

Karbon dari Bahan Alam sebagai Adsorben Ramah Lingkungan: Potensi, Tantangan, dan Aplikasinya

Manuntun Manurung^{1*}, Oka Ratnayani², Yenni Ciawi³

^{1,2}Program Studi Kimia, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Udayana, Badung, Indonesia

³Program Studi Doktor Ilmu Teknik, Fakultas Teknik, Universitas Udayana, Denpasar, Indonesia

*manuntun_manurung@unud.ac.id

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 5-5-2025

Revised: 21-5-2025

Accepted: 22-5-2025

Available online: 25-5-2025

ABSTRAK

Karbon dari bahan alam muncul sebagai solusi berkelanjutan untuk mengatasi berbagai jenis polutan dalam air dan udara. Tulisan ini mengulas berbagai aspek penting dari karbon dari bahan alam, mulai dari sumber bahan baku seperti limbah pertanian dan industri pangan, proses pembuatan melalui karbonisasi dan aktivasi, hingga fungsionalisasi untuk meningkatkan afinitas terhadap polutan spesifik. Berbagai aplikasi juga dibahas, termasuk penanganan logam berat, senyawa organik, zat warna sintesis, serta polutan baru seperti obat-obatan dan pestisida. Studi kasus menunjukkan adsorben ini sangat efektif dalam mengolah air limbah industri dan domestik. Namun, implementasi secara luas menghadapi tantangan seperti variabilitas bahan baku, kebutuhan proses aktivasi yang efisien, dan keterbatasan infrastruktur. Dengan pendekatan teknologi hibrida, desentralisasi produksi, dan integrasi dalam ekonomi sirkular, karbon dari bahan alam memiliki potensi besar sebagai alternatif karbon aktif konvensional. Tinjauan ini juga membahas pentingnya penelitian lanjutan dan kebijakan pendukung untuk mendorong pemanfaatan karbon alami sebagai adsorben ramah lingkungan di berbagai skala aplikasi.

KATA KUNCI: karbon dari bahan alam; adsorpsi; biomassa; pengolahan air limbah; teknologi hijau

ABSTRACT

Natural-based carbon has emerged as a sustainable solution for addressing a wide range of pollutants in water and air. This article reviews key aspects of natural carbon, from feedstock sources such as agricultural and food industry waste, production processes including carbonization and activation, to surface functionalization to enhance affinity for specific pollutants. Various applications are covered, including the treatment of heavy metals, organic compounds, synthetic dyes, and emerging contaminants such as pharmaceuticals and pesticides. Case studies demonstrate the high effectiveness of these adsorbents in treating industrial and domestic wastewater. However, large-scale implementation faces challenges such as raw material variability, the need for efficient activation processes, and infrastructure limitations. Through hybrid technologies, decentralized production, and integration into a circular economy, natural-based carbon holds great potential as an alternative to conventional activated carbon. This mini review highlights the importance of continued research and supportive policies to promote the adoption of environmentally friendly natural carbon adsorbents across various application scales.

KEYWORDS: natural carbon; adsorption; biomass; wastewater treatment; green technology



1. PENDAHULUAN

Karbon aktif secara luas dikenal sebagai adsorben serbaguna yang mampu menghilangkan berbagai jenis kontaminan dari udara dan air [1]. Secara konvensional, karbon aktif diproduksi menggunakan bahan baku tidak terbarukan seperti batu bara atau prekursor sintetis melalui proses bertemperatur tinggi yang memerlukan energi besar. Meskipun metode ini efektif, pendekatan tersebut menimbulkan kekhawatiran lingkungan dan ekonomi, terutama dalam konteks keberlanjutan dan perubahan iklim [2].

Dalam beberapa tahun terakhir, perhatian mulai beralih pada pemanfaatan sumber daya alam seperti residu pertanian, biomassa, dan limbah organik sebagai bahan baku alternatif untuk produksi karbon. Bahan-bahan ini tidak hanya tersedia secara melimpah dan berbiaya rendah, tetapi juga mendukung konsep daur ulang limbah (*waste valorization*) dan prinsip ekonomi sirkular. Karbon yang dihasilkan dari sumber-sumber ini sering disebut biochar atau karbon aktif berbasis alami dapat direkayasa agar memiliki sifat fisik dan kimia yang sesuai untuk proses adsorpsi yang efisien [3].

Tinjauan ini bertujuan untuk mengeksplorasi potensi karbon dari bahan alam sebagai adsorben ramah lingkungan. Pembahasan mencakup sumber bahan baku, metode produksi, teknik modifikasi permukaan, dan aplikasi praktisnya. Selain itu, dibahas pula tantangan teknis dan sosial ekonomi dalam upaya skala besar, serta arah pengembangan di masa depan untuk mengintegrasikan teknologi ini ke dalam sistem pengelolaan lingkungan yang berkelanjutan.

2. METODE

Literatur dikumpulkan melalui penelusuran sistematis di Google Scholar, PubMed-MEDLINE, dan ResearchGate, menggunakan kata kunci seperti karbon alami, adsorben biomassa, dan biochar. Pustaka yang dikaji mencakup publikasi yang membahas produksi, aktivasi, dan aplikasi karbon dalam pengolahan berbagai polutan, baik organik maupun anorganik. Sebanyak 43 referensi dianalisis, dengan rentang tahun terbit antara 2011 hingga 2025, kemudian disintesis secara kualitatif berdasarkan tema, efisiensi adsorpsi, dan tantangan implementasi di lapangan.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 SUMBER BAHAN KARBON DARI ALAM

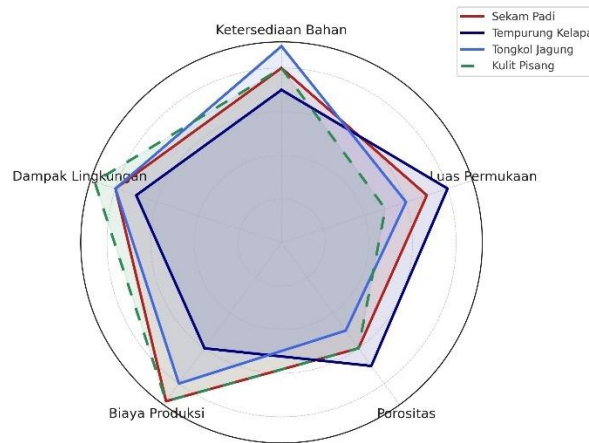
Sumber bahan alam untuk produksi karbon sangat beragam dan sebagian besar merupakan limbah atau produk samping dari sektor pertanian dan industri makanan (Tabel 1) [4]. Beberapa contoh mencakup:

- Limbah Pertanian: sekam padi, tongkol jagung, jerami gandum, sabut kelapa, tempurung kemiri, cangkang kelapa sawit.
- Limbah Industri Pangan: ampas tebu, biji kopi, kulit kacang, kulit pisang
- Bahan Organik Lain: eceng gondok, limbah tanaman herbal, rumput laut kering, cangkang kerang

Karakteristik penting bahan baku meliputi kandungan lignoselulosa, porositas alami, kandungan abu, dan kemudahan karbonisasi. Umumnya, bahan yang memiliki kandungan karbon tinggi dan kadar abu rendah lebih disukai.

Tabel 1. Contoh sumber bahan alam dan karakteristik umumnya [4]

Bahan Baku	Kandungan Utama	Kelebihan
Sekam padi	Silika, selulosa	Melimpah, mudah dikarbonisasi
Tongkol jagung	Selulosa, hemiselulosa	Struktur berpori baik
Sabut kelapa	Lignin, selulosa	Kuat secara mekanik
Kulit pisang	Selulosa, pati	Ketersediaan tinggi
Ampas tebu	Selulosa, lignin	Limbah industri, mudah diperoleh



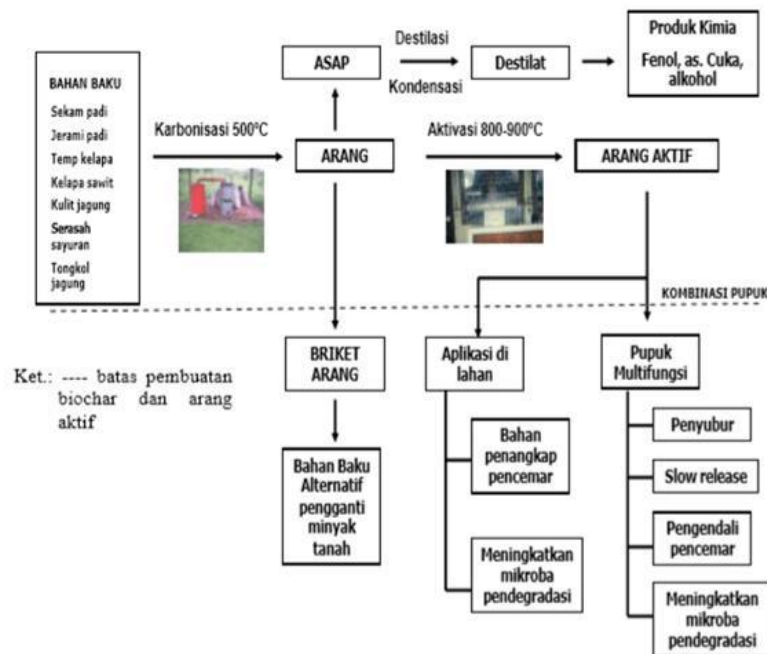
Gambar 1. Grafik radar evaluasi adsorben karbon dari bahan alam

Grafik radar pada Gambar 1 menggambarkan perbandingan karakteristik beberapa bahan alam berdasarkan kandungan karbon, porositas, dan kemudahan karbonisasi. Sekam padi dan sabut kelapa menunjukkan performa tinggi dalam aspek kemudahan pengolahan dan kekuatan struktur, sementara tongkol jagung unggul dalam porositas alami. Pemahaman ini penting dalam menentukan bahan baku yang optimal sesuai kebutuhan aplikasi adsorpsi.

3.2 PROSES PEMBUATAN KARBON DARI BAHAN ALAM

a. Karbonisasi

Karbonisasi adalah proses termal yang bertujuan untuk mengubah biomassa menjadi karbon melalui pemanasan dalam kondisi minim oksigen. Proses ini dilakukan pada suhu berkisar antara 300°C hingga 700°C. Selama karbonisasi, senyawa volatil seperti air, karbon dioksida, dan metana dihilangkan, menghasilkan residu padat kaya karbon yang disebut biochar atau arang (Gambar 2) [5].



Gambar 2. Diagram pembuatan arang aktif dan aplikasinya [5]

Jenis reaktor yang digunakan meliputi tungku statis, reaktor pirolisis kontinu, hingga teknologi modern seperti *microwave-assisted pyrolysis*. Suhu dan laju serta lamanya pemanasan memengaruhi struktur pori, luas permukaan, dan rendemen karbon. Pemanasan lambat cenderung menghasilkan karbon dengan struktur pori lebih stabil, sementara pemanasan cepat menghasilkan luas permukaan lebih besar [7].

b. Aktivasi

Proses aktivasi bertujuan untuk meningkatkan luas permukaan spesifik dan jumlah pori aktif yang berperan dalam adsorpsi. Aktivasi terbagi menjadi dua metode utama [8]:

- Aktivasi fisik dilakukan dengan memanaskan karbonasi awal menggunakan uap air atau gas CO_2 pada suhu tinggi ($700\text{--}900^\circ\text{C}$). Aktivasi ini memperbesar pori mikro dan meso secara bertahap.
- Aktivasi kimia melibatkan impregnasi bahan karbon dengan bahan kimia (misalnya KOH , ZnCl_2 , NaCl , H_3PO_4) sebelum atau setelah dipanaskan. Proses ini berlangsung pada suhu lebih rendah ($400\text{--}700^\circ\text{C}$) dan menghasilkan karbon dengan porositas lebih tinggi dan gugus aktif permukaan.

Pemilihan metode aktivasi bergantung pada jenis bahan baku dan aplikasi akhir. Aktivasi kimia menghasilkan karbon dengan luas permukaan lebih besar namun membutuhkan proses pencucian intensif pasca produksi.

c. Fungsionalisasi Permukaan

Penambahan gugus fungsi kimia tertentu pada permukaan karbon bertujuan untuk meningkatkan afinitas terhadap jenis polutan spesifik [9], [10]. Modifikasi dapat dilakukan dengan:

- Oksidasi menggunakan HNO_3 atau H_2O_2 untuk menambahkan gugus $-\text{OH}$, $-\text{COOH}$
- Aminasi untuk menambahkan gugus $-\text{NH}_2$
- *Loading* logam atau oksidanya melalui impregnasi ke dalam larutan garam seperti Fe , Zn , atau Mn , Fe_3O_4 , ZnO , MnO_2 untuk membentuk adsorben magnetik atau memperkuat interaksi dengan ion polutan.

Fungsionalisasi memperkuat adsorpsi melalui mekanisme kompleksasi, pertukaran ion, atau interaksi elektrostatik.

3.3 APLIKASI KARBON DARI BAHAN ALAM SEBAGAI ADSORBEN

Karbon dari bahan alam menunjukkan kemampuan yang menjanjikan dalam mengadsorpsi berbagai jenis polutan dari air dan udara. Efektivitas adsorpsi sangat dipengaruhi oleh sifat fisikokimia karbon, seperti luas permukaan, ukuran pori, dan keberadaan gugus fungsi aktif pada permukaan. Dalam berbagai studi, karbon berbasis biomassa telah digunakan untuk mengatasi polutan organik dan anorganik, termasuk logam berat, pewarna tekstil, senyawa fenolik, serta gas berbahaya seperti CO_2 dan H_2S pollutants (Gambar 2) [5].

a. Adsorpsi Logam Berat

Logam berat seperti Pb^{2+} , Cd^{2+} , Cr^{6+} , Hg^{2+} , dan Cu^{2+} sering ditemukan dalam limbah industri dan berpotensi toksik terhadap lingkungan serta kesehatan manusia. Karbon alami, yang berasal dari sekam padi, jerami padi, batok kelapa, cangkang sawit, terutama yang telah mengalami aktivasi dan penambahan gugus fungsi, dapat mengadsorpsi ion logam melalui mekanisme pertukaran ion, kompleksasi dengan gugus fungsional, dan interaksi elektrostatik [13], [14], [15].

Sebagai contoh, karbon dari cangkang kelapa sawit yang diaktifkan dengan H_3PO_4 menunjukkan kapasitas adsorpsi Pb^{2+} dan Cr^{6+} 99% and lebih dari 80% untuk Zn^{2+} and Cd^{2+} [13] karena adanya gugus fosfat dan karboksilat yang bersifat afinitif terhadap ion logam. Penggunaan karbon terimpregnasi Fe juga populer dalam adsorpsi Cr^{6+} karena mampu mereduksi Cr^{6+} menjadi Cr^{3+} yang kurang toksik, sebelum diadsorpsi.

b. Adsorpsi Zat Organik dan Pewarna Sintetis

Zat warna sintetik seperti metilen biru, rhodamin B, dan malachite green merupakan polutan yang umum ditemukan dalam limbah tekstil. Karbon dari limbah pertanian seperti tempurung kemiri dan kulit pisang telah terbukti efektif mengadsorpsi pewarna ini. Mekanisme yang terlibat meliputi adsorpsi fisik (van der Waals), interaksi $\pi\text{-}\pi$ antara permukaan aromatik karbon dan struktur cincin pewarna, serta interaksi elektrostatik jika permukaan karbon bermuatan negatif.

Dalam beberapa penelitian, karbon yang diaktifkan dengan ZnCl_2 menunjukkan kapasitas adsorpsi metilen biru yang lebih tinggi dibanding karbon non-aktivasi, berkat peningkatan porositas dan luas permukaan spesifik yang signifikan ($>800\text{ m}^2/\text{g}$).

Karbon alami berbahan tongkol jagung dan sabut kelapa dapat menyerap pewarna sintetik seperti metilen biru dan congo merah. Polutan organik lain seperti fenol and pestisida juga dijerap dengan sangat baik, yang bergantung pada pH, waktu kontak, dan temperatur [16], [17].

c. Aplikasi pada Air Limbah Rumah Tangga dan Industri

Karbon dari bahan alam juga telah diuji dalam pengolahan air limbah domestik dan industri. Adsorben ini mampu menurunkan kadar Chemical Oxygen Demand (COD), Biological Oxygen Demand (BOD), dan Total Suspended Solid (TSS). Kombinasi karbon alam dengan teknologi lain seperti filtrasi membran, koagulasi, atau proses ozonasi meningkatkan efisiensi pengolahan air limbah secara keseluruhan.

Contohnya, karbon dari ampas tebu dapat digunakan sebagai media filter dalam sistem pengolahan air skala rumah tangga, menggantikan karbon aktif komersial yang lebih mahal. Penggunaan ini sangat relevan di perdesaan atau daerah terpencil.

d. Adsorpsi Gas dan Udara

Dalam aplikasi udara, karbon dari biomassa telah dimanfaatkan untuk menyerap gas berbahaya seperti H_2S , amonia, dan senyawa organik volatil (VOCs). Aktivasi dan impregnasi logam tertentu seperti Zn atau Cu dapat meningkatkan afinitas terhadap gas tertentu. Selain itu, karbon ini juga dapat digunakan sebagai bahan dalam masker udara atau penyaring ruangan.

e. Adsorpsi Senyawa Polutan Baru

Polutan baru seperti obat-obatan, hormon, dan pestisida juga menjadi perhatian baru dalam pengolahan air. Beberapa studi telah menunjukkan bahwa karbon dari limbah herbal atau rumput laut, setelah dimodifikasi secara kimia, dapat menyerap senyawa seperti paracetamol, ibuprofen, atau atrazin dengan efektivitas yang cukup baik, membuka peluang untuk pengembangan adsorben generasi baru (Tabel 2) [18].

Karbon termodifikasi berbahan kulit pisang dan ampas tebu menghilangkan kontaminan baru seperti antibiotik dan hormon dengan efisiensi lebih dari 80% melalui ikatan hidrogen ikatan π - π [19], [20], [21]. Biji kelor (*Moringa oleifera*) sebagai biosorben banyak diteliti untuk mengolah air limbah yang mengandung logam berat, pestisida, bahan farmasi, dan pigmen [22].

Tabel 2. Aplikasi karbon dari bahan alam berdasarkan jenis polutan

Jenis Polutan	Contoh Karbon Alam	Mekanisme Utama	Referensi Umum
Pb^{2+} , Cr^{6+} , Cd^{2+}	Sabut kelapa, tongkol jagung, ampas tebu, biji kelor	Kompleksasi, pertukaran ion	[22]
Metilen biru	Tempurung kelapa, kulit pisang	Interaksi π - π , adsorpsi fisik	[23]
Atrazin, paracetamol	Rumput laut, limbah herbal	Interaksi elektrostatis, hidrofobik	[18]
H_2S , NH_3	Karbon aktif dari sabut kelapa, tongkol jagung	Adsorpsi permukaan, reaksi kimia	[24, 25]

3.4 TANTANGAN DAN PROSPEK MASA DEPAN

Meskipun karbon dari bahan alam menawarkan berbagai keunggulan, implementasi luasnya masih menghadapi sejumlah tantangan yang harus diatasi melalui pendekatan multidisipliner dan inovatif [26].

a. Tantangan Teknis

Salah satu tantangan utama adalah variabilitas sifat bahan baku, yang berasal dari keragaman komposisi kimia dan struktur fisik biomassa. Misalnya, sekam padi memiliki kandungan silika tinggi yang bisa menurunkan efektivitas adsorpsi jika tidak diproses dengan benar. Oleh karena itu, diperlukan standarisasi proses dan karakterisasi bahan baku untuk menjamin konsistensi kualitas produk akhir [27], [28].

Selain itu, proses aktivasi kimia seringkali menghasilkan limbah cair yang mengandung senyawa korosif atau toksik. Pengelolaan limbah ini memerlukan biaya tambahan dan infrastruktur pendukung, yang dapat membatasi penerapan pada skala industri. Sementara itu, aktivasi fisik membutuhkan suhu tinggi dan konsumsi energi besar, sehingga perlu dicari solusi teknologi dengan efisiensi energi yang lebih baik [28].

Tantangan lain adalah ketahanan adsorben terhadap regenerasi. Beberapa karbon alami menunjukkan penurunan kinerja signifikan setelah beberapa siklus penggunaan, terutama jika digunakan untuk mengadsorpsi senyawa organik kompleks atau logam berat dengan ikatan kuat [28].

b. Tantangan Ekonomi dan Infrastruktur

Secara ekonomi, biaya awal untuk membangun fasilitas produksi karbon dari bahan alam masih cukup tinggi, terutama jika teknologi modern seperti pirolisis suhu tinggi atau aktivasi *microwave* digunakan. Di negara berkembang, keterbatasan modal dan infrastruktur dapat menghambat pengembangan industri adsorben alami [26].

Selain itu, belum adanya rantai pasok terintegrasi antara penghasil limbah biomassa, produsen karbon aktif, dan pengguna akhir (misalnya industri pengolahan air) menyebabkan efisiensi pemanfaatan bahan baku masih rendah. Kolaborasi antar sektor dan insentif kebijakan sangat dibutuhkan untuk membangun ekosistem sirkular yang mendukung teknologi ini [26].

c. Prospek Masa Depan

Meskipun menghadapi berbagai kendala, prospek penggunaan karbon dari bahan alam sangat menjanjikan. Beberapa pendekatan yang dapat memperkuat peran teknologi ini ke depan antara lain:

- Teknologi hibrida yang menggabungkan karbon alami dengan membran atau proses oksidasi canggih dapat meningkatkan kinerja [29].
- Integrasi teknologi hijau dan otomatisasi, seperti reaktor pirolisis berbasis energi surya atau sistem pemantauan digital untuk kontrol kualitas karbon, dapat meningkatkan efisiensi dan menurunkan biaya operasional [30], [31].
- Pengembangan adsorben multifungsi (misalnya karbon-zeolit atau karbon-oksida logam) dapat menciptakan adsorben multifungsi [32]. Misalnya, karbon berfungsi ganda sebagai antimikroba, katalis, atau konduktor listrik, akan memperluas bidang aplikasinya ke sektor energi dan elektronik [33].
- Pemanfaatan limbah lokal dan spesifik wilayah dapat menjadi strategi desentralisasi produksi karbon alami. Misalnya, daerah pesisir dengan limbah rumput laut kering atau cangkang kerang bisa dikembangkan menjadi sentra produksi karbon dengan karakter unik [34].
- Pendekatan ekonomi sirkular, di mana limbah organik dari pertanian dan industri pangan dikonversi menjadi produk bernilai tinggi, akan memperkuat ketahanan lingkungan dan ekonomi masyarakat lokal [35].

Secara regulasi, dukungan dari pemerintah dan lembaga riset dalam bentuk insentif, hibah riset, serta standar mutu nasional akan sangat penting untuk mempercepat komersialisasi teknologi ini.

3.5 STUDI KASUS DAN APLIKASI NYATA

Pemanfaatan karbon dari bahan alam sebagai adsorben telah diujicobakan dan diaplikasikan dalam berbagai konteks nyata, baik dalam skala laboratorium maupun lapangan. Studi-studi ini memberikan gambaran konkret mengenai efektivitas, efisiensi, dan tantangan operasional dari penggunaan karbon alami sebagai solusi pengolahan lingkungan [35].

a. Sekam Padi untuk Pengolahan Air Limbah Tekstil

Salah satu studi yang cukup komprehensif yang memanfaatkan karbon aktif dari sekam padi untuk mengadsorpsi zat warna sintetik (misalnya metilen biru) dari air limbah industri tekstil. Karbon aktif dihasilkan melalui karbonisasi pada suhu 500°C diikuti aktivasi kimia menggunakan H_3PO_4 [36]. Hasilnya menunjukkan efisiensi adsorpsi mencapai 85–95% dalam waktu kontak 60 menit. Model isoterm Langmuir menunjukkan kapasitas maksimum adsorpsi sebesar 150 mg/g. Karakterisasi FTIR mengindikasikan adanya gugus -OH dan -COOH aktif pada permukaan karbon (Tabel 3) [36].

Tabel 3. Parameter kinerja adsorpsi sekam padi untuk metilen biru

Parameter	Nilai
Kapasitas Adsorpsi	150 mg/g
pH optimum	6,5
Waktu kontak	60 menit
Efisiensi maksimum	95%
Model isoterm dominan	Langmuir

Studi ini menunjukkan bahwa karbon dari limbah pertanian lokal mampu bersaing dengan karbon komersial dalam hal efektivitas adsorpsi, sekaligus menawarkan solusi lokal berbasis ekonomi sirkular.

b. Tempurung Kelapa untuk Penyaringan Air Rumah Tangga

Tempurung kelapa telah digunakan secara luas sebagai bahan karbon aktif untuk unit penyaringan air rumah tangga. Setelah diaktifkan secara fisik menggunakan uap pada suhu 800°C, karbon dimasukkan ke dalam sistem saringan berlapis (pasir-karbon aktif-kerikil) [37]. Aplikasi ini terbukti mampu mengurangi konsentrasi zat organik, kekeruhan, dan logam berat seperti Pb^{2+} dan Cd^{2+} hingga 70–90%. Keunggulan dari adsorben ini adalah harganya yang murah, tersedia lokal, dan dapat diregenerasi secara sederhana menggunakan pemanasan ulang atau perendaman alkali.

Studi ini juga mencatat bahwa keberhasilan sistem tergantung pada ketebalan lapisan karbon, laju alir, dan frekuensi penggantian material. Sistem ini sangat relevan untuk daerah terpencil yang tidak memiliki akses terhadap pengolahan air terpusat.

c. Adsorben Magnetik dari Ampas Tebu untuk Logam Berat

Karbon magnetik berhasil dikembangkan dari ampas tebu yang dimodifikasi dengan partikel Fe_3O_4 . Adsorben ini ditujukan untuk pemisahan cepat ion logam berat seperti Cr(VI) dari air limbah industri pelapisan logam [38].

Karbon diaktivasi kimia menggunakan KOH dan kemudian direndam dalam larutan FeCl_3 untuk memperoleh sifat magnetik. Penggunaan magnet eksternal memungkinkan pemisahan adsorben dari larutan dalam waktu kurang dari 2 menit, mengurangi kebutuhan penyaringan konvensional.

Efisiensi penghilangan Cr(VI) melebihi 90% dalam kondisi pH 5 dan waktu kontak 45 menit. Selain itu, adsorben dapat digunakan kembali hingga lima siklus tanpa penurunan signifikan kinerja.

d. Tempurung Kelapa dan Sekam Padi

Di Ghana, para peneliti telah memanfaatkan tempurung kelapa—limbah pertanian yang melimpah—untuk mengatasi pencemaran logam berat dari air limbah pertambangan. Setelah melalui proses karbonisasi dan aktivasi menggunakan asam fosfat, karbon aktif dari tempurung kelapa ini berhasil menurunkan konsentrasi timbal (Pb^{2+}) hingga lebih dari 90% hanya dalam waktu dua jam. Menariknya, adsorben ini masih mempertahankan efisiensi penyerapannya hingga siklus regenerasi ke tiga, menjadikannya alternatif yang tidak hanya ramah lingkungan, tetapi juga ekonomis untuk wilayah tropis yang kaya sumber daya biomassa [39].

Sekam padi telah diubah menjadi karbon aktif untuk menangani limbah cair dari industri tekstil. Adsorben berbasis sekam padi digunakan untuk menghilangkan pewarna sintetis dan mengurangi kadar COD (*Chemical Oxygen Demand*) yang tinggi dalam limbah. Hasilnya menunjukkan bahwa lebih dari 85% warna berhasil dihilangkan dan penurunan signifikan COD tercapai dalam waktu kurang dari dua jam. Keberhasilan ini tidak hanya membuktikan efektivitas sekam padi sebagai adsorben, tetapi juga memberikan solusi bagi industri tekstil kecil dan menengah dalam mengelola limbahnya secara berkelanjutan [40].

e. Eceng Gondok dan Kulit Pisang sebagai Adsorben Alternatif

Eceng gondok, tumbuhan air invasif yang sering dianggap gulma, justru diolah menjadi karbon aktif untuk mengatasi eutrofikasi di danau. Konsentrasi nutrisi seperti nitrat dan fosfat dapat diturunkan secara signifikan. Inisiatif ini menunjukkan bahwa masalah lingkungan yang ditimbulkan oleh invasi spesies tertentu dapat diubah menjadi solusi untuk permasalahan lingkungan lainnya, menciptakan sebuah siklus pemanfaatan yang berkelanjutan [41].

Tak kalah menarik, penelitian di Ethiopia menunjukkan bagaimana kulit pisang, limbah organik rumah tangga yang umum ditemukan, dapat dimanfaatkan untuk menyerap kromium heksavalen (Cr^{6+}), logam berat beracun yang umum ditemukan dalam limbah industri penyamakan kulit dan industri tekstil [42]. Setelah melalui proses aktivasi, karbon dari kulit pisang mampu menyerap hingga 85% kandungan Cr^{6+} dari larutan air limbah. Efektivitas ini tetap tinggi bahkan setelah beberapa kali digunakan ulang, yang menunjukkan potensi besar dalam aplikasi skala kecil maupun menengah [43].

Untuk memperjelas perbandingan efektivitas dan karakteristik masing-masing studi kasus, ringkasan parameter utama dari setiap aplikasi adsorben berbasis bahan alam disajikan dalam Tabel 4.

Tabel 4. Ringkasan Hasil Studi Kasus Pemanfaatan Karbon dari Bahan Alam

Bahan Baku	Target Polutan	Efisiensi Adsorpsi	Kondisi Operasi	Daya Guna Tambahan	Referensi
Sekam padi	Metilen biru	85–95%	pH 6,5; 60 menit; 150 mg/g	Kapasitas tinggi, mudah diproses	[36], [40]
Tempurung kelapa	Pb^{2+} , Cd^{2+}	70–90%	Aktivasi uap; 800°C	Dapat diregenerasi, biaya rendah	[37], [39]
Ampas tebu + Fe_3O_4	Cr(VI)	>90%	pH 5; 45 menit; ≤5 siklus reuse	Magnetik, pemisahan cepat	[38]
Kulit pisang	Cr^{6+}	~85%	Aktivasi kimia	Efektif, tetap stabil setelah reuse	[42], [43]
Eceng gondok	Nitrat, fosfat	Tidak disebutkan	Digunakan untuk eutrofikasi	Solusi untuk tanaman invasive	[41]

Studi-studi kasus yang telah diuraikan secara komprehensif mengindikasikan bahwa karbon berbasis bahan alam tidak hanya menunjukkan potensi signifikan pada tingkat laboratorium, tetapi juga memiliki kelayakan teknis

dan ekonomis untuk diimplementasikan dalam skala lapangan. Efektivitas pemanfaatan adsorben ini sangat dipengaruhi oleh sejumlah faktor krusial, antara lain metode aktivasi yang digunakan, desain sistem aplikasi, ketersediaan bahan baku lokal, serta dukungan dari masyarakat dan kelembagaan terkait.

Secara kumulatif, temuan-temuan tersebut memberikan bukti kuat bahwa adsorben dari bahan alam memiliki kapasitas teknis yang kompetitif dan fleksibel terhadap kondisi geografis dan sosial setempat. Berbagai jenis biomassa seperti tempurung kelapa, sekam padi, eceng gondok, dan kulit pisang yang selama ini dianggap sebagai limbah, justru dapat dikonversi menjadi material fungsional bernilai tinggi. Ketika dikelola melalui pendekatan ilmiah dan teknologi yang tepat, transformasi limbah ini tidak hanya mampu menjawab tantangan pencemaran air, tetapi juga berkontribusi pada penguatan ekonomi sirkular dan pemberdayaan komunitas lokal secara berkelanjutan.

4. KESIMPULAN

Pemanfaatan karbon dari bahan alam sebagai adsorben ramah lingkungan telah menunjukkan potensi besar dalam pengolahan air dan udara, baik dari segi efektivitas teknis, ketersediaan sumber daya, maupun keberlanjutan lingkungan. Sumber bahan baku yang melimpah, seperti limbah pertanian dan industri pangan, dapat dikonversi menjadi karbon aktif melalui proses karbonisasi, aktivasi, dan fungsionalisasi yang relatif sederhana dan ekonomis.

Meskipun demikian, terdapat tantangan yang perlu diatasi untuk menjadikan adsorben alami sebagai solusi praktis dan berkelanjutan. Beberapa tantangan tersebut meliputi variasi kualitas bahan baku, konsistensi proses produksi, keterbatasan regenerasi adsorben, serta kebutuhan untuk mengintegrasikan teknologi ini ke dalam sistem pengolahan yang ada. Selain itu, aspek keselamatan, toksisitas residu, dan efisiensi dalam skala besar juga perlu diperhatikan.

Rekomendasi untuk pengembangan ke depan antara lain:

1. **Optimalisasi Proses Produksi**
Penelitian lebih lanjut dibutuhkan untuk mengoptimalkan parameter karbonisasi dan aktivasi guna menghasilkan adsorben dengan karakteristik terbaik sesuai aplikasi target.
2. **Integrasi dengan Teknologi Lain**
Kombinasi dengan teknik lain seperti filtrasi membran, ozonisasi, atau sistem magnetik dapat meningkatkan efisiensi pemisahan dan regenerasi adsorben.
3. **Skalabilitas dan Komersialisasi**
Perlu didorong upaya translasional dari skala laboratorium ke skala industri melalui pilot project berbasis komunitas atau kerja sama dengan UMKM.
4. **Standarisasi dan Regulasi**
Diperlukan panduan teknis atau standar nasional untuk menjamin mutu, keamanan, dan keandalan produk karbon alami sebagai bahan pengolahan lingkungan.
5. **Pendidikan dan Sosialisasi**
Peningkatan kesadaran masyarakat dan pelatihan teknis sangat penting agar pemanfaatan karbon alami dapat dilakukan secara mandiri dan berkelanjutan di tingkat lokal.

Dengan pendekatan yang tepat, karbon dari bahan alam tidak hanya menjawab kebutuhan teknis dalam pengolahan limbah, tetapi juga menjadi bagian dari strategi ekonomi sirkular dan pembangunan rendah karbon. Masa depan adsorben hijau ini bergantung pada kolaborasi multidisiplin antara peneliti, pemerintah, sektor industri, dan masyarakat.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] R. Ganjoo, S. Sharma, A. Kumar, and M. M. A. Daouda, "Activated Carbon: Fundamentals, Classification, and Properties," in *Activated Carbon*, 1st ed., C. Verma and M. A. Quraishi, Eds., The Royal Society of Chemistry, 2023, pp. 1–22. doi: 10.1039/BK9781839169861-00001.
- [2] J. Jagwe, P. W. Olupot, E. Menya, and H. M. Kalibbala, "Synthesis and Application of Granular Activated Carbon from Biomass Waste Materials for Water Treatment: A Review," *Journal of Bioresources and Bioproducts*, vol. 6, no. 4, pp. 292–322, Nov. 2021, doi: 10.1016/j.jobab.2021.03.003.
- [3] T. Khandaker *et al.*, "Biomass-Derived Carbon Materials for Sustainable Energy Applications: A Comprehensive Review," *Sustainable Energy Fuels*, vol. 9, no. 3, pp. 693–723, 2025, doi: 10.1039/D4SE01393J.

- [4] C. V. Rode and S. E. Kondawar, "Chemo-Catalytic Conversion of Lignin Derived Molecules to Speciality Chemicals," in *Biomass, Biofuels, Biochemicals*, Elsevier, 2021, pp. 267–299. doi: 10.1016/B978-0-12-820294-4.00005-3.
- [5] A. N. Ardiwinata, "Pemanfaatan Arang Aktif dalam Pengendalian Residu Pestisida di Tanah: Prospek dan Masalahnya," *Jurnal Lahan*, vol. 14, no. 1, p. 49, Jul. 2020, doi: 10.21082/jsdl.v14n1.2020.49-62.
- [6] A. G. Adeniyi, K. O. Iwuozor, E. C. Emenike, O. J. Ajala, S. Ogunniyi, and K. B. Muritala, "Thermochemical Co-Conversion of Biomass-Plastic Waste to Biochar: A Review," *Green Chemical Engineering*, vol. 5, no. 1, pp. 31–49, Mar. 2024, doi: 10.1016/j.gce.2023.03.002.
- [7] K. Czerwińska, M. Śliz, and M. Wilk, "Hydrothermal Carbonization Process: Fundamentals, Main Parameter Characteristics and Possible Applications Including an Effective Method of Sars-Cov-2 Mitigation in Sewage Sludge. a Review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 154, p. 111873, Feb. 2022, doi: 10.1016/j.rser.2021.111873.
- [8] M. Afshar and S. Mofatteh, "Biochar for a Sustainable Future: Environmentally Friendly Production and Diverse Applications," *Results in Engineering*, vol. 23, p. 102433, Sep. 2024, doi: 10.1016/j.rineng.2024.102433.
- [9] X. Dong *et al.*, "Mechanisms of Adsorption and Functionalization of Biochar for Pesticides: A Review," *Ecotoxicology and Environmental Safety*, vol. 272, p. 116019, Mar. 2024, doi: 10.1016/j.ecoenv.2024.116019.
- [10] S. Nasrollahpour, R. Pulicharla, and S. K. Brar, "Functionalized Biochar for the Removal of Poly- and Perfluoroalkyl Substances in Aqueous Media," *iScience*, vol. 28, no. 3, p. 112113, Mar. 2025, doi: 10.1016/j.isci.2025.112113.
- [11] H. Heryanto *et al.*, "Carbon as a Multifunctional Material in Supporting Adsorption Performance for Water Treatment: Science Mapping and Review," *Desalination and Water Treatment*, vol. 320, p. 100758, Oct. 2024, doi: 10.1016/j.dwt.2024.100758.
- [12] M. S. Soffian, F. Z. Abdul Halim, F. Aziz, M. A. Rahman, M. A. Mohamed Amin, and D. N. Awang Chee, "Carbon-Based Material Derived from Biomass Waste for Wastewater Treatment," *Environmental Advances*, vol. 9, p. 100259, Oct. 2022, doi: 10.1016/j.envadv.2022.100259.
- [13] R. Baby and M. Z. Hussein, "Ecofriendly Approach for Treatment of Heavy-Metal-Contaminated Water Using Activated Carbon of Kernel Shell of Oil Palm," *Materials*, vol. 13, no. 11, p. 2627, Jun. 2020, doi: 10.3390/ma13112627.
- [14] E. Widyasari, Supriadi, and I. Said, "Adsorption Capacity of Activated Charcoal Made of Rice Husk on Cd(II) Metal Ions," *Jurnal Akadeika Kimia*, vol. 10, no. 4, pp. 2013–7, 2024, doi: 10.22487/j24775185.2021.v10.i4.pp213-217.
- [15] A. A. G. S. Wiguna, I. B. P. Mardana, and P. Artawan, "Synthesis and Characterization of Activated Carbon Prepared from Rice Husk by Physics-Chemical Activation," *IPR*, vol. 7, no. 2, pp. 281–290, May 2024, doi: 10.29303/ipr.v7i2.311.
- [16] M. H. Dehghani *et al.*, "Recent Advances on Sustainable Adsorbents for the Remediation of Noxious Pollutants from Water and Wastewater: A Critical Review," *Arabian Journal of Chemistry*, vol. 16, no. 12, p. 105303, Dec. 2023, doi: 10.1016/j.arabjc.2023.105303.
- [17] P. O. Oladoye, T. O. Ajiboye, E. O. Omotola, and O. J. Oyewola, "Methylene Blue Dye: Toxicity and Potential Elimination Technology from Wastewater," *Results in Engineering*, vol. 16, p. 100678, Dec. 2022, doi: 10.1016/j.rineng.2022.100678.
- [18] J. Virkutyte, Ed., *Treatment of Micropollutants in Water and Wastewater*, Nachdr. in Integrated environmental technology series. London: IWA Publ, 2011.
- [19] O. J. Al-sareji, R. A. Grmasha, M. Meiczinger, R. A. Al-Juboori, V. Somogyi, and K. S. Hashim, "A Sustainable Banana Peel Activated Carbon for Removing Pharmaceutical Pollutants from Different Waters: Production, Characterization, and Application," *Materials*, vol. 17, no. 5, p. 1032, Feb. 2024, doi: 10.3390/ma17051032.
- [20] C. Deb *et al.*, "Design and Analysis for the Removal of Active Pharmaceutical Residues from Synthetic Wastewater Stream," *Environ Sci Pollut Res*, vol. 26, no. 18, pp. 18739–18751, Jun. 2019, doi: 10.1007/s11356-019-05070-9.
- [21] M. E. Peñafiel, J. M. Matesanz, E. Vanegas, D. Bermejo, R. Mosteo, and M. P. Ormad, "Comparative Adsorption of Ciprofloxacin on Sugarcane Bagasse from Ecuador and on Commercial Powdered Activated Carbon," *Science of The Total Environment*, vol. 750, p. 141498, Jan. 2021, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.141498.
- [22] K. Comet Manesa and Z. Dyosi, "Review on *Moringa Oleifera* , a Green Adsorbent for Contaminants Removal: Characterization, Prediction, Modelling and Optimization Using Response Surface Methodology (rsm) and Artificial Neural Network (ann)," *Journal of Environmental Science and Health, Part A*, vol. 58, no. 13, pp. 1014–1027, Nov. 2023, doi: 10.1080/10934529.2023.2291977.

- [23] R. H. Khuluk, A. Rahmat, Buhani, and Suharso, "Pembuatan Dan Karakterisasi Karbon Aktif Dari Tempurung Kelapa (*Cocos nucifera* L.) Sebagai Adsorben Zat Warna Metilen Biru," *Indonesian Journal of Science and Technology*, vol. 4, no. 2, pp. 229–240, 2019, doi: <http://dx.doi.org/10.17509/ijost.v4i2.18179>.
- [24] R. A. Ningrum, R. T. Salawali, M. D. Arief, J. G. A'Ban, and A. D. Putri, "Physical-Chemical Characterization of Activated Charcoal from Coconut Shells as an Adsorbent in Reducing Ammonia (NH₃) Content in Nickel Industry Liquid Waste," *Satera*, vol. 3, no. 1, 2025, Accessed: Jun. 06, 2025. [Online]. Available: <https://journal.akom-bantaeng.ac.id/index.php/jstt/article/view/73/59>
- [25] T. Berhe Gebreegziabher, S. Wang, and H. Nam, "Adsorption of H₂S, NH₃ and TMA from indoor air using porous corncob activated carbon: Isotherm and kinetics study," *Journal of Environmental Chemical Engineering*, vol. 7, no. 4, p. 103234, Aug. 2019, doi: 10.1016/j.jece.2019.103234.
- [26] S. Satyam and S. Patra, "Innovations and Challenges in Adsorption-Based Wastewater Remediation: A Comprehensive Review," *Heliyon*, vol. 10, no. 9, p. e29573, May 2024, doi: 10.1016/j.heliyon.2024.e29573.
- [27] D. Barker-Rothschild *et al.*, "Lignin-Based Porous Carbon Adsorbents for CO₂ Capture," *Chem. Soc. Rev.*, vol. 54, no. 2, pp. 623–652, 2025, doi: 10.1039/D4CS00923A.
- [28] A. Vinod, H. Pulikkalparambil, P. Jagadeesh, S. M. Rangappa, and S. Siengchin, "Recent Advancements in Lignocellulose Biomass-Based Carbon Fiber: Synthesis, Properties, and Applications," *Heliyon*, vol. 9, no. 3, p. e13614, Mar. 2023, doi: 10.1016/j.heliyon.2023.e13614.
- [29] J. F. Nure and T. T. I. Nkambule, "The Recent Advances in Adsorption and Membrane Separation and Their Hybrid Technologies for Micropollutants Removal from Wastewater," *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, vol. 126, pp. 92–114, Oct. 2023, doi: 10.1016/j.jiec.2023.06.034.
- [30] M. M. Hasan, R. Haque, M. I. Jahirul, and M. G. Rasul, "Pyrolysis of plastic waste for sustainable energy Recovery: Technological advancements and environmental impacts," *Energy Conversion and Management*, vol. 326, p. 119511, Feb. 2025, doi: 10.1016/j.enconman.2025.119511.
- [31] F. Ullah, K. Hasrat, M. Mu, S. Wang, and S. Kumar, "Optimizing Solar–Biomass Pyrolysis: Innovations in Reactor Design and Thermal–Solar System Efficiency," *Energies*, vol. 18, no. 10, p. 2640, May 2025, doi: 10.3390/en18102640.
- [32] D. Smržová *et al.*, "Carbon and Zeolite-Based Composites for Radionuclide and Heavy Metal Sorption," *Heliyon*, vol. 8, no. 12, p. e12293, Dec. 2022, doi: 10.1016/j.heliyon.2022.e12293.
- [33] M. S. Akhtar, S. Ali, and W. Zaman, "Innovative Adsorbents for Pollutant Removal: Exploring the Latest Research and Applications," *Molecules*, vol. 29, no. 18, p. 4317, Sep. 2024, doi: 10.3390/molecules29184317.
- [34] M. Y. Arshad, V. Hessel, A. Halog, D. Lewis, and N. N. Tran, "Decentralisation Transition in the Chemical, Energy, and Waste Management Sectors: Innovations, Opportunities, and Sustainable Pathways – a Review," *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 76, p. 104307, Apr. 2025, doi: 10.1016/j.seta.2025.104307.
- [35] S. Saxena, M. P. Moharil, P. V. Jadhav, B. Ghodake, R. Deshmukh, and A. P. Ingle, "Transforming waste into wealth: Leveraging nanotechnology for recycling agricultural byproducts into value-added products," *Plant Nano Biology*, vol. 11, p. 100127, Feb. 2025, doi: 10.1016/j.plana.2024.100127.
- [36] K. K. Hummadi, S. Luo, and S. He, "Adsorption of methylene blue dye from the aqueous solution via bio-adsorption in the inverse fluidized-bed adsorption column using the torrefied rice husk," *Chemosphere*, vol. 287, p. 131907, Jan. 2022, doi: 10.1016/j.chemosphere.2021.131907.
- [37] S. Mohd Samdin, L. H. Peng, and M. Marzuki, "Investigation of Coconut Shells Activated Carbon as the Cost Effective Absorbent in Drinking Water Filter," *Jurnal Teknologi*, vol. 77, no. 22, Dec. 2013, doi: 10.11113/jt.v77.6656.
- [38] S. Mahawong *et al.*, "Single-Step Upcycling of Sugarcane Bagasse and Iron Scrap into Magnetic Carbon for High-Performance Adsorbents," *Molecules*, vol. 30, no. 9, p. 2040, May 2025, doi: 10.3390/molecules30092040.
- [39] W. K. Buah and J. R. Dankwah, "Sorption of Heavy Metals from Mine Wastewater by Activated Carbons Prepared from Coconut Husk," *GM*, vol. 16, no. 2, pp. 36–41, Dec. 2016, doi: 10.4314/gm.v16i2.5.
- [40] F. Zulti, N. Setiadewi, A. Waluyo, and E. Susanti, "Removal Pollutants in Textile Wastewater Using Unmodified Rice Husk," *E3S Web Conf.*, vol. 483, p. 02008, 2024, doi: 10.1051/e3sconf/202448302008.
- [41] O. I. Ayanda, T. Ajayi, and F. P. Asuwaju, "*Eichhornia crassipes* (Mart.) Solms: Uses, Challenges, Threats, and Prospects," *The Scientific World Journal*, vol. 2020, pp. 1–12, Jul. 2020, doi: 10.1155/2020/3452172.
- [42] B. Ameha, T. T. Nadew, T. S. Tedla, B. Getye, D. A. Mengie, and S. Ayalneh, "The use of banana peel as a low-cost adsorption material for removing hexavalent chromium from tannery wastewater: optimization, kinetic and isotherm study, and regeneration aspects," *RSC Adv.*, vol. 14, no. 6, pp. 3675–3690, 2024, doi: 10.1039/D3RA07476E.

- [43] O. P. Prastuti, E. L. Septiani, Y. Kurniati, W. Widiyastuti, and H. Setyawan, "Banana Peel Activated Carbon in Removal of Dyes and Metals Ion in Textile Industrial Waste," *MSF*, vol. 966, pp. 204–209, Aug. 2019, doi: 10.4028/www.scientific.net/MSF.966.204.