

REKAYASA BIOCHAR LIMBAH BIOMASSA BERBASIS STRUKTUR–FUNGSI UNTUK REMEDIASI, KATALISIS, DAN SISTEM ENERGI BERKELANJUTAN

Romi Djafar^{*1)}, Yunita Djamalu²⁾, Syaiful Umela³⁾

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

³⁾Teknik Mesin Fakultas Saintek Universitas Negeri Gorontalo

*e-mail: romidjafarmesin@gmail.com

Asal Negara: Indonesia

ABSTRAK

Biochar dan karbon berpori berbasis limbah biomassa telah berkembang dari material karbon sederhana menjadi platform rekayasa multifungsi untuk remediasi lingkungan, katalisis, penyimpanan energi, dan produksi bahan bakar rendah karbon. Tinjauan ini menyintesis 50 publikasi periode 2021–2026 dengan penekanan pada bukti terbaru mengenai hubungan antara bahan baku, jalur konversi, arsitektur pori, kimia permukaan, perpindahan massa, dan kinerja aplikasi. Literatur menunjukkan bahwa suhu pirolisis tidak dapat diperlakukan sebagai variabel tunggal yang menentukan mutu. Kinerja muncul dari interaksi struktur hierarkis, gugus aktif, fase mineral, heteroatom, dan kestabilan mekanik. Micro-computed tomography tiga dimensi memperluas analisis konvensional dengan memvisualisasikan evolusi pori dan dinamika adsorpsi secara spasial-temporal; pada adsorpsi Cu(II), mesopori mengatur akses dan difusi intrapartikel, sedangkan kimia permukaan menentukan kapasitas akhir. Modifikasi biologis, magnetisasi, sulfidasi, dan pemuatan logam bimetalik meningkatkan selektivitas atau aktivitas, tetapi juga membawa risiko pelindian, pasivasi, dan beban produksi. Pada sistem energi, karbon biomassa berfungsi sebagai bahan bakar padat, elektroda, katalis, dan aditif digesti anaerob; manfaatnya bergantung pada densifikasi, konduktivitas, dosis, dan integrasi proses. Tinjauan ini mengusulkan kerangka desain berjenjang yang menghubungkan skala bahan baku–proses–struktur–mekanisme–kinerja–keberlanjutan. Prioritas riset berikutnya ialah karakterisasi operando, pengujian pada matriks nyata dan aliran kontinu, standardisasi metrik stabilitas, integrasi analisis daur hidup–teknokonomi, serta pemodelan kecerdasan buatan yang dapat dijelaskan. Kerangka tersebut menggeser pengembangan biochar dari optimasi empiris menuju perancangan material yang dapat diprediksi, aman, dan layak diperbesar skalanya. Secara khusus, sintesis membedakan kapasitas kesetimbangan dari kinerja dinamis, menilai kompromi antara aktivitas dan daya tahan, serta merumuskan hipotesis desain yang dapat diuji dalam reaktor, kolom, dan sistem biologis berskala relevan.

Kata kunci: biochar limbah biomassa; karbon berpori; hubungan struktur–fungsi; micro-CT tiga dimensi; remediasi air; katalisis oksidasi lanjut; bioenergi berkelanjutan

ABSTRACT

Biochar and porous carbons derived from biomass waste have evolved from simple carbon materials into multifunctional engineering platforms for environmental remediation, catalysis, energy storage, and low-carbon fuel production. This review synthesizes 50 publications from 2021–2026, emphasizing recent evidence on relationships among feedstock, conversion pathways, pore architecture, surface chemistry, mass transfer, and application performance. Pyrolysis temperature cannot be treated as a single determinant of quality; performance emerges from interactions among hierarchical structure, active groups, mineral phases, heteroatoms, and mechanical stability. Three-dimensional micro-computed tomography extends conventional analysis by visualizing pore evolution and adsorption dynamics in space and time. For Cu(II) adsorption, mesopores govern access and intraparticle diffusion, while surface chemistry determines final capacity. Biological modification, magnetization, sulfidation, and bimetal loading improve selectivity or activity but introduce leaching, passivation, and production burdens. In energy systems, biomass carbon serves as solid fuel, electrode, catalyst, and anaerobic-digestion additive, with benefits governed by densification, conductivity, dosage, and process integration. A hierarchical feedstock–process–structure–mechanism–performance–sustainability framework is proposed. Priorities include operando characterization, real-matrix and continuous-flow testing, standardized stability metrics, integrated life-cycle and techno-economic assessment, and explainable artificial-intelligence modeling. This framework supports a transition from empirical optimization toward predictable, safe, and scalable material design.

Keywords: biomass-waste biochar; porous carbon; structure–function relationship; three-dimensional micro-CT; water remediation; advanced oxidation catalysis; sustainable bioenergy

1. PENDAHULUAN

Pemanfaatan residu pertanian, lumpur, limbah kayu, kotoran ternak, dan limbah pangan sebagai bahan karbon menawarkan dua manfaat yang saling terkait: mengurangi beban pembuangan dan menghasilkan material atau energi bernilai tambah. Namun, istilah “biochar” mencakup material yang sangat heterogen. Komposisi awal, kadar mineral, bentuk partikel, sejarah termal, atmosfer reaksi, dan perlakuan setelah karbonisasi mengubah sifat produk secara tajam. Karena itu, klaim mengenai efektivitas biochar tidak dapat dipisahkan dari kondisi pembuatannya dan fungsi yang ditargetkan (Li et al., 2023; Oluwalana-Sanusi et al., 2025; Hu et al., 2022). Literatur terbaru menempatkan biochar sebagai bagian dari bioekonomi sirkular, bukan semata hasil samping pirolisis (Kusmayadi et al., 2026).

Tinjauan terdahulu telah membahas produksi biochar dari residu tanaman, adsorpsi polutan organik, penghilangan Cr(VI), katalisis oksidasi lanjut, sel bahan bakar mikroba, dan karbon berpori untuk superkapasitor (Li et al., 2023; Qiu et al., 2022; Yang et al., 2023). Keterbatasannya bukan kekurangan tema, melainkan fragmentasi antarbidang. Kajian adsorpsi sering berakhir pada kecocokan isoterm dan kinetika; kajian energi menekankan nilai kalor atau kapasitansi; kajian katalisis berfokus pada spesies oksigen reaktif. Padahal, seluruh aplikasi tersebut dipengaruhi oleh pertanyaan mendasar yang sama: bagaimana proses membentuk struktur dan kimia, lalu bagaimana keduanya mengendalikan transport, reaksi, kestabilan, dan dampak lingkungan.

Kemajuan 2024–2026 memperkuat kebutuhan sintesis lintas-aplikasi. Micro-CT kini dapat merekam distribusi adsorbat dan jarak difusi pada skala pori, bukan hanya menggambarkan morfologi awal (Song et al., 2026). Karbon biomassa telah dirancang sebagai aerogel hierarkis, penyangga logam bimetalik, material deionisasi kapasitif, serta katalis karbon untuk transesterifikasi (Liao et al., 2025; Li et al., 2025; Jiang et al., 2025). Bukti ini menunjukkan pergeseran dari “membuat arang lalu menguji” menuju perancangan arsitektur dan situs aktif untuk mekanisme tertentu.

Tinjauan ini bertujuan membangun kerangka struktur–fungsi terpadu berdasarkan 50 sumber yang tersedia dari 2021–2026. Pertanyaan utamanya ialah: (1) bagaimana bahan baku dan kondisi konversi menentukan arsitektur pori, kimia permukaan, fase mineral, serta integritas mekanik; (2) bagaimana sifat tersebut mengendalikan adsorpsi, oksidasi lanjut, proses elektrokimia, dan bioenergi; dan (3) bukti apa yang masih diperlukan agar material dapat diterapkan secara aman dan ekonomis. Kontribusi utama artikel ialah menghubungkan bukti micro-CT terbaru dengan data kimia permukaan, mekanisme reaksi, stabilitas siklus, dan penilaian keberlanjutan.

2. RUANG LINGKUP DAN PENDEKATAN SINTESIS

Sumber yang disintesis terdiri atas 50 rekaman publikasi: 3 artikel tahun 2021, 12 tahun 2022, 9 tahun 2023, 12 tahun 2024, 9 tahun 2025, dan 5 tahun 2026. Seluruh rujukan berasal dari dua berkas ekstraksi yang disediakan; tidak ada sumber eksternal yang ditambahkan. Informasi yang ditelaah meliputi bahan baku, jalur konversi, variabel proses, metode karakterisasi, fungsi material, metrik kinerja, mekanisme yang diusulkan, dan keterbatasan implementasi. Publikasi terbaru diprioritaskan untuk merumuskan arah perkembangan, sementara studi 2021–2023 digunakan untuk menelusuri fondasi mekanistik dan konsistensi hasil.

Sintesis dilakukan secara tematik dan mekanistik. Pertama, studi dikelompokkan menurut pembentukan material: pirolisis tunggal, ko-pirolisis, gasifikasi, karbonisasi hidrotermal, densifikasi, dan modifikasi pascakonversi. Kedua, hubungan struktur–fungsi ditelusuri melalui poros arsitektur pori, gugus permukaan, mineral/heteroatom, dan kestabilan mekanik. Ketiga, bukti aplikasi dibandingkan pada remediasi, katalisis, energi elektrokimia, bahan bakar, dan pertanian. Keempat, kualitas translasi dinilai dari penggunaan matriks nyata, aliran kontinu, pengujian regenerasi, pelindian, analisis biaya, dan jejak karbon. Pendekatan ini mencegah angka kapasitas atau efisiensi dibaca terpisah dari kondisi pengujian (Mei et al., 2025; Sun et al., 2025).

3. PEMBENTUKAN STRUKTUR MELALUI BAHAN BAKU DAN PROSES

3.1 Heterogenitas bahan baku

Bahan baku membawa “cetak biru” kimia dan anatomi ke dalam produk karbon. Lignoselulosa menyediakan jaringan seluler dan kerangka aromatik, sedangkan kotoran ternak dan lumpur memasukkan abu, fosfat, logam, serta garam alkali. Pada kondisi pembuatan yang dipadankan, biochar lignin kraft memiliki luas permukaan lebih tinggi, sedangkan biochar kotoran sapi menunjukkan kapasitas pertukaran kation tertinggi; urutan penghilangan Cr(VI) tidak identik dengan urutan luas permukaan atau CEC (Hu et al., 2022). Hasil ini menegaskan bahwa satu parameter tidak cukup untuk memprediksi fungsi. Komposisi mineral dapat menjadi situs reaksi, katalis intrinsik, atau sumber kontaminan sekunder (Zhang et al., 2021).

Residu pertanian juga berbeda pada skala morfologi. Jerami jagung, kapas, dan rapa menampilkan respons mikrostruktural yang berlainan terhadap pretreatment asam, yang dapat divisualisasikan secara non-destruktif melalui micro-CT (Song et al., 2022). Pada biochar kayu, asal bahan baku memengaruhi ketahanan fragmentasi; biochar oak lebih tahan dibandingkan pucuk anggur pada kondisi yang diuji (Videgain-Marco et al., 2021). Dengan demikian, pemilihan bahan baku seharusnya mempertimbangkan fungsi, bentuk penggunaan, dan

operasi hilir. Material untuk kolom adsorpsi membutuhkan stabilitas bentuk yang berbeda dari serbuk katalis atau aditif tanah.

3.2 Suhu, atmosfer, dan waktu tinggal

Peningkatan suhu pirolisis umumnya meningkatkan aromatisasi, kadar karbon tetap, dan pembentukan pori, sekaligus menurunkan rendemen serta gugus oksigen labil. Akan tetapi, arah manfaat bergantung pada sasaran. Pada ko-pirolisis heavy bio-oil dan cangkang aprikot, suhu, waktu tinggal, dan proporsi bahan mengubah rendemen, kandungan unsur, serta nilai kalor; kondisi menengah memberikan sinergi terhadap mutu bahan bakar (Zhuang et al., 2022). Pada pelet jerami jagung, suhu juga memengaruhi pelepasan hidrokarbon aromatik polisiklik, sehingga optimasi energi perlu disertai pengendalian emisi (Li et al., 2023). Pada briket reduksi mandiri, biochar bagas 550 °C meningkatkan derajat reduksi, sedangkan produk 400 °C memberi kekuatan suhu tinggi terbaik, memperlihatkan trade-off reaktivitas–integritas (Leão et al., 2026).

Atmosfer proses dan mineral intrinsik mengubah jalur reaksi. Alkali dan alkali tanah meningkatkan gasifikasi biomassa berukuran besar dalam atmosfer oksigen–uap; pemuatan dan keberadaan mineral asli memengaruhi konversi serta distribusi produk (Ren et al., 2024a; Ren et al., 2024b). Pada lumpur babi, kombinasi CO₂ dan MgCl₂ meningkatkan penghilangan Cu dalam kondisi tertentu serta mengubah fase fosfat dan ketersediaan hayati fosfor (Zhang et al., 2021). Ko-

pirolisis jerami–lumpur juga menunjukkan interaksi sinergis pada produk gas dan sifat biochar, sehingga prediksi berbasis penjumlahan komponen tunggal dapat menyestatkan (Sun et al., 2023).

3.3 Densifikasi dan integritas mekanik

Densifikasi menentukan logistik, perpindahan panas, dan ketahanan selama penggunaan. Pada pelet debu pengampelasan fiberboard, karbonisasi mengubah sifat fisik dan perilaku pembakaran (Gao et al., 2023). Pelet kotoran yak dipengaruhi oleh tekanan dan kadar air, sedangkan penambahan binder tidak selalu menaikkan densitas atau kekuatan tekan diametral (Liu et al., 2022). Bukti micro-CT terbaru memperlihatkan bahwa pirolisis fluidized bed dapat menghasilkan char pelet bermorfologi seperti kerucut pinus dan rongga pusat besar; porositas teresolusi micro-CT meningkat 6–12 kali, tetapi kehilangan ikatan antarpartikel menurunkan stabilitas (Sadeq et al., 2026).

Temuan tersebut penting bagi desain reaktor dan adsorben granular. Porositas tinggi dapat mempercepat akses reaktan, tetapi retakan dan pembentukan fines meningkatkan kehilangan tekanan, pelepasan partikel, dan kesulitan pemulihan. Kekuatan mekanik karenanya perlu diperlakukan sebagai metrik kinerja primer, bukan atribut tambahan (Videgain-Marco et al., 2021; Sadeq et al., 2026). Strategi optimum mungkin berupa pori hierarkis dengan kulit mekanik yang stabil, atau komposit dengan pengikat yang tidak menutup pori aktif

Tabel 1. Peta hubungan proses–struktur–fungsi pada literatur utama

Bahan baku/sistem	Proses atau modifikasi	Sifat dominan	Fungsi/hasil utama	Implikasi desain	Ref.
Pelet biomassa	Pirolisis fluidized bed; variasi rasio kanal cetak	Porositas radial, rongga pusat, kekuatan	Porositas naik 6–12×; stabilitas mengikuti mutu pelet awal	Optimasi pori harus disertai target kekuatan	Sadeq et al. (2026)
Jerami gandum	Pirolisis 300–700 °C dan modifikasi GRSP	Gugus amino/karboksil dan pori	Adsorpsi Cu(II) 193,2 mg g ⁻¹ ; naik 76%	Gabungkan pori aksesibel dan ligan biologis	Chen et al. (2025)
Lumpur pewarnaan ferik	Pirolisis menjadi biochar magnetik	Luas permukaan, fase Fe, magnetisme	Adsorpsi–reduksi Cr(VI), dapat dipulihkan	Nilai tambah ganda: pengelolaan lumpur dan remediasi	Mei et al. (2025)
Jerami padi	Pirolisis 550 °C; aditif digesti anaerob	Pori meso dan CEC	Dosis 2% menaikkan biogas 31,74%; dosis berlebih menurunkan hasil	Tentukan jendela dosis, bukan asumsi “lebih banyak lebih baik”	Ofon et al. (2025)
Dedak gandum	Co/Mo pada biochar; aktivasi PMS	Siklus valensi Co–Mo, ROS	99% siprofloksasin/30 menit; pelindian Co turun	Bimetal menyeimbangkan aktivitas dan stabilitas	Li et al. (2025)
Lumpur babi	Pirolisis CO ₂ /N ₂ dengan MgCl ₂	Fase fosfat dan volatilitas logam	Penghilangan Cu/Zn dan pemulihan P bergantung atmosfer	Rancang ko-pemulihan sumber daya dan pengendalian risiko	Zhang et al. (2021)

4. KARAKTERISASI MULTISKALA DAN HUBUNGAN STRUKTUR–FUNGSI

4.1 Keterbatasan karakterisasi rata-rata

BET, SEM, FTIR, XRD, XPS, Raman, dan analisis unsur tetap penting, tetapi sebagian besar menghasilkan informasi permukaan atau nilai rata-rata. Dua material dengan luas permukaan serupa dapat memiliki konektivitas pori, tortuositas, ukuran leher pori, dan distribusi situs aktif yang berbeda. Hal

ini menjelaskan mengapa model isoterm atau kinetika sering cocok secara statistik tanpa mengungkap pembatas fisik yang sebenarnya (Oluwalana-Sanusi et al., 2025; Rabah et al., 2026). Karakterisasi yang relevan harus memisahkan kapasitas situs, aksesibilitas, kecepatan transport, dan perubahan struktur selama operasi.

Micro-CT mengisi sebagian kesenjangan tersebut. Teknik ini telah digunakan untuk

memvisualisasikan perubahan morfologi jerami setelah pretreatment asam, evolusi pori bone char pada suhu berbeda, identifikasi lakuna tulang, dan autentikasi bahan tanaman (Song et al., 2022; Zhu et al., 2023; Zhu et al., 2022). Meski dua aplikasi terakhir berada di luar biochar, keduanya memperlihatkan kematangan segmentasi citra, optimasi pemindaian, dan ekstraksi fitur 3D. Transfer metodologis ini relevan untuk menilai heterogenitas internal material biomassa.

4.2 Visualisasi operando adsorpsi

Terobosan penting berasal dari registrasi dan pengurangan citra untuk memetakan adsorpsi Cu pada pelet biochar batang jagung secara spasial-temporal (Song et al., 2024). Studi berikutnya mengembangkan analisis in situ tiga dimensi dan menunjukkan pengayaan Cu(II) pada lapisan kulit setebal 120–180 μm , difusi intrapartikel yang lambat, serta hubungan kuantitatif antara jarak difusi, waktu, dan volume mesopori (Song et al., 2026). Temuan ini mengubah interpretasi “kinetika lambat” menjadi fenomena yang dapat dilokalisasi dalam ruang.

Hasil tersebut juga memperjelas pembagian peran struktur dan kimia. Ketika kimia permukaan relatif sebanding, mesopori mengatur difusi dan akses menuju situs kemisorpsi. Namun, kapasitas akhir lebih kuat ditentukan oleh pertukaran ion dengan logam alkali dan kopresipitasi (Song et al., 2026). Implikasinya ialah bahwa peningkatan luas permukaan tanpa menambah konektivitas atau situs reaktif mungkin hanya memberi perbaikan terbatas. Sebaliknya, penambahan gugus aktif pada pori yang tidak aksesibel tidak menghasilkan kapasitas praktis.

4.3 Dari korelasi ke prediksi

Model prediksi komponen proksimat berbasis analisis unsur menunjukkan bahwa data sederhana dapat digunakan untuk memperkirakan mutu biomassa sebelum konversi (Park et al., 2023). Perspektif terbaru mendorong kecerdasan buatan dan machine learning untuk menghubungkan deskriptor komposisi–struktur dengan desain katalis karbon (Rabah et al., 2026). Akan tetapi, model akan rapuh bila data berasal dari protokol karakterisasi dan kondisi uji yang tidak seragam. Deskriptor perlu mencakup distribusi pori tiga dimensi, fase mineral, densitas situs asam–basa, konduktivitas, kekuatan, dan indikator pelindian.

Model yang dapat dijelaskan lebih berguna daripada prediksi kinerja tanpa mekanisme. Hubungan hukum pangkat antara jarak difusi, waktu, dan volume mesopori merupakan contoh deskriptor fisik yang dapat diintegrasikan ke model data-driven (Song et al., 2026). Dataset lintas laboratorium juga harus menyimpan hasil negatif, dosis optimum, dan kegagalan regenerasi. Tanpa itu, algoritme cenderung mempelajari bias publikasi dan merekomendasikan material yang aktif dalam uji batch tetapi tidak stabil pada penggunaan nyata (Li et al., 2025).

5. REMEDIASI MELALUI ADSORPSI DAN IMOBILISASI

5.1 Logam berat

Penghilangan logam berlangsung melalui kombinasi daya tarik elektrostatis, kompleksasi gugus oksigen/nitrogen, pertukaran ion, presipitasi mineral, dan reaksi redoks. Biochar non-kayu untuk Cr(VI) memperlihatkan potensi besar, tetapi performanya bergantung pada pH, spesiasi, bahan baku, dan modifikasi (Murtaza et al., 2024). Biochar magnetik dari lumpur pewarnaan ferik menggabungkan adsorpsi dan reduksi Cr(VI); luas permukaan 181,09 $\text{m}^2 \text{g}^{-1}$, magnetisme, ketahanan gangguan, penggunaan ulang, serta analisis biaya–jejak karbon memperkuat relevansi translasi (Mei et al., 2025). Ini lebih komprehensif daripada pelaporan kapasitas tunggal.

Modifikasi biologis menawarkan jalur berbeda. Glomalin-related soil protein pada biochar jerami menambah gugus amino dan karboksil; biochar gandum 700 $^{\circ}\text{C}$ termodifikasi mencapai 193,2 mg g^{-1} untuk Cu(II), 76% di atas material tanpa modifikasi (Chen et al., 2025). Sinergi berasal dari ligan protein dan struktur pori, disertai karakter hidrofobik–presipitasi yang membantu pemulihan. Namun, ketahanan protein terhadap siklus pH, penyimpanan, dan matriks air kompleks masih perlu diuji sebelum klaim keberlanjutan dapat diterapkan secara luas.

Biochar dari limbah yang mengandung logam memerlukan kehati-hatian. Ko-pirolisis lumpur dengan PVC bermuatan logam dapat menurunkan ketersediaan hayati beberapa logam dan menggeser fraksi menuju bentuk residual, tetapi total logam tertentu meningkat (Li et al., 2022). Pada pemulihan fosfor dari lumpur, jenis lumpur dan transformasi mineral menentukan mutu produk (Zhu et al., 2022). Karena itu, “imobilisasi” bukan sinonim dengan eliminasi. Pengujian pelindian jangka panjang, perubahan redoks, penuaan, dan tujuan akhir produk tetap diperlukan (Li et al., 2022).

5.2 Polutan organik dan gas

Adsorpsi senyawa organik dipengaruhi oleh pengisian pori, interaksi π – π , ikatan hidrogen, hidrofobisitas, dan partisi ke fase karbon. Modifikasi biochar dapat meningkatkan afinitas, tetapi juga mengubah biaya dan regenerabilitas (Qiu et al., 2022). Biochar hasil gasifikasi gelombang mikro yang dimodifikasi menunjukkan adsorpsi dibenzofuran yang sensitif terhadap kondisi larutan dan mekanisme permukaan (Ren et al., 2024). Pada sedimen mangrove, urutan penambahan biochar dan fenantrena mengubah sorpsi dan risiko ekologis; sejarah kontak material–polutan karenanya penting dalam remediasi in situ (Jia et al., 2021).

Biokomposit biochar/hydrochar memperluas pilihan untuk zat warna melalui penggabungan matriks polimerik, mineral, atau gugus fungsional (Aboughaly & Fattah, 2025). Biochar tongkol jagung magnetik juga digunakan untuk adsorpsi metilen

biru, dengan pemulihan magnetik sebagai keuntungan operasional (Guel-Nájar et al., 2023). Untuk gas toksik industri, biochar residu pertanian menawarkan luas permukaan dan kimia permukaan yang dapat direkayasa, meskipun kelembapan, kompetisi gas, dan stabilitas pada aliran kontinu harus menjadi bagian protokol uji (Cho et al., 2023).

6. BIOCHAR SEBAGAI PLATFORM KATALITIK

Karbon biomassa dapat berfungsi sebagai katalis, penyangga, mediator transfer elektron, dan pengatur dispersi logam. Pada aktivasi persulfat atau peroxymonosulfate (PMS), permukaan karbon, cacat, heteroatom, dan logam transisi menghasilkan jalur radikal maupun nonradikal (Yang et al., 2023; Li et al., 2022; Qin et al., 2022). Keunggulan platform karbon ialah kemungkinan mengubah limbah menjadi material aktif; kelemahannya ialah heterogenitas, pasivasi, pelindian logam, serta sulitnya membandingkan dosis oksidator dan energi antarstudi.

Komposit S-nZVI/biochar meningkatkan aktivasi persulfat untuk 4-kloroanilin. Sulfidasi menekan aglomerasi/pasivasi, membantu transfer elektron dan siklus Fe^{2+} , serta menghasilkan 98,86% degradasi pada batch; pada kolom, degradasi turun menjadi 58,08% dalam kondisi yang dilaporkan (Sun et al., 2025). Perbedaan ini sangat informatif: kinerja batch tidak otomatis bertahan pada transport dinamis. Hambatan waktu kontak, dispersi katalis, scavenger, dan distribusi aliran perlu dioptimasi secara khusus.

Rekayasa bimetalik dapat memperbaiki siklus valensi. Komposit $\text{Co/CoMoO}_3\text{@WBC}$ berbasis

dedak gandum mencapai 99% penghilangan siprofloksasin dalam 30 menit; Mo(IV) membantu mereduksi Co(III) menjadi Co(II) , efisiensi masih 89% setelah lima siklus, dan pelindian Co lebih rendah daripada katalis Co tunggal (Li et al., 2025). Aerogel karbon hierarkis terinspirasi kayu yang didoping N/P dan dihiasi Co_3O_4 menggabungkan jalur radikal, oksigen singlet, serta transfer muatan antarmuka, sambil mempertahankan kekuatan mekanik dan aktivitas lintas jenis air (Liao et al., 2025).

Arsitektur tiga dimensi juga memperbaiki pemanfaatan katalis. Aktivator PMS serat berongga Co/karbon digunakan pada degradasi dinamis karbamazepin, memperlihatkan hubungan antara geometri, transfer massa, dan mekanisme reaksi (Li et al., 2024). Biochar bercacat yang membawa Fe_3O_4 mengaktifkan PMS untuk urea melalui radikal sulfat terikat permukaan dan mempertahankan 86% efisiensi setelah tiga siklus (Li et al., 2022). Katalis berbasis cangkang udang yang kaya gugus oksigen dan spesies Co–Si juga menunjukkan jalur multi-ROS untuk siprofloksasin (Qin et al., 2022).

Tiga tolok ukur perlu disatukan: aktivitas intrinsik per situs atau massa logam, stabilitas kimia–mekanik, dan beban lingkungan proses sintesis. Efisiensi penghilangan tinggi dapat berasal dari dosis katalis/PMS yang besar, bukan material yang lebih baik. Pelaporan harus meliputi mineralisasi, toksisitas intermediet, konsumsi oksidator, pelindian, energi sintesis, dan performa pada air nyata (Qin et al., 2022; Liao et al., 2025; Li et al., 2025). Analisis QSAR toksisitas dan uji lintas matriks merupakan langkah maju, tetapi standardisasi masih kurang.

Tabel 2. Perbandingan fungsi, mekanisme, dan kesiapan aplikasi

Aplikasi	Material/sistem	Mekanisme kunci	Bukti kinerja	Kesenjangan translasi	Ref.
Adsorpsi Cu(II)	Biochar dengan pori bervariasi	Difusi mesopori; pertukaran ion; kopresipitasi	Lapisan pengayaan 120–180 μm dan hubungan struktur–difusi 3D	Validasi pada ion kompetitif dan kolom	Song et al. (2026)
Detoksifikasi Cr(VI)	Biochar magnetik lumpur ferik	Adsorpsi dan reduksi	Reusable; tahan gangguan; analisis biaya/karbon	Uji penuaan dan pengelolaan residu jenuh	Mei et al. (2025)
Oksidasi 4-kloroanilin	S-nZVI/biochar + persulfat	Transfer elektron; siklus Fe^{2+} ; ROS	98,86% batch; 58,08% kolom	Kehilangan performa pada aliran dinamis	Sun et al. (2025)
Oksidasi siprofloksasin	Co/Mo -biochar + PMS	Siklus valensi Co–Mo; radikal	99%/30 menit; 89% setelah 5 siklus	Mineralisasi, toksisitas, umur pakai panjang	Li et al. (2025)
Digesti anaerob	Biochar jerami padi	Habitat mikroba, transfer elektron, penyangga	Biogas naik 31,74% pada dosis 2%	Optimasi dosis dan sistem kontinu	Ofon et al. (2025)
Deionisasi/penyimpanan	Karbon biomassa termodifikasi	Adsorpsi ion elektrosorptif; lapisan ganda	Potensi desalinisasi dan elektrokimia	Standardisasi kapasitansi, energi, fouling	Jiang et al. (2025); Kavan Kumar et al. (2024)

7. SISTEM ENERGI DAN BIOEKONOMI

7.1 Bahan bakar dan konversi termokimia

Residu pertanian dapat dikonversi melalui pretreatment, hidrolisis, digesti anaerob, pirolisis, dan gasifikasi. Tinjauan terbaru menempatkan

biorefineri terpadu, produksi terdesentralisasi, serta penangkapan karbon sebagai arah pengembangan, tetapi biaya, logistik bahan baku, dan regulasi tetap menjadi hambatan (Kusmayadi et al., 2026). Perspektif pembangunan berkelanjutan juga

menekankan bahwa manfaat iklim biofuel bergantung pada batas sistem, penggunaan lahan, energi proses, dan pemanfaatan produk samping (Prasad et al., 2024). Dengan demikian, “berbasis biomassa” tidak otomatis berarti rendah karbon.

Pirolisis limbah biomassa kota dapat menghasilkan hidrogen dan fraksi karbon, sedangkan gasifikasi memerlukan pengendalian perpindahan panas, ukuran partikel, dan katalis mineral (Sadeghi & Fattah, 2024; Ren et al., 2024a). Untuk bahan bakar padat, densitas, kadar air, kekuatan, pelepasan debu, dan perilaku pembakaran menentukan kelayakan logistik (Liu et al., 2022; Gao et al., 2023; Videgain-Marco et al., 2021). Analisis yang hanya mengutamakan nilai kalor mengabaikan kehilangan massa, emisi partikel, dan kerusakan pelet selama penanganan.

Biochar juga dapat menggantikan sebagian karbon fosil pada metalurgi. Briket bijih besi dengan biochar bagus memperlihatkan derajat reduksi dan kekuatan yang berbeda menurut suhu pirolisis; suhu tertinggi tidak menghasilkan kompromi terbaik untuk semua metrik (Leão et al., 2026). Temuan ini mendukung optimasi multiobjektif: reaktivitas, kekuatan, emisi, serta kompatibilitas dengan zona temperatur proses harus dinilai bersamaan.

7.2 Digesti anaerob dan sel bahan bakar mikroba

Dalam digesti anaerob, biochar dapat menyediakan habitat mikroba, mengadsorpsi inhibitor, menyangga pH, dan memfasilitasi transfer elektron antarspesies. Penambahan 2% biochar jerami padi meningkatkan produksi biogas 31,74%, tetapi dosis lebih tinggi menurunkan hasil; model Gompertz termodifikasi memberikan kecocokan tinggi (Ofon et al., 2025). Respons hormetik ini penting karena menunjukkan ambang optimum. Dosis berlebih dapat mengikat nutrisi, mengubah reologi, atau mengganggu komunitas mikroba.

Pada microbial fuel cells, biochar berpotensi menjadi elektroda murah dengan luas permukaan dan biokompatibilitas yang baik (Mishra et al., 2024). Optimasi material anoda, pengolahan dua polutan, dan operasi jangka panjang menunjukkan bahwa keluaran listrik harus dievaluasi bersama penyisihan pencemar dan stabilitas biofilm (Najihah Mohamad Daud et al., 2024). Penelitian berikutnya perlu membandingkan energi bersih setelah memperhitungkan pembuatan elektroda, pretreatment, pumping, dan pemulihan material.

7.3 Penyimpanan energi dan deionisasi kapasitif

Karbon berpori digunakan pada superkapasitor karena luas permukaan, pori hierarkis, konduktivitas, dan kemungkinan doping heteroatom (Kavan Kumar et al., 2024). Prinsip serupa berlaku pada capacitive deionization: mikropori menyediakan kapasitas, mesopori membantu transport ion, dan gugus permukaan mengendalikan keterbasahan serta selektivitas (Jiang et al., 2025). Namun, luas BET tinggi bukan jaminan kapasitas

efektif bila pori tidak dapat diakses elektrolit atau resistansi internal tinggi.

Desain elektroda perlu mengoptimalkan distribusi ukuran pori, konduktivitas, densitas massa, dan kestabilan siklus. Modifikasi kimia dapat meningkatkan muatan permukaan tetapi menambah resistansi atau biaya. Perbandingan yang bermakna memerlukan protokol seragam untuk konsentrasi garam, tegangan, laju alir, kapasitas adsorpsi garam, konsumsi energi, dan regenerasi (Jiang et al., 2025; Kavan Kumar et al., 2024). Integrasi data 3D dapat membantu menghubungkan tortuositas dan jalur ion dengan performa elektrokimia.

7.4 Katalis karbon untuk biodiesel

Katalis karbon dari limbah menawarkan gugus asam-basa yang dapat disetel untuk transesterifikasi. Aktivitas ditentukan oleh tekstur, densitas situs, komposisi permukaan, dan parameter reaksi. Perspektif 2026 mengusulkan karakterisasi lanjut serta AI yang dapat dijelaskan untuk menghubungkan deskriptor katalis dengan mekanisme dan selektivitas (Rabah et al., 2026). Analisis daur hidup dan teknoekonomi harus berjalan bersama optimasi laboratorium, sebab aktivasi kimia, pencucian, dan regenerasi dapat mendominasi beban proses.

8. KEBERLANJUTAN, RISIKO, DAN KESIAPAN SKALA

Penilaian keberlanjutan harus menggunakan batas sistem yang transparan. Kredit dari pengalihan limbah, substitusi produk fosil, penyimpanan karbon, dan pemulihan nutrisi perlu dibandingkan dengan energi pengeringan, pirolisis, aktivasi, bahan kimia, transportasi, serta pengelolaan material jenuh (Kusmayadi et al., 2026; Mei et al., 2025). Biochar magnetik dari lumpur ferik memperlihatkan bagaimana analisis biaya-manfaat dan jejak karbon dapat mendampingi uji kinerja, tetapi pendekatan ini belum menjadi standar (Mei et al., 2025).

Risiko berubah sesuai bahan baku dan penggunaan. Lumpur dan plastik bermuatan logam dapat menghasilkan biochar dengan total logam tinggi walaupun fraksi bioavailable menurun (Li et al., 2022). Pirolisis jerami dapat melepaskan PAH (Li et al., 2023). Katalis Co atau Fe dapat melindi selama siklus (Li et al., 2025; Sun et al., 2025). Material yang jenuh polutan mungkin diklasifikasikan sebagai limbah berbahaya. Oleh sebab itu, desain aman harus dimulai dari skrining bahan baku dan memasukkan nasib akhir sejak tahap sintesis.

Kesenjangan terbesar terletak antara batch sintetis dan kondisi operasi. Studi kolom S-nZVI/biochar menunjukkan penurunan nyata dibanding batch (Sun et al., 2025). Air keran, air danau, atau campuran ion mengubah reaksi melalui scavenging dan fouling, meskipun aerogel Co₃O₄/N,P-karbon mempertahankan performa baik pada beberapa matriks (Liao et al., 2025). Pengujian perlu bergerak menuju influen nyata, variasi

musiman, waktu operasi panjang, siklus regenerasi banyak, dan neraca massa lengkap.

Skala juga menuntut bentuk material yang dapat ditangani. Serbuk halus memiliki luas permukaan tinggi tetapi sulit dipisahkan; pelet mudah dioperasikan namun membawa hambatan difusi (Song et al., 2026; Sadeq et al., 2026). Magnetisasi memudahkan pemulihan, sementara aerogel memberi struktur monolitik, tetapi keduanya menambah langkah sintesis (Mei et al., 2025; Liao et al., 2025). Pilihan bentuk harus ditentukan oleh konfigurasi reaktor dan biaya siklus hidup, bukan semata angka kapasitas maksimum.

9. AGENDA RISET DAN KERANGKA DESAIN TERPADU

Pertama, penelitian perlu menghubungkan karakterisasi statis dan operando. Micro-CT dapat mengukur perubahan pori, distribusi adsorbat, dan front difusi, sedangkan XPS, FTIR, XRD, EPR, dan analisis larutan mengidentifikasi perubahan kimia serta spesies reaktif (Song et al., 2026; Rabah et al., 2026). Korelasi antar-metode pada sampel yang sama akan membedakan hambatan transport dari keterbatasan situs aktif. Resolusi temporal juga penting untuk menangkap pasivasi, presipitasi, dan perubahan fase selama siklus.

Kedua, standardisasi dataset harus mencakup bahan baku, ukuran partikel, laju pemanasan, atmosfer, waktu tinggal, rendemen, konsumsi energi, porositas 3D, gugus aktif, mineral, kekuatan, dan pelindian. Untuk adsorpsi, wajib dilaporkan kapasitas pada konsentrasi relevan, selektivitas, laju, regenerasi, dan neraca massa. Untuk katalisis, diperlukan mineralisasi, konsumsi oksidator, aktivitas per massa logam, pelindian, toksisitas intermediat, dan umur pakai (Qiu et al., 2022; Qin et al., 2022; Li et al., 2025). Untuk energi, konsumsi energi bersih dan stabilitas siklus harus menjadi pasangan metrik utama (Jiang et al., 2025; Ofon et al., 2025).

Ketiga, AI sebaiknya digunakan untuk optimasi multiobjektif yang dapat dijelaskan. Sasaran tidak cukup berupa kapasitas maksimum; model perlu menyeimbangkan kinerja, rendemen, kekuatan, biaya, emisi, pelindian, dan regenerabilitas (Park et al., 2023; Rabah et al., 2026). Deskriptor mekanistik seperti volume mesopori yang terhubung, jarak difusi, densitas situs, dan laju siklus valensi lebih dapat ditransfer daripada label bahan baku semata (Song et al., 2026; Li et al., 2025).

Keempat, desain penelitian perlu mengikuti rantai bahan baku–proses–struktur–mekanisme–kinerja–keberlanjutan. Bahan baku dipilih menurut ketersediaan dan risiko; proses ditentukan berdasarkan target struktur; struktur diverifikasi pada beberapa skala; mekanisme diuji dengan eksperimen pembeda; kinerja dinilai dalam konfigurasi relevan; kemudian hasil diintegrasikan dengan LCA dan teknoekonomi. Kerangka ini memudahkan perbandingan antara adsorben, katalis, elektroda, dan

bahan bakar tanpa menghapus kekhasan setiap aplikasi (Kusmayadi et al., 2026; Oluwalana-Sanusi et al., 2025).

Kelima, studi demonstrasi harus menguji strategi akhir masa pakai. Adsorben logam dapat diregenerasi, distabilkan, atau diproses untuk pemulihan logam; katalis dapat direkondisi atau dikonversi; biochar energi dapat menghasilkan abu kaya mineral. Penentuan jalur akhir akan memengaruhi kelayakan ekonomi dan risiko. Pemulihan fosfor dari lumpur serta pengaturan fase mineral melalui atmosfer dan aditif menunjukkan peluang desain sirkular, tetapi ketersediaan hayati dan kontaminan harus dinilai bersamaan (Zhu et al., 2022; Zhang et al., 2021).

9.1 Hipotesis desain yang dapat diuji

Sintesis literatur memungkinkan sejumlah hipotesis yang lebih tajam daripada agenda umum “meningkatkan luas permukaan”. Hipotesis pertama menyatakan bahwa kapasitas praktis pada partikel berukuran milimeter ditentukan oleh hasil kali densitas situs aktif dan fraksi situs yang dapat dicapai dalam waktu tinggal proses. Prediksi ini dapat diuji dengan memproduksi seri material yang kimia permukaannya dibuat sebanding, tetapi konektivitas mesoporinya berbeda, kemudian membandingkan pemetaan micro-CT dengan serapan kimia (Song et al., 2026). Jika benar, material dengan BET tertinggi tidak selalu memberi kapasitas dinamis tertinggi. Uji kolom akan menjadi pembeda yang lebih kuat daripada kesetimbangan batch (Sun et al., 2025).

Hipotesis kedua ialah adanya batas optimum antara aktivasi kimia dan kestabilan. Penambahan heteroatom, protein, atau logam meningkatkan jumlah situs dan transfer elektron, tetapi dapat menurunkan ketahanan termal, menutup leher pori, atau memicu pelindian (Chen et al., 2025; Li et al., 2025). Seri siklus panjang perlu mengukur kehilangan massa, perubahan struktur 3D, dan perubahan valensi, bukan hanya persentase penghilangan. Aerogel hierarkis yang tahan beban menawarkan bentuk pengujian menarik karena pengaruh kimia dan mekanika dapat diukur bersamaan (Liao et al., 2025).

Hipotesis ketiga menyatakan bahwa mineral intrinsik merupakan variabel desain, bukan pengotor acak. AAEM dapat mengatalisis gasifikasi, fosfat dapat mengikat logam, dan Fe dapat memberi magnetisme atau aktivitas redoks (Ren et al., 2024a; Zhang et al., 2021; Mei et al., 2025). Namun, mineral yang sama dapat menaikkan abu, menghambat luas permukaan, atau menjadi sumber pelindian. Pemisahan pengaruh mineral memerlukan pencucian selektif, penambahan kembali fase murni, dan analisis fase setelah reaksi. Pendekatan tersebut akan membedakan korelasi komposisi dari kausalitas mekanistik.

Hipotesis keempat berkaitan dengan bentuk material. Serbuk, pelet, monolit, dan aerogel harus dibandingkan pada volume reaktor dan waktu tinggal

yang setara. Pelet dapat menekan kehilangan material tetapi memperbesar gradien konsentrasi; monolit mengurangi tahap pemisahan, tetapi sintesisnya mungkin lebih mahal (Sadeq et al., 2026; Liao et al., 2025). Data kekuatan dan fragmentasi perlu dikaitkan dengan kehilangan tekanan dan pembentukan fines selama ratusan jam, mengikuti pentingnya sifat mekanik yang telah ditunjukkan pada biochar kayu dan pelet karbon (Videgain-Marco et al., 2021; Gao et al., 2023).

Hipotesis kelima ialah bahwa keberlanjutan optimum sering muncul pada kinerja moderat dengan proses sederhana. Material termodifikasi kompleks dapat memberi efisiensi sangat tinggi, tetapi aktivasi kimia, logam, pencucian, dan regenerasi memperbesar biaya serta jejak lingkungan (Rabah et al., 2026). Sebaliknya, material lokal dengan kapasitas lebih rendah mungkin unggul bila dapat diproduksi terdesentralisasi dan digunakan tanpa pemisahan rumit (Kusmayadi et al., 2026). Pengujian hipotesis ini memerlukan fungsi objektif gabungan per unit polutan yang benar-benar dimineralisasi, energi yang dihasilkan bersih, atau ion yang dipisahkan, bukan per gram material saja.

Terakhir, dosis optimum harus dipahami sebagai hasil interaksi material–sistem. Respons hormetik biochar pada digesti anaerob memperlihatkan bahwa peningkatan dosis tidak selalu meningkatkan fungsi (Ofon et al., 2025). Prinsip serupa mungkin berlaku pada tanah, microbial fuel cells, dan katalisis, karena biochar dapat sekaligus menjadi habitat, sorben, mediator elektron, dan pengikat nutrisi (Dos Santos Matos et al., 2022; Mishra et al., 2024). Desain faktorial yang menghubungkan dosis, ukuran partikel, waktu, dan matriks akan menghasilkan aturan operasi yang lebih berguna daripada satu kondisi optimum laboratorium.

10. KESIMPULAN

Literatur 2021–2026 menunjukkan bahwa biochar limbah biomassa telah menjadi keluarga material rekayasa yang fungsi akhirnya ditentukan oleh interaksi bahan baku, sejarah proses, arsitektur pori, kimia permukaan, fase mineral, dan integritas mekanik. Suhu pirolisis penting, tetapi tidak dapat berdiri sebagai penjelasan tunggal. Bukti micro-CT terbaru memperlihatkan secara langsung bahwa mesopori mengendalikan akses dan difusi intrapartikel, sedangkan situs kimia serta fase mineral menentukan kapasitas dan jalur reaksi (Song et al., 2024; Song et al., 2026).

Pada remediasi dan katalisis, modifikasi protein, magnetisasi, sulfidasi, doping heteroatom, dan pemuatan bimetalik meningkatkan fungsi melalui mekanisme yang berbeda (Chen et al., 2025; Mei et al., 2025; Sun et al., 2025; Liao et al., 2025; Li et al., 2025). Keunggulan laboratorium belum cukup tanpa stabilitas, pelindian rendah, matriks nyata, operasi kontinu, dan pengelolaan residu. Pada energi,

densifikasi, dosis aditif, konduktivitas, serta integrasi biorefineri menentukan apakah manfaat material bertahan pada skala sistem (Sadeq et al., 2026; Ofon et al., 2025; Jiang et al., 2025; Kusmayadi et al., 2026).

Arah paling produktif ialah menggabungkan karakterisasi operando, eksperimen mekanistik, data standar, AI yang dapat dijelaskan, serta LCA–teknoeкономи sejak awal. Dengan demikian, pengembangan dapat beralih dari pencarian kapasitas tertinggi menuju material yang memenuhi fungsi tertentu, dapat diproduksi konsisten, aman selama siklus hidup, dan kompetitif pada konfigurasi nyata.

DAFTAR PUSTAKA

1. Aboughaly, M., & Fattah, I.M.R. (2025). Biochar, hydrochar, and their derivative biocomposites for dye adsorption. *Engineered Biocomposites for Dye Adsorption*, 73–85. <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-29877-6.00006-8>
2. Chen, K., Chen, G., Zhuang, Z., Luo, S., Liu, J., & Liu, G. (2024). Feasibility study on the introduction of Micro-CT technology for the identification of Radix Bupleuri and its adulterants. *Frontiers in Pharmacology*, 15, 1347316. <https://doi.org/10.3389/fphar.2024.1347316>
3. Chen, Z., Gao, Z., Xue, Y., Yao, X., Shao, H., & Wang, Q. (2025). Adsorption Performance and Mechanisms of Copper by Soil Glycoprotein-Modified Straw Biochar. *Agriculture (Switzerland)*, 15(23), 2495. <https://doi.org/10.3390/agriculture15232495>
4. Cho, S.-H., Lee, S., Kim, Y., Song, H., Lee, J., Tsang, Y.F., Chen, W.-H., Park, Y.-K., Lee, D.-J., Jung, S., & Kwon, E.E. (2023). Applications of agricultural residue biochars to removal of toxic gases emitted from chemical plants: A review. *Science of the Total Environment*, 868, 161655. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.161655>
5. Dos Santos Matos, S., Parra-Serrano, L.J., Martins Costa, R., Furtado de Farias, M., & Napoli, A. (2022). Lettuce production with rates of biochar from babassu palm rachis. *International Journal of Vegetable Science*, 28(4), 395–405. <https://doi.org/10.1080/19315260.2021.2007508>
6. Gao, W., Wang, J., Akhtar, A., Wei, J., Li, B., Xu, D., Zhang, S., Zhang, S., & Wu, Y. (2023). Effects of carbonization on the physical properties and combustion behavior of fiberboard sanding dust pellets. *Renewable Energy*, 212, 263–273. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.05.042>
7. Guel-Nájar, N.A., Rios-Hurtado, J.C., Múzquiz-Ramos, E.M., Dávila-Pulido, G.I., González-Ibarra, A.A., & Pat-Espadas, A.M. (2023). Magnetic Biochar Obtained by Chemical Coprecipitation and Pyrolysis of Corn Cob Residues: Characterization and Methylene Blue Adsorption. *Materials*, 16(8), 3127. <https://doi.org/10.3390/ma16083127>

8. Hu, Y., Li, P.-Y., Yang, Y.-P., Ling, M., & Li, X.-F. (2022). Preparation and Characterization of Biochar from Four Types of Waste Biomass under Matched Conditions. *BioResources*, 17(4), 6464–6475. <https://doi.org/10.15376/biores.17.4.6464-6475>
9. Jia, H., Wu, Y., Daolin, D., Yuan, B., & Zhou, Z. (2021). Effects of different order spiking on bioavailability and ecological risk of phenanthrene in mangrove sediment-biochar system. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 228, 112951. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2021.112951>
10. Jiang, J.-J., Ma, X.-J., Zhou, J., Batol, A., Gou, H., & Zhang, W.-B. (2025). Biomass-derived carbons and their modification techniques in electrochemical capacitive deionization desalination. *RSC Sustainability*, 3(10), 4364–4409. <https://doi.org/10.1039/d5su00439j>
11. Kavan Kumar, V., & Panwar, N.L. (2024). A review on porous carbon synthesis processes and its application as energy storage supercapacitor. *Journal of the Indian Chemical Society*, 101(9), 101231. <https://doi.org/10.1016/j.jics.2024.101231>
12. Kusmayadi, A., Leong, Y.K., Chyuan, H.C., Hidayatullah, I.M., Budiastuti, H., & Ridwan, I. (2026). Advancements in low-carbon biofuel production from agricultural waste valorization. *Biomass and Bioenergy*, 207, 108726. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2025.108726>
13. Leão, P.M.G.C., Zicker, T.B., Ferreira, N.H.A., Ardisson, J.D., & Bagatini, M.C. (2026). Influence of biomass pyrolysis temperature on the performance of self-reducing briquettes for use in blast furnaces. *Biomass and Bioenergy*, 206, 108691. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2025.108691>
14. Li, G., Cao, X.-Q., Meng, N., Huang, Y.-M., Wang, X.-D., Gao, Y.-Y., Li, X., Yang, T.-S., Li, B.-L., Zhang, Y.-Z., Lyu, X.-J., & Liang, Y. (2022). Fe₃O₄ supported on water caltrop-derived biochar toward peroxymonosulfate activation for urea degradation: the key role of sulfate radical. *Chemical Engineering Journal*, 433, 133595. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.133595>
15. Li, J., Ji, X., & Sun, Z. (2025). Simple one-pot synthesis of Co/Mo-loaded wheat bran biochar bimetallic composites for peroxymonosulfate activation to degrade ciprofloxacin: Mo promotes valence cycling of Co. *Journal of Water Process Engineering*, 71, 107375. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2025.107375>
16. Li, L., Niu, W., Cong, H., Meng, H., Niu, Z., Shen, X., Cao, L., & Kong, X. (2023). Effects of pyrolysis temperature on the release characteristics of polycyclic aromatic hydrocarbons during pyrolysis of corn stover pellet. *BioResources*, 18(1), 2112–2136. <https://doi.org/10.15376/biores.18.1.2112-2136>
17. Li, W., Meng, J., Zhang, Y., Haider, G., Ge, T., Zhang, H., Yu, Y., & Shan, S. (2022). Co-pyrolysis of sewage sludge and metal-free/metal-loaded polyvinyl chloride (PVC) microplastics improved biochar properties and reduced environmental risk of heavy metals. *Environmental Pollution*, 302, 119092. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.119092>
18. Li, Y., Gupta, R., Zhang, Q., & You, S. (2023). Review of biochar production via crop residue pyrolysis: Development and perspectives. *Bioresource Technology*, 369, 128423. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.128423>
19. Li, Y., An, Q., Xiao, Z., Zhu, K., Zhang, X., Wang, C., Liu, Y., & Zhai, S. (2024). 3D hollow cobalt/carbon fiber-like PMS activator for dynamic carbamazepine degradation: promotional effect and reaction mechanism. *Chemical Engineering Journal*, 487, 150636. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2024.150636>
20. Liao, J., Cao, S., Qin, M., Zhang, Y., Lu, Y., Li, L., Guo, C., & Wang, Z. (2025). Wood-inspired N, P-codoped hierarchically porous carbon aerogels decorated with Co₃O₄ nanoparticles for fast and sustainable emerging organic contaminants degradation. *Journal of Cleaner Production*, 520, 146139. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2025.146139>
21. Liu, J., Jiang, X., Yuan, Y., Chen, H., Zhang, W., Cai, H., & Gao, F. (2022). Densification of Yak Manure Biofuel Pellets and Evaluation of Parameters: Effects on Properties. *Energies*, 15(5), 1621. <https://doi.org/10.3390/en15051621>
22. Mei, M., Liao, X., Guo, R., Xu, L., Zhang, Y., Li, K., & Li, W. (2025). Magnetic biochar derived from ferric textile dyeing sludge: hexavalent chromium detoxification performance, mechanism and sustainability evaluation. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 22(16), 16717–16732. <https://doi.org/10.1007/s13762-025-06745-2>
23. Mishra, R., Gollakota, A.R.K., & Shu, C.-M. (2024). Cultivating eco-advantages: Unleashing the distinctive potential of biochar in microbial fuel cells. *Process Safety and Environmental Protection*, 185, 614–631. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2024.02.084>
24. Murtaza, G., Usman, M., Ahmed, Z., Rizwan, M., & Iqbal, R. (2024). Non-wood-based biochars as promising and eco-friendly adsorbents for chromium hexavalent Cr (VI) removal from aquatic systems: state-of-the-art, limitations, and potential future directions. *Environmental Pollutants and Bioavailability*, 36(1), 2387680. <https://doi.org/10.1080/26395940.2024.2387680>
25. Najihah Mohamad Daud, N., Ibrahim, M., Ali Yaqoob, A., Suriaty Yaakop, A., Hussin, M., Yong, C., & AlObaid, A.A. (2024). Optimizing microbial fuel cells performance: An innovative approach integrating anode materials, dual-pollutant treatment, and long-term operation. *Fuel*, 364, 131160. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2024.131160>
26. Ofon, U.A., Ndubuisi-Nnaji, U.U., Udofia, G.E., Adegoke, A.A., Orji, E.E., Ekaette, M.I., Ukot, C.A., Offiong, N.-A.O., Fapojuwo, D.P., & Shaibu, S.E. (2025). Optimization of biogas production with rice straw-derived biochar: Characterization, hormetic effects, and kinetics

- modelling. *Cleaner Waste Systems*, 11, 100288. <https://doi.org/10.1016/j.clwas.2025.100288>
27. Oluwalana-Sanusi, A., Munzeiwa, W.A., Verkijika, S., & Chaukura, N. (2025). Design, characterization, and evaluation of biochar: recent advances, applications, and future research directions. *Biochar for Environmental Remediation: Principles, Applications, and Prospects*, 59–73. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-99889-5.00004-9>
 28. Park, S., Kim, S.J., Oh, K.C., Cho, L.H., & Kim, D. (2023). Developing a Proximate Component Prediction Model of Biomass Based on Element Analysis. *Energies*, 16(1), 509. <https://doi.org/10.3390/en16010509>
 29. Prasad, S., Yadav, K.K., Kumar, S., Pandita, P., Bhutto, J.K., Awjan Alreshidi, M.A., Ravindran, B., Yaseen, Z.M., Osman, S.M., & Cabral-Pinto, M.M.S. (2024). Review on biofuel production: Sustainable development scenario, environment, and climate change perspectives – A sustainable approach. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 12(2), 111996. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2024.111996>
 30. Qin, Y., Li, X., Wang, L., Luo, J., Li, Y., Yao, C., Xiao, Z., Zhai, S., & An, Q. (2022). Valuable cobalt/biochar with enriched surface oxygen-containing groups prepared from bio-waste shrimp shell for efficient peroxymonosulfate activation. *Separation and Purification Technology*, 281, 119901. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2021.119901>
 31. Qiu, B., Shao, Q., Shi, J., Yang, C., & Chu, H. (2022). Application of biochar for the adsorption of organic pollutants from wastewater: Modification strategies, mechanisms and challenges. *Separation and Purification Technology*, 300, 121925. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2022.121925>
 32. Rabah, M., Labeeb Ali, L., Raza, M., Inayat, A., & Altarawneh, M. (2026). Review on Carbonaceous Catalysts for Transesterification of Feedstock Toward Biodiesel Production: Advances, Challenges, and AI Perspectives. *Energy and Fuels*, 40(8), 3978–4017. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.5c04985>
 33. Ren, J., Zhang, Y., Wang, H., Huang, X., Jin, X., Zhang, K., Li, R., Yang, K., Yue, Y., Deng, L., & Che, D. (2024). Adsorption of dibenzofuran by modified biochar derived from microwave gasification: Impact factors and adsorption mechanism. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 183, 106831. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2024.106831>
 34. Ren, J., Yang, K., Li, Y., Bai, Y., Jiang, J., Huang, X., Deng, L., & Che, D. (2024). Catalytic gasification of large particle-size biomass with loaded AAEMs under oxygen-steam atmosphere. *Fuel*, 357, 130019. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.130019>
 35. Ren, J., Li, Y., Jin, X., Huang, X., Li, Y., Deng, L., & Che, D. (2024). Effects of inherent AAEMs on catalytic gasification of biomass with large particle size under oxygen-steam atmosphere. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 177, 106313. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2023.106313>
 36. Sadeghi, A., & Rahimpour, M.R. (2024). Pyrolysis of Municipal Biomass Wastes for Hydrogen Production. *Hydrogen Production from Renewable Resources and Wastes*, 112–132. <https://doi.org/10.1201/9781003382270-7>
 37. Sadeq, A., Schmitt, M., Wang, S., Rothberg, S., Pietsch-Braune, S., Shen, L., & Heinrich, S. (2026). μ CT based quantification of pellet char morphology: Effects of biomass pelletization and fluidized bed pyrolysis. *Fuel Processing Technology*, 281, 108377. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2025.108377>
 38. Song, K., Yuan, X., Zhang, H., Xiong, H., Yang, Z., & Han, L. (2022). A novel approach for 3D in situ visualization of morphological changes in dilute sulfuric acid-pretreated straw by micro-computed tomography. *Industrial Crops and Products*, 185, 115110. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2022.115110>
 39. Song, K., Xiong, H., Zhao, X., Wang, J., Yang, Z., & Han, L. (2024). In-situ registration subtraction image segmentation algorithm for spatiotemporal visualization of copper adsorption onto corn stalk-derived pellet biochar by micro-computed tomography. *Bioresource Technology*, 397, 130440. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2024.130440>
 40. Song, K., Zhao, X., Lai, S., Xiong, H., Kang, Z., Li, Y., Zhu, Z., Yang, Z., & Han, L. (2026). Pore-scale structure–activity mechanisms and spatiotemporal dynamics of Cu(II) adsorption on biochar revealed by in-situ 3D X-ray micro-CT. *Separation and Purification Technology*, 391, 137085. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2026.137085>
 41. Sun, B., Huo, J., Liu, H., Che, D., & Guo, S. (2023). Elucidation of synergistic effects in straw/sludge co-pyrolysis through gaseous product monitoring and biochar analysis. *Journal of the Energy Institute*, 106, 101151. <https://doi.org/10.1016/j.joei.2022.11.011>
 42. Sun, Y., Jiang, Q., Song, J., Hu, L., Yan, Z., Zhang, J., Liu, R., & Yan, J. (2025). Degradation of 4-chloroaniline in sulfidated nanoscale zero-valent iron loaded on biochar activated persulfate system: Batch and column experiments. *Separation and Purification Technology*, 370, 133102. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2025.133102>
 43. Videgain-Marco, M., Manyà, J.J., Vidal-Cortés, M., Correa, E.C., Diezma-Iglesias, B., & García-Ramos, F.J. (2021). Influence of feedstock and final pyrolysis temperature on breaking strength and dust production of wood-derived biochars. *Sustainability (Switzerland)*, 13(21), 11871. <https://doi.org/10.3390/su132111871>
 44. Xu, J., Zhang, S., Zhou, Y., Liu, S., Lang, S., Yang, J., & Wu, Y. (2022). Comparative study on the properties of wood vinegar prepared from the pretreated Chinese fir: Effect of hydrothermal parameters and hydrogen peroxide. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 167, 105674. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2022.105674>

45. Yang, H., Lee, C.-G., & Lee, J. (2023). Utilizing animal manure-derived biochar in catalytic advanced oxidation processes: A review. *Journal of Water Process Engineering*, 56, 104545. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2023.104545>
46. Zhang, Q., Chen, D., Xiao, W., Zhao, S., Ye, X., & Li, H. (2021). Synergistic effects of CO₂ and MgCl₂ on heavy metals removal and phosphorus recovery in biochar obtained from pyrolysis of swine sludge. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 158, 105245. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2021.105245>
47. Zhu, Y., Xie, R., Zhang, H., Gao, B., Liu, X., & Han, L. (2022). Micro-CT 3D Visualization Method of Different Species' Osseous Lacuna Morphological Structure. *Nongye Jixie Xuebao/Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 53(9), 374–381. <https://doi.org/10.6041/j.issn.1000-1298.2022.09.038>
48. Zhu, Y., Zhao, Q., Li, D., Li, J., & Guo, W. (2022). Performance comparison of phosphorus recovery from different sludges in sewage treatment plants through pyrolysis. *Journal of Cleaner Production*, 372, 133728. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.133728>
49. Zhu, Y., Wang, M., Huang, Y., Xie, R., Liu, X., & Han, L. (2023). In Situ 3D Visualization of Pore Structure Changes of Bone Char at Different Pyrolysis Temperatures by Micro-CT. *Nongye Jixie Xuebao/Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 54(9), 407–413. <https://doi.org/10.6041/j.issn.1000-1298.2023.09.040>
50. Zhuang, X., Gan, Z., Cen, K., Ba, Y., Chen, F., & Chen, D. (2022). Upgrading biochar by co-pyrolysis of heavy bio-oil and apricot shell using response surface methodology. *Fuel*, 310, 122447. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.122447>