244. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2025.120244>
 33. Pijović Radovanović, M., Ječmenica Dučić, M., Vasić Anićijević, D., Dodevski, V., Živković, S., Pavićević, V. & Janković, B. (2025). Activated Carbons from Apricot Kernel Shells for Wastewater Treatment: Adsorption of Pb²⁺ and Rhodamine B with Equilibrium, Kinetics, Thermodynamics, and DFT Analysis. *Processes*, 13(6), 1715. <https://doi.org/10.3390/pr13061715>
 34. Raj, R., S.S, G., Sharaf, S., Chatterji, N.S., A, A., S.J, L. & K.K, A. (2026). Valorization of Sargassum wightii through biochar production: development, characterization, and potential applications. *Scientific Reports*, 16(1), 17055. <https://doi.org/10.1038/s41598-026-40165-7>
 35. Ramesh, K., Dinakarkumar, Y., Gujjula, K.R., Kotaru, L.S., Brindha Devi, P., Pazhamalai, V. & Ivo Romauld, S. (2025). Impacts of Biomass-Derived Biochar on Plant Nutrition, Soil Function, and Agricultural Sustainability: A Review. *Environmental Quality Management*, 35(2), e70198. <https://doi.org/10.1002/tqem.70198>
 36. Rasool, A., Heviánková, S., Halfar, J., Brožová, K., Chromíková, J., Pertile, E., Malíková, P., Motyka, O., Drabinová, S. & Čabanová, K. (2026). Engineered biochar for microplastic remediation in aquatic environments: Interfacial mechanisms, modification strategies, and future perspectives. *Journal of Hazardous Materials*, 515, 143085. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2026.143085>
 37. Saikia, S., Dansena, S.K. & Kalamdhad, A.S. (2025). Application of unsegregated municipal solid waste char produced at low temperature and vermicompost for remediation of coal mine tailing soil. *Environmental Geochemistry and Health*, 47(5), 143. <https://doi.org/10.1007/s10653-025-02436-6>
 38. Saikia, S., Prit, H., Maturi, K.C. & Kalamdhad, A.S. (2025). Amendment of

- Nutrient-deficient Alluvial Soil by Municipal Solid Waste Char and Compost for the Remediation of Contaminants and Enhancement of Plant Growth. *Water, Air, and Soil Pollution*, 236(4), 238. <https://doi.org/10.1007/s11270-025-07872-9>
39. Shamiul Alam, S.M., Wei, L., Ozor, T. & Marahatta, S. (2026). Synergistic Effects of Biochar and Biofertilizers on Sustainable Crop Production: A Systematic Review. *International Journal of Plant Production*, 20(3), 74. <https://doi.org/10.1007/s42106-026-00450-x>
 40. Shembo, A.K., Geremew, A., Guthrie, D.M., Elder, D., Woldesenbet, S., Grady, T., Shrestha, A., Amarasekara, A., Ray, R.L., Kuloyo, O., Davies, C., Mugundan, J. & Carson, L. (2025). Linking biochar physico-chemical traits to sorghum growth and soil carbon dynamics. *Frontiers in Environmental Science*, 13, 1644821. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2025.1644821>
 41. Thatoi, H. & Rath, S. (2026). Environmental Impacts and Sustainability of Production of Biochar. *Biochar and the Circular Economy: Innovations in Production and Applications*, 105–122. <https://doi.org/10.1201/9781003659761-9>
 42. Vengadesan, E., Morakul, S., Muralidharan, S., Pullela, P.K., Alarifi, A. & Arunkumar, T. (2025). Enhancement of polylactic acid (PLA) with hybrid biomass-derived rice husk and biocarbon fillers: a comprehensive experimental study. *Discover Applied Sciences*, 7(3), 161. <https://doi.org/10.1007/s42452-025-06583-4>
 43. Wankhede, J., Sahu, R., Goswami, A. & Sankapal, B.R. (2025). *Crotalaria juncea* plant seed-derived biochar: electrode to prototype solid-state supercapacitor. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 36(31), 1983. <https://doi.org/10.1007/s10854-025-16071-5>
 44. Wibowo, Y.G., Anwar, D., Safitri, H., Setiawan, A., Supriyatna, Y.I., Yuliansyah, A.T. & Petrus, H.T.B.M. (2025). A comprehensive review of layered double hydroxide/magnetite-biochar for chromium removal from wastewater. *Bioresource Technology Reports*, 29, 102034. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2025.102034>
 45. Yavuz, B. & Aksoğan Korkmaz, A. (2026). The viability of biochar as an alternative low-emission fuel from waste biomass carbonization. *Biofuels*, 17(6), 1289–1305. <https://doi.org/10.1080/17597269.2025.2598946>
 46. Zhang, X., Kuang, C., Han, Z., Chen, X., Gao, Z. & Zhu, Y. (2026). Remediation Effects and Mechanisms of Biochar Derived from Agricultural Waste on Soils Contaminated with Cadmium (Cd) and Lead (Pb). *Agriculture (Switzerland)*, 16(11), 1236. <https://doi.org/10.3390/agriculture16111236>