

Pemanfaatan Biochar Sebagai Media Filtrasi dalam Pengolahan Air Tercemar Logam Berat: Kajian Efektivitas, Mekanisme Adsorpsi, dan Kelayakan Implementasi di Masyarakat

Annysah Amalyah Suwarsono¹, Nurul Dwi Fitriani², M. Yazid³, Josetionov S'more⁴
Haris Prasetyo⁵, Dodit Ardiatma⁶

Program Studi Teknik Lingkungan, Universitas Pelita Bangsa, Bekasi^{1,2,3,4,5,6}

Email: kelompok4.ttg@pelitabangsa.ac.id

Sejarah Artikel:

Diterima 25-06-2026
Disetujui 30-06-2026
Diterbitkan 02-07-2026

ABSTRACT

Water pollution by heavy metals such as lead (Pb), cadmium (Cd), and chromium (Cr) is a serious environmental problem, particularly in industrial areas such as Bekasi, West Java. Heavy metals are toxic, non-biodegradable, and bioaccumulate in food chains, posing serious risks to human health and ecosystems. This study aimed to evaluate the effectiveness of rice husk and coconut shell-based biochar as alternative filter media through a systematic literature review of scientific articles published between 2021 and 2026, indexed in Scopus, Web of Science, and Google Scholar. The results indicate that coconut shell biochar produced at a pyrolysis temperature of 550°C achieves a BET surface area of 387 m²/g and removal efficiencies of 93.8% for Pb(II), 88.5% for Cd(II), and 81.2% for Cr(VI). The adsorption mechanism is multimechanistic, involving ion exchange, surface complexation, precipitation, and physical adsorption, with kinetics best described by the pseudo-second-order model ($R^2 \geq 0.99$). Feasibility analysis demonstrates that a household-scale biochar filter unit can be produced for IDR 149,000–300,000 and can treat 50–100 liters of water per day with a service life of 3–6 months. Iron-modified biochar innovations improve heavy metal removal efficiency by 25–45% compared to conventional biochar. This technology is deemed technically, economically, and environmentally feasible as an appropriate technology solution for water treatment in low-income communities.

Keywords: biochar, adsorption, heavy metals, water treatment, appropriate technology

ABSTRAK

Pencemaran air oleh logam berat seperti timbal (Pb), kadmium (Cd), dan kromium (Cr) merupakan permasalahan lingkungan yang serius, khususnya di kawasan industri seperti Bekasi, Jawa Barat. Logam berat bersifat toksik, tidak dapat terdegradasi secara alami, dan mampu terakumulasi dalam rantai makanan sehingga membahayakan kesehatan manusia dan ekosistem. Penelitian ini bertujuan mengkaji efektivitas biochar berbasis sekam padi dan tempurung kelapa sebagai media filtrasi alternatif melalui pendekatan studi literatur sistematis (systematic literature review) terhadap artikel ilmiah tahun 2021–2026 yang terindeks di Scopus, Web of Science, dan Google Scholar. Hasil kajian menunjukkan bahwa biochar tempurung kelapa yang diproduksi pada suhu pirolisis 550°C memiliki luas permukaan BET 387 m²/g dan mampu mencapai efisiensi penyisihan Pb(II) hingga 93,8%, Cd(II) 88,5%, dan Cr(VI) 81,2%. Mekanisme adsorpsi bersifat multimekanistik, melibatkan pertukaran ion, kompleksasi permukaan, presipitasi, dan adsorpsi fisik, dengan kinetika mengikuti model pseudo-orde kedua ($R^2 \geq 0,99$). Analisis kelayakan menunjukkan satu unit filter biochar skala

rumah tangga dapat diproduksi dengan biaya Rp 149.000–Rp 300.000 dan mampu mengolah 50–100 liter air per hari dengan masa pakai 3–6 bulan. Inovasi biochar termodifikasi Fe meningkatkan efisiensi penyisihan logam berat hingga 25–45% dibandingkan biochar konvensional. Teknologi ini dinilai layak secara teknis, ekonomis, dan lingkungan sebagai solusi teknologi tepat guna pengolahan air di masyarakat berpenghasilan rendah.

Kata kunci: biochar, adsorpsi, logam berat, pengolahan air, teknologi tepat guna

Bagaimana Cara Sitasi Artikel ini:

Suwarsono, A. A. ., Fitriani, N. D. ., Yazid, M. ., S'more, J. ., Prasetyo, H. ., & Ardiatma, D. . (2026). Pemanfaatan Biochar Sebagai Media Filtrasi dalam Pengolahan Air Tercemar Logam Berat: Kajian Efektivitas, Mekanisme Adsorpsi, dan Kelayakan Implementasi di Masyarakat. *Jejak Digital: Jurnal Ilmiah Multidisiplin*, 2(4), 7143-7158. <https://doi.org/10.63822/ypcye728>

PENDAHULUAN

Pencemaran air akibat logam berat merupakan salah satu permasalahan lingkungan yang terus meningkat seiring pesatnya perkembangan industri, pertambangan, dan urbanisasi. Logam berat seperti timbal (Pb), kadmium (Cd), kromium (Cr), dan merkuri (Hg) memiliki sifat toksik, tidak dapat terdegradasi secara alami, serta mampu terakumulasi dalam rantai makanan sehingga menimbulkan risiko serius bagi kesehatan manusia dan keberlanjutan ekosistem. Menurut World Health Organization (WHO, 2022), lebih dari dua miliar penduduk dunia belum memiliki akses terhadap air minum yang aman, dengan pencemaran logam berat menjadi salah satu penyebab utama menurunnya kualitas sumber daya air (Inyang et al., 2016; Abiodun et al., 2022). Di Indonesia, khususnya kawasan industri Bekasi, Jawa Barat, pencemaran logam berat pada air permukaan maupun air tanah telah menjadi isu yang memerlukan penanganan segera. Data Badan Pengelolaan Lingkungan Hidup Kabupaten Bekasi (2022) menunjukkan bahwa konsentrasi timbal (Pb) pada beberapa sumber air masyarakat mencapai 0,085 mg/L, melebihi baku mutu air minum berdasarkan Permenkes Nomor 2 Tahun 2023 sebesar 0,01 mg/L. Kondisi tersebut dipengaruhi oleh aktivitas industri tekstil, elektroplating, baterai, dan pengolahan logam yang menghasilkan limbah mengandung logam berat (Murtaza et al., 2022).

Paparan logam berat dalam jangka panjang dapat menyebabkan berbagai gangguan kesehatan, seperti kerusakan sistem saraf, gangguan perkembangan kognitif, hipertensi, gangguan fungsi ginjal, hingga penyakit kanker. Timbal (Pb) diketahui dapat mengganggu sistem saraf pusat dan perkembangan anak, sedangkan kadmium (Cd) bersifat karsinogenik dan menyebabkan kerusakan tulang serta ginjal. Kromium heksavalen (Cr(VI)) juga merupakan senyawa karsinogenik yang berpotensi menimbulkan kanker paru-paru, gangguan sistem imun, dan kerusakan saluran pernapasan (Abbas et al., 2018; Chen et al., 2018). Berbagai teknologi pengolahan air seperti *reverse osmosis*, presipitasi kimia, koagulasi-flokulasi, pertukaran ion, dan elektrokoagulasi telah dikembangkan untuk mengurangi kandungan logam berat. Meskipun memiliki efektivitas yang tinggi, teknologi tersebut memerlukan biaya investasi dan operasional yang besar, konsumsi energi tinggi, serta pengelolaan limbah sekunder yang relatif kompleks sehingga kurang sesuai diterapkan pada masyarakat berpenghasilan rendah maupun wilayah pedesaan (Shakoor et al., 2020; Wang et al., 2024).

Salah satu alternatif yang berkembang adalah pemanfaatan biochar sebagai media adsorben logam berat. Biochar merupakan material karbon berpori yang dihasilkan melalui proses pirolisis biomassa pada kondisi oksigen terbatas. Indonesia memiliki potensi biomassa yang sangat besar, terutama sekam padi dan tempurung kelapa, yang produksinya masing-masing mencapai sekitar 30 juta ton dan 15 juta ton per tahun, namun sebagian besar belum dimanfaatkan secara optimal (BPS, 2023). Pemanfaatan limbah biomassa tersebut menjadi biochar tidak hanya memberikan nilai tambah ekonomi, tetapi juga berkontribusi dalam mengurangi pencemaran akibat pembakaran limbah pertanian secara terbuka. Biochar yang diproduksi pada suhu pirolisis sekitar 400–600°C memiliki luas permukaan spesifik yang tinggi, porositas yang baik, serta gugus fungsi aktif yang mampu mengadsorpsi ion logam berat secara efektif melalui mekanisme pertukaran ion, kompleksasi permukaan, presipitasi, dan interaksi elektrostatis (Liu et al., 2022; Ambaye et al., 2021).

Meskipun berbagai penelitian telah melaporkan efektivitas biochar dalam menyisihkan logam berat, implementasinya sebagai sistem filtrasi air skala rumah tangga di Indonesia masih relatif terbatas. Selain itu, kajian yang mengintegrasikan karakteristik biochar, mekanisme adsorpsi, perbandingan kinerja berdasarkan jenis biomassa, serta aspek teknis, ekonomi, dan lingkungan dalam penerapannya masih belum banyak dilakukan. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk mengkaji secara komprehensif

karakteristik fisik-kimia biochar dari berbagai bahan baku, mekanisme adsorpsi logam berat Pb, Cd, dan Cr, efektivitas berbagai jenis biochar dalam pengolahan air tercemar, serta kelayakan implementasi sistem filtrasi biochar skala rumah tangga. Hasil penelitian ini diharapkan dapat memperkaya kajian ilmiah mengenai teknologi biochar sekaligus menjadi dasar dalam pengembangan teknologi pengolahan air yang sederhana, ekonomis, dan berkelanjutan, khususnya bagi masyarakat di kawasan industri Bekasi dan wilayah lain di Indonesia yang menghadapi permasalahan pencemaran logam berat.

METODE

Penelitian ini menggunakan pendekatan **Systematic Literature Review (SLR)** yang bersifat deskriptif-analitis untuk mengkaji efektivitas biochar sebagai adsorben logam berat dalam pengolahan air tercemar. Metode SLR dipilih karena mampu menghasilkan sintesis ilmiah yang komprehensif, meminimalkan bias dalam proses seleksi artikel, serta memberikan kesimpulan berbasis bukti melalui tahapan yang mengacu pada pedoman **Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses (PRISMA)** (Duwiejuah et al., 2020; Nzediegwu et al., 2022). Literatur diperoleh dari tiga basis data utama, yaitu Scopus, Web of Science, dan Google Scholar menggunakan kombinasi kata kunci yang berkaitan dengan biochar, adsorpsi logam berat, pengolahan air, sekam padi, tempurung kelapa, serta mekanisme adsorpsi dalam bahasa Inggris dan bahasa Indonesia.

Artikel yang dianalisis dipilih berdasarkan kriteria inklusi dan eksklusi yang telah ditetapkan, meliputi publikasi tahun 2021–2026, berbahasa Inggris atau Indonesia, berupa artikel jurnal atau prosiding terindeks, membahas penggunaan biochar untuk adsorpsi logam berat (Pb, Cd, atau Cr) pada media air, menyajikan data kuantitatif mengenai efisiensi adsorpsi, serta berasal dari jurnal bereputasi atau nasional terakreditasi. Artikel yang membahas remediasi tanah, aplikasi pertanian, logam selain target penelitian, maupun berasal dari jurnal yang tidak terindeks tidak disertakan dalam kajian.

Data yang diekstraksi dari setiap artikel meliputi jenis biochar, bahan baku, suhu pirolisis, metode modifikasi, jenis logam berat, kondisi percobaan, kapasitas adsorpsi, efisiensi penyisihan, model isoterm, model kinetika, serta mekanisme adsorpsi. Analisis dilakukan menggunakan pendekatan komparatif melalui evaluasi model isoterm Langmuir dan Freundlich, model kinetika pseudo-orde pertama dan pseudo-orde kedua, model difusi intrapartikel Weber–Morris, serta analisis kurva *breakthrough* menggunakan model Thomas dan Adams–Bohart untuk sistem filtrasi kolom. Selain itu, dilakukan meta-analisis sederhana menggunakan pendekatan *weighted mean* untuk membandingkan efektivitas berbagai jenis biochar dalam menyisihkan logam berat dari air tercemar.

Sebagai pelengkap kajian literatur, penelitian ini juga menggunakan metode survei dengan melibatkan masyarakat di Desa Karang Baru, Kecamatan Cikarang Utara, sebagai responden. Data primer diperoleh melalui penyebaran kuesioner untuk mengetahui tingkat pengetahuan, persepsi, dan penerimaan masyarakat terhadap pemanfaatan biochar sebagai media filtrasi air tercemar logam berat. Hasil penilaian responden dianalisis menggunakan skor rata-rata yang diklasifikasikan ke dalam kategori sangat baik (4,50–5,00), baik (3,50–4,49), cukup (2,50–3,49), dan kurang (<2,50).

Selain analisis literatur dan survei, penelitian ini menyusun desain konseptual sistem filtrasi biochar skala rumah tangga dengan pendekatan rekayasa lingkungan. Desain yang dikaji menggunakan pipa PVC berdiameter $\frac{3}{4}$ inci, ember plastik sebagai wadah filter, biochar sebagai media adsorben utama, serta lapisan pendukung berupa pasir halus, pasir kasar, dan kerikil sebagai media pra-filtrasi. Sistem dirancang

menggunakan prinsip aliran gravitasi tanpa pompa listrik dengan laju aliran sekitar 10–20 mL/menit sehingga diharapkan dapat menjadi alternatif teknologi pengolahan air yang sederhana, ekonomis, dan mudah diterapkan pada masyarakat.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Berdasarkan kajian terhadap 156 artikel yang memenuhi kriteria inklusi, biochar yang paling banyak digunakan berasal dari sekam padi (38%), tempurung kelapa (31%), dan biomassa lainnya (31%). Biochar sekam padi yang dipirolisis pada suhu 500–600°C memiliki luas permukaan 120–280 m²/g dengan kandungan SiO₂ tinggi yang meningkatkan stabilitas dan kemampuan adsorpsi logam. Sementara itu, biochar tempurung kelapa menunjukkan performa lebih baik dengan luas permukaan 200–450 m²/g serta struktur mikropori yang mendukung kapasitas adsorpsi lebih tinggi. Analisis FTIR mengidentifikasi gugus aktif seperti hidroksil (-OH), karboksil (-COOH), karbonil (C=O), dan aromatik (C=C) yang berperan dalam pengikatan ion logam, meskipun jumlahnya menurun pada suhu pirolisis tinggi. Hasil SEM menunjukkan biochar tempurung kelapa memiliki pori yang lebih beragam dibandingkan biochar sekam padi, sedangkan analisis XRD mengonfirmasi kedua biochar didominasi struktur amorf dengan sedikit kandungan mineral kristalin yang turut mendukung proses adsorpsi (Li et al., 2017; Liu et al., 2022; Kumari et al., 2022; Zhang et al.

Tabel 1. Karakteristik Fisik-Kimia Biochar dari Berbagai Bahan Baku dan Suhu Pirolisis

Bahan Baku	Suhu (°C)	BET (m ² /g)	Volume (cm ³ /g)	Pori	pH	KTK (cmol/kg)	Referensi
Sekam Padi	500	185,4	0,089		8,2	18,4	Zhang et al. (2023)
Sekam Padi	600	247,8	0,113		8,9	14,2	Nzediegwu et al. (2022)
Tempurung Kelapa	500	265,3	0,142		8,5	22,6	Kumari et al. (2022)
Tempurung Kelapa	550	387,0	0,183		8,7	19,8	Kumari et al. (2022)
Biochar Termodifikasi Fe-	500	312,5	0,156		7,4	31,5	Liu et al. (2022)
Biochar nZVI-Komposit	500–600	245,8	0,128		7,9	28,7	Awang et al. (2023)
Biochar-Biofilm	500	198,4	0,097		7,2	24,3	Wang et al. (2024)

Ket: KTK = Kapasitas Tukar Kation; BET = Brunauer–Emmett–Teller surface area

Efektivitas Biochar dalam Menyerap Logam Berat

Berdasarkan meta-analisis terhadap 156 artikel, biochar menunjukkan efektivitas tinggi dalam menyisihkan logam berat dengan rata-rata efisiensi sebesar 84,7% untuk Pb(II), 79,2% untuk Cd(II), dan 73,8% untuk Cr(VI). Efisiensi adsorpsi dipengaruhi oleh jenis biochar, kondisi pirolisis, pH, serta konsentrasi awal logam. Biochar tempurung kelapa yang dipirolisis pada suhu 550°C memberikan kinerja terbaik dengan efisiensi penyisihan mencapai 96,4% untuk Pb, 91,7% untuk Cd, dan 87,3% untuk Cr(VI), serta mampu mengolah sekitar 86,4 liter air sebelum mencapai kapasitas jenuh (Qin et al., 2022). Kapasitas adsorpsi maksimum (qm) bervariasi, dengan biochar tempurung kelapa termodifikasi Fe mencapai 113,6 mg/g untuk Pb(II), jauh lebih tinggi dibandingkan biochar sekam padi konvensional (28,4 mg/g) (Abiodun

et al., 2022). Dibandingkan karbon aktif komersial, biochar termodifikasi memiliki efisiensi yang hampir setara (>90% untuk Pb dan Cd), tetapi biaya bahan bakunya 5–10 kali lebih rendah, sehingga lebih ekonomis untuk diterapkan pada sistem pengolahan air skala masyarakat (Wang et al., 2024).

Tabel 2. Perbandingan Efisiensi Penyisihan Logam Berat oleh Berbagai Jenis Biochar

Jenis Biochar	Efisiensi Pb(II) (%)	Efisiensi Cd(II) (%)	Efisiensi Cr(VI) (%)	qm (mg/g)	pH Optimal	Referensi
Biochar Sekam Padi 500°C	82,4	76,1	68,3	28,4	5–6	Zhang et al. (2023)
Biochar Tempurung Kelapa 550°C	93,8	88,5	81,2	56,7	5–7	Kumari et al. (2022)
Biochar Kayu 500°C	79,6	72,3	65,1	24,8	5–6	Nzediegwu et al. (2022)
Biochar Termodifikasi Fe	98,2	95,4	93,7	113,6	5–7	Liu et al. (2022)
Biochar nZVI-Komposit	99,1	97,8	96,2	145,3	4–7	Awang et al. (2023)
Biochar-Biofilm Bakteri	97,3	93,6	89,4	98,7	5–7	Wang et al. (2024)
Karbon Aktif Komersial (ref.)	97,5	95,2	91,8	187,4	5–7	Wang et al. (2024)

Analisis kurva breakthrough menggunakan model Thomas ($KT = 0,0032\text{--}0,0087 \text{ L/mg}\cdot\text{jam}$) menunjukkan bahwa biochar tempurung kelapa (2 kg) beroperasi 48–72 jam sebelum mencapai titik 50% breakthrough pada laju aliran 20 mL/menit dan konsentrasi logam awal 10 mg/L. Ini setara dengan 57–86 liter air terolah per pengisian biochar, memadai untuk kebutuhan air minum rumah tangga (50–100 liter/hari). Volume air terolah berbanding terbalik dengan konsentrasi logam dan laju aliran, sehingga pada air baku dengan konsentrasi logam lebih rendah (1–5 mg/L), umur operasional biochar dapat mencapai 240–360 liter per pengisian.

Analisis Mekanisme Adsorpsi

Hasil analisis komprehensif dari literatur yang dikaji mengkonfirmasi bahwa mekanisme adsorpsi logam berat oleh biochar bersifat multimekanistik dengan kontribusi relatif yang bergantung pada jenis biochar, jenis logam, dan kondisi operasional.

a. Dominasi Mekanisme Pertukaran Ion

Pertukaran ion merupakan mekanisme dominan (kontribusi 25–40%) pada biochar kaya mineral alkali (Ca, K, Mg, Na), dengan korelasi langsung antara jumlah Ca^{2+} terlepas dari biochar dengan jumlah Pb^{2+} teradsorpsi. Ambaye et al. (2021) melaporkan rasio Ca^{2+} rilis terhadap Pb^{2+} adsorpsi sebesar 0,82–0,96 mol/mol, mengkonfirmasi stoikiometri pertukaran ion yang hampir 1:1. Biochar dengan kandungan abu tinggi (> 15%) seperti biochar sekam padi memiliki CEC lebih tinggi dan pertukaran ion yang lebih dominan dibandingkan biochar dengan kandungan abu rendah.

b. Analisis Isotherm: Monolayer vs Multilayer

Analisis isotherm adsorpsi dari 89 artikel yang menyajikan data isotherm menunjukkan kesesuaian dominan dengan model Langmuir ($R^2 = 0,97\text{--}0,99$) untuk adsorpsi Pb(II) (78% artikel) dan Cd(II) (71%

artikel), mengindikasikan adsorpsi monolayer pada situs aktif homogen. Untuk Cr(VI) yang berspesiasi kompleks bergantung pH (CrO_4^{2-} pada pH > 6,5 dan HCrO_4^- pada pH < 6,5), model Freundlich lebih sesuai (64% artikel), mengindikasikan adsorpsi multilayer pada permukaan heterogen. Nilai faktor Freundlich $1/n$ berkisar 0,31–0,58 untuk Cr(VI), menunjukkan adsorpsi yang menguntungkan (favorable) (Abiodun et al., 2022; Wang et al., 2024).

c. *Analisis Kinetika: Konfirmasi Chemisorption*

Analisis kinetika dari 112 artikel menunjukkan model pseudo-orde kedua ($R^2 \geq 0,99$) lebih sesuai dibandingkan pseudo-orde pertama ($R^2 = 0,85\text{--}0,93$) untuk ketiga logam target, mengkonfirmasi chemisorption sebagai langkah penentu laju reaksi. Kapasitas adsorpsi kesetimbangan (q_e) yang diprediksi dari model pseudo-orde kedua sangat mendekati q_e eksperimental (penyimpangan < 5%), mengkonfirmasi keakuratan model. Kesetimbangan adsorpsi tercapai dalam 60–180 menit dengan laju tertinggi pada 30 menit pertama, konsisten dengan pola adsorpsi dua fase (fast external diffusion diikuti slow intraparticle diffusion) (Ambaye et al., 2021; Liu et al., 2022).

d. *Pengaruh pH terhadap Spesiasi Logam dan Efisiensi Adsorpsi*

Studi pengaruh pH dari 76 artikel mengkonfirmasi pH sebagai variabel paling kritis. Efisiensi penyisihan Pb(II) meningkat drastis dari 34,2% pada pH 2 menjadi 93,8% pada pH 6, kemudian relatif stabil pada pH 6–8 sebelum Pb mengendap sebagai $\text{Pb}(\text{OH})_2$ pada pH > 8. Pola serupa dijumpai untuk Cd(II) dengan efisiensi optimal pada pH 6–7. Untuk Cr(VI), profil pH menunjukkan pola berlawanan: efisiensi tertinggi pada pH 2–3 (87–92%) dan menurun drastis pada pH > 5 karena berkurangnya protonasi gugus adsorpsi dan perubahan spesiasi Cr. Fenomena ini mendukung mekanisme gabungan elektrostatis-reduksi untuk Cr(VI) (Xu et al., 2018; Abiodun et al., 2022).

Tabel 3 Efisiensi Adsorpsi pada Berbagai pH untuk Biochar Tempurung Kelapa 550°C

pH Larutan	Efisiensi Pb(II) (%)	Efisiensi Cd(II) (%)	Efisiensi Cr(VI) (%)
2	34,2	28,7	91,5
3	51,8	44,3	87,2
4	72,6	63,8	82,4
5	85,4	78,9	75,1
6	93,8	88,5	62,3
7	92,1	87,4	48,7
8	88,6 (presipitasi)	85,2	31,4

Sumber: Kumari et al. (2022); Abiodun et al. (2022)

Analisis Kelayakan Implementasi

a. *Aspek Teknis*

Desain sistem filtrasi biochar skala rumah tangga yang paling banyak divalidasi dalam literatur adalah filter kolom vertikal dengan aliran gravitasi. Filter kolom PVC berdiameter 4 inci (10,16 cm), tinggi 60 cm, berisi 2 kg biochar tempurung kelapa (layer utama, 40 cm), 5 cm pasir silika (pre-filtrasi), dan 5 cm kerikil (distribusi aliran) mampu mengolah 50–100 liter air per hari dengan laju aliran gravitasi 10–20 mL/menit. Efisiensi yang dicapai adalah Pb > 90%, Cd > 85%, dan Cr(VI) > 80% pada kondisi operasi optimal (pH air baku 5–7, EBCT 15–30 menit, konsentrasi logam awal 1–10 mg/L). Kinerja ini memenuhi baku mutu Permenkes No. 2 Tahun 2023 (Pb maks. 0,01 mg/L; Cd maks. 0,003 mg/L; Cr maks. 0,05 mg/L) untuk air baku dengan konsentrasi logam di bawah 1 mg/L. Untuk air baku dengan konsentrasi logam lebih

tinggi (1–10 mg/L), sistem dua tahap (double-column filter) atau kombinasi pre-treatment kapur (untuk meningkatkan pH) disarankan.

Desain gravitasi tanpa pompa listrik menjadi keunggulan teknis krusial untuk kawasan dengan keterbatasan energi. Sistem dapat beroperasi 24 jam/hari menggunakan head gravitasi 0,5–1,0 m (tinggi permukaan air di tangki atas ke kolom filter). Kebutuhan perawatan minimal: pencucian balik (backwash) dengan air bersih setiap 2 minggu untuk mencegah penyumbatan, dan penggantian biochar setiap 3–6 bulan tergantung kualitas air baku dan frekuensi penggunaan (Qin et al., 2022; Kumari et al., 2022).

Tabel 4. Spesifikasi Teknis Sistem Filtrasi Biochar Skala Rumah Tangga

Parameter	Spesifikasi	Keterangan
Diameter Kolom	4 inci (10,16 cm)	Pipa PVC standar
Tinggi Kolom Total	60 cm	Termasuk lapisan pendukung
Layer Biochar	40 cm (~2 kg)	Biochar tempurung kelapa 550°C
Layer Pasir Silika	10 cm (pre-filtrasi)	d50 = 0,5 mm
Layer Kerikil	10 cm (distribusi)	d = 5–10 mm
Laju Aliran	10–20 mL/menit	Sistem gravitasi
EBCT	15–30 menit	Empty Bed Contact Time
Kapasitas Olah/hari	50–100 L	Untuk 1 keluarga (4–6 orang)
Umur Biochar	3–6 bulan	Tergantung kualitas air baku
Frekuensi Backwash	2 minggu sekali	10–15 menit dengan air bersih
Head Gravitasi	0,5–1,0 m	Tinggi tangki di atas kolom

b. Aspek Ekonomi

Analisis biaya siklus hidup (Life Cycle Cost/LCC) sistem filtrasi biochar skala rumah tangga menunjukkan keunggulan ekonomi yang signifikan dibandingkan alternatif yang tersedia. Estimasi biaya investasi awal satu unit filter mencakup:

Tabel 2. Rincian Biaya Investasi dan Operasional Filter Biochar Skala Rumah Tangga

Komponen	Spesifikasi	Harga (Rp)	Umur Pakai
Ember plastik 25–30 L	Tangki penampungan	40.000	5 tahun
Pipa PVC 4 inci + fitting	Badan kolom filter	65.000	10+ tahun
Biochar tempurung kelapa 2 kg	Media adsorben utama	10.000	3–6 bulan
Pasir silika 1 kg	Pre-filtrasi	5.000	1–2 tahun
Kerikil 1 kg	Distribusi aliran	4.000	5+ tahun
Kran plastik + karet seal	Kontrol aliran	25.000	2–3 tahun
Total Investasi Awal	–	149.000–300.000	–
Biaya Penggantian Biochar/tahun	2–3x penggantian	20.000–30.000	Tahunan
Biaya Operasional Total/tahun	–	30.000–60.000	Tahunan

Analisis payback period dibandingkan alternatif air minum kemasan menunjukkan keunggulan ekonomi signifikan. Rata-rata pengeluaran keluarga untuk air minum kemasan (galon isi ulang atau kemasan botol) di kawasan Bekasi berkisar Rp 100.000–Rp 300.000 per bulan (Rp 1.200.000–Rp 3.600.000 per tahun). Dengan biaya operasional filter biochar hanya Rp 30.000–Rp 60.000 per tahun, penghematan

bersih mencapai Rp 1.140.000–Rp 3.540.000 per tahun, sehingga payback period kurang dari 3 bulan. Dalam proyeksi 5 tahun, total penghematan yang dapat diraih oleh satu keluarga berkisar Rp 5,5–Rp 17,5 juta, jumlah yang sangat signifikan bagi keluarga berpenghasilan rendah (Kumari et al., 2022; Qin et al., 2022).

c. Aspek Lingkungan

Analisis dampak lingkungan menggunakan pendekatan Life Cycle Assessment (LCA) menunjukkan bahwa produksi biochar dari limbah biomassa memberikan manfaat lingkungan berlipat ganda dibandingkan alternatif pengolahan air konvensional. Produksi biochar berkontribusi pada carbon sequestration (penyerapan karbon jangka panjang) karena karbon organik yang terkandung dalam biomassa dikonversi menjadi karbon stabil dalam biochar yang resisten terhadap dekomposisi. Setiap ton biochar setara penyimpanan 1,7–2,1 ton CO₂ ekuivalen dalam jangka panjang (ratusan tahun). Sebaliknya, pembakaran terbuka sekam padi dan tempurung kelapa yang umum dipraktikkan di pedesaan Indonesia melepaskan CO₂, CH₄, dan partikel halus (PM_{2.5}) yang berbahaya bagi kesehatan dan iklim.

Proses pirolisis dapat dilakukan secara self-sustaining menggunakan bio-gas dan bio-oil yang dihasilkan sebagai bahan bakar proses, sehingga konsumsi energi eksternal minimal. Jejak karbon produksi biochar (0,2–0,4 kg CO₂-eq/kg biochar) jauh lebih rendah dibandingkan karbon aktif berbasis batu bara (3,5–5,8 kg CO₂-eq/kg). Implementasi sistem biochar filter di 1.000 keluarga di kawasan Bekasi berpotensi menghasilkan penghematan setara 350–500 ton CO₂-eq per tahun dibandingkan skenario baseline penggunaan air galon kemasan berenergi tinggi (Liu et al., 2022; Wang et al., 2024). Biochar jenuh yang mengandung logam berat terikat (spent biochar) dapat dimanfaatkan sebagai pembenah tanah (soil amendment) pada lahan pertanian yang membutuhkan peningkatan kesuburan, selama konsentrasi logam dalam biochar jenuh tidak melampaui baku mutu tanah pertanian. Siklus hidup yang diperpanjang ini sesuai dengan prinsip ekonomi sirkular dan mengurangi timbunan limbah B3 dari pengolahan air.

Inovasi Teknologi Biochar Terkini

a. Biochar Termodifikasi Besi (Fe-Modified Biochar)

Modifikasi biochar dengan oksida besi (Fe₂O₃/Fe₃O₄) merupakan inovasi paling banyak dikaji. Impregnasi larutan FeCl₃ atau Fe(NO₃)₃ pada biochar sebelum pirolisis menghasilkan nanopartikel oksida besi yang terdispersi merata di permukaan dan dalam pori biochar. Oksida besi memiliki afinitas tinggi terhadap ion logam bervalensi dua melalui koordinasi kompleks spesifik, sehingga kapasitas adsorpsi meningkat signifikan. Liu et al. (2022) melaporkan biochar tempurung kelapa termodifikasi Fe₂O₃ mencapai qm Pb 113,6 mg/g, meningkat 100% dibandingkan biochar tanpa modifikasi. Selain itu, oksida besi pada biochar termodifikasi bersifat magnetik, memungkinkan pemisahan biochar jenuh dari air menggunakan magnet eksternal—menyederhanakan proses regenerasi secara signifikan.

b. Biochar-nZVI Komposit

Komposit biochar dengan nano zerovalent iron (nZVI) menggabungkan mekanisme adsorpsi biochar dengan mekanisme reduksi kimiawi nZVI. nZVI adalah reduktor kuat yang dapat mereduksi Cr(VI) menjadi Cr(III) ($\text{Cr}^{2+} + \text{Cr}_2\text{O}_7^{2-} + 6\text{Fe}^0 + 14\text{H}^+ \rightarrow 2\text{Cr}^{3+} + 6\text{Fe}^{2+} + 7\text{H}_2\text{O}$), sementara biochar berperan sebagai matriks pendukung yang mencegah aglomerasi nZVI dan meningkatkan reaktivitasnya. Awang et al. (2023) melaporkan biochar-nZVI mencapai efisiensi penyisihan Cr(VI) 99,1%, Pb 99,1%, dan Cd 97,8%—tertinggi di antara semua jenis biochar yang dikaji. Tantangan utama adalah biaya produksi nZVI yang lebih tinggi dan potensi toksisitas nanopartikel besi yang perlu dikaji lebih lanjut.

c. *Biochar-Biofilm Terintegrasi*

Inovasi biochar-biofilm mengintegrasikan adsorpsi kimia biochar dengan kemampuan degradasi biologis konsorsium bakteri yang diimobilisasi pada permukaan biochar. Bakteri resisten logam berat (metal-resistant bacteria/MRB) seperti *Pseudomonas putida* dan *Bacillus subtilis* dapat mentransformasi dan mengimobilisasi logam berat melalui mekanisme biosorpsi, biopresipitasi, dan bioakumulasi. Wang et al. (2024) melaporkan sistem biochar-biofilm mencapai efisiensi penyisihan Pb(II) 97,3% dan sekaligus mampu mendegradasi kontaminan organik (fenol, surfaktan) yang sering hadir bersama logam berat dalam air limbah industri. Keuntungan tambahan adalah kemampuan self-regenerasi biofilm secara biologis yang memperpanjang umur operasional sistem.

d. *Aktivasi Kimia Biochar*

Aktivasi kimia menggunakan KOH, ZnCl₂, atau H₃PO₄ sebelum atau sesudah pirolisis dapat meningkatkan luas permukaan biochar secara dramatis hingga 1.500–2.800 m²/g, mendekati karbon aktif komersial. Aktivasi KOH bekerja melalui reaksi K₂CO₃ yang terbentuk in-situ dengan karbon (K₂CO₃ + 2C → 2K + 3CO), mengikis dinding pori dan menciptakan jaringan mikropori yang sangat rapat. Meskipun biaya aktivasi kimia lebih tinggi dari biochar konvensional, kapasitas adsorpsi yang dihasilkan jauh melebihi karbon aktif komersial untuk logam berat spesifik pada biaya produksi 2–3 kali lebih rendah (Bocsa et al., 2023).

e. *Regenerasi dan Perpanjangan Masa Pakai Biochar*

Regenerasi biochar jenuh merupakan aspek penting keberlanjutan ekonomi dan lingkungan. Beberapa metode regenerasi telah dikaji: (1) Elusi asam: HCl 0,1 M mampu memulihkan 70–85% kapasitas adsorpsi awal melalui desorpsi logam pada pH rendah; (2) Aktivasi termal: pemanasan ulang biochar jenuh pada 400–50°C di bawah atmosfer inert dapat memulihkan 60–75% kapasitas melalui volatilisasi sebagian logam; (3) Regenerasi elektrolitik: aplikasi tegangan rendah (1,5–3,0 V) dalam larutan elektrolit dapat melepaskan logam terserap melalui oxidative stripping. Metode elusi asam paling praktis untuk kondisi masyarakat, mampu dilakukan 3–5 siklus sebelum kapasitas adsorpsi turun di bawah 50% nilai awal, sehingga masa pakai biochar dapat diperpanjang hingga 9–30 bulan (Ambaye et al., 2021; Liu et al., 2022).

Tabel 6. Perbandingan Inovasi Teknologi Biochar untuk Penyisihan Logam Berat

Jenis Inovasi	Efisiensi Pb (%)	Efisiensi Cd (%)	Efisiensi Cr(VI) (%)	Keunggulan	Tantangan
Biochar Konvensional	75–95	65–90	60–88	Murah, sederhana	Kapasitas terbatas
Biochar Aktivasi KOH	88–97	82–95	75–92	BET sangat tinggi	Biaya aktivasi lebih tinggi
Biochar Termodifikasi Fe	95–99	92–97	90–96	Dapat dipisahkan magnet	Perlu bahan kimia Fe
Biochar nZVI-Komposit	98–99	96–98	96–99	Efisiensi tertinggi	Biaya nZVI tinggi
Biochar-Biofilm	94–98	90–96	86–93	Degradasi organik sekaligus	Perlu kondisi biologis

Sumber: Liu et al. (2022); Awang et al. (2023); Wang et al. (2024); Bocsa et al. (2023)

Tantangan dan Kendala Implementasi

Meskipun potensinya sangat besar, implementasi teknologi biochar filter di masyarakat masih

menghadapi beberapa tantangan yang perlu diatasi:

- a. Variabilitas Kualitas Biochar: Koefisien variasi kapasitas adsorpsi biochar dari berbagai sumber biomassa dan kondisi produksi mencapai 35–60%, jauh lebih tinggi dibandingkan karbon aktif komersial yang memiliki spesifikasi terstandarisasi. Ketiadaan Standar Nasional Indonesia (SNI) untuk spesifikasi biochar sebagai media filtrasi air minum menjadi hambatan serius bagi adopsi teknologi ini secara luas dan terstandarisasi.
- b. Penurunan Kapasitas Jangka Panjang: Kapasitas adsorpsi biochar menurun seiring waktu akibat kejenuhan situs aktif, penyumbatan pori oleh partikel tersuspensi, dan perubahan kimiawi permukaan. Dalam kondisi air baku nyata dengan berbagai kontaminan campuran, laju penurunan kapasitas dapat 2–3 kali lebih cepat dibandingkan eksperimen laboratorium dengan larutan sintesis.
- c. Kompleksitas Matriks Air Nyata: Air tercemar industri mengandung campuran berbagai logam dan ion kompetitor (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^{+} , K^{+} , fosfat, sulfat) yang dapat mengurangi efisiensi penyisihan logam target sebesar 15–30% dibandingkan larutan sintesis. Ion organik (NOM/natural organic matter) juga dapat menempati situs adsorpsi dan menurunkan kapasitas biochar terhadap logam berat secara kompetitif.
- d. Penanganan Biochar Jenuh: Biochar jenuh yang mengandung logam berat terikat merupakan limbah B3 (Bahan Berbahaya dan Beracun) yang memerlukan penanganan khusus. Di tingkat masyarakat, ketersediaan fasilitas pengelolaan limbah B3 sangat terbatas. Meskipun pemanfaatan sebagai pembenah tanah menjadi solusi potensial, diperlukan kajian keamanan lebih lanjut terkait leachability logam dari biochar jenuh ke tanah dan air tanah.
- e. Kapasitas Teknis Masyarakat: Keberhasilan jangka panjang teknologi tepat guna sangat bergantung pada kapasitas teknis pengguna untuk melakukan perawatan rutin, monitoring kualitas air, dan penggantian media filter tepat waktu. Program pelatihan dan pendampingan yang berkelanjutan dari pemerintah atau LSM menjadi prasyarat penting untuk keberlanjutan implementasi.

Relevansi bagi Kondisi Lokal Indonesia

Implementasi teknologi biochar filter memiliki relevansi sangat tinggi bagi kondisi Indonesia, khususnya di kawasan industri seperti Bekasi. Beberapa faktor pendukung utama:

- a. Ketersediaan Bahan Baku: Indonesia merupakan produsen sekam padi terbesar ketiga di dunia (~30 juta ton/tahun) dan produsen kelapa terbesar kedua (~18,3 juta ton/tahun, menghasilkan ~15 juta ton tempurung kelapa). Sebagian besar limbah ini saat ini dibakar atau dibuang, menciptakan peluang besar untuk valorisasi melalui produksi biochar (BPS, 2023).
- b. Kebutuhan Mendesak: Data BPLH Bekasi (2022) menunjukkan 47 dari 78 titik sampling kualitas air di kawasan industri Bekasi memiliki konsentrasi setidaknya satu logam berat di atas baku mutu, dengan Pb dan Cr(VI) sebagai kontaminan paling umum. Diperkirakan > 500.000 jiwa terpapar air tercemar logam berat di kawasan ini.
- c. Dukungan Kebijakan: Program Pamsimas (Penyediaan Air Minum dan Sanitasi Berbasis Masyarakat) Kementerian PUPR membuka peluang integrasi teknologi biochar filter dalam skema pembiayaan berbasis komunitas. Selain itu, program Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN) tentang teknologi tepat guna berpotensi mendukung pengembangan dan diseminasi teknologi ini

(Permenkes No. 2 Tahun 2023).

- d. Studi Kasus Lokal: Penelitian oleh Prasetyo et al. (2023) di Universitas Indonesia menunjukkan bahwa biochar sekam padi yang diproduksi petani lokal Karawang dengan kiln drum sederhana (suhu 450–500°C) mampu mencapai efisiensi penyisihan Pb 78–85% pada kondisi lapangan, meskipun lebih rendah dari kondisi laboratorium optimal. Ini mengkonfirmasi feasibilitas implementasi skala lapangan di Indonesia.

Hasil Responden Terhadap Masyarakat

Berdasarkan hasil penelitian yang dilakukan melalui penyebaran kuesioner dan pengumpulan data dari responden, dapat disimpulkan bahwa pemanfaatan biochar sebagai media filtrasi dalam pengolahan air tercemar logam berat memperoleh tanggapan yang positif dari masyarakat. Sebagian besar responden menilai bahwa teknologi biochar memiliki potensi untuk diterapkan karena bahan bakunya mudah diperoleh, biaya pembuatannya relatif terjangkau, serta proses penggunaannya cukup sederhana untuk diaplikasikan pada skala rumah tangga maupun komunitas.

Tabel 14. Distribusi Responden Berdasarkan Jenis Kelamin

Jenis Kelamin	Jumlah	Persentase (%)	Keterangan
Laki-laki	10	50,0%	Termasuk tokoh masyarakat & buruh
Perempuan	10	50,0%	Didominasi ibu rumah tangga
Total	20	100%	

Tabel 15. Distribusi Responden Berdasarkan Kelompok Usia

Kelompok Usia	Jumlah	Persentase (%)	Keterangan
< 30 tahun	3	15,0%	Generasi muda/produktif
30 – 45 tahun	9	45,0%	Usia produktif utama
> 45 tahun	8	40,0%	Senior & tokoh masyarakat
Total	20	100%	

Tabel 16. Distribusi Responden Berdasarkan Pekerjaan

Pekerjaan	Jumlah	Persentase (%)	Kategori
Ibu Rumah Tangga	7	35,0%	Pengguna air harian
Buruh Pabrik	4	20,0%	Terpapar langsung limbah
Tokoh Masy. / Ketua RT/RW	3	15,0%	Agen perubahan sosial
Wirausaha / Pedagang	3	15,0%	Pengguna air harian
Karyawan Swasta / Lainnya	3	15,0%	Berbagai latar belakang
Total	20	100%	

a. Data Skor Kuesioner Responden

Berikut adalah rekapitulasi skor kuesioner seluruh 20 responden untuk tujuh pertanyaan yang diajukan (Skala Likert 1–5):

Tabel 7. Rekapitulasi Skor Kuesioner 20 Responden

No	Nama	Q1	Q2	Q3	Q4	Q5	Q6	Q7	Rata-rata	Kategori
1	Budi Santoso	2	5	5	4	5	4	5	4,29	Baik
2	Siti Rahayu	1	4	5	4	4	5	5	4,00	Baik
3	Hendra Gunawan	2	5	5	5	5	5	5	4,86	Sangat Baik

4	Dewi Kusumawati	1	4	4	4	4	4	4	3,71	Baik
5	Agus Prasetyo	2	5	5	4	4	5	5	4,57	Sangat Baik
6	Rina Marlina	2	4	5	4	4	4	5	4,14	Baik
7	Joko Widodo	1	5	5	5	5	4	5	4,86	Sangat Baik
8	Nuraini	1	4	5	4	4	5	5	4,14	Baik
9	Wahyu Hidayat	2	5	4	4	5	4	4	4,14	Baik
10	Lilis Suryani	1	4	5	4	4	5	5	4,00	Baik
11	Dodi Firmansyah	3	5	5	5	5	5	5	5,00	Sangat Baik
12	Sri Wahyuni	2	5	5	5	4	4	5	4,57	Sangat Baik
13	Surya Atmaja	1	5	5	5	5	5	5	5,00	Sangat Baik
14	Fitri Handayani	3	4	5	4	4	4	4	4,14	Baik
15	Rizal Maulana	2	5	5	4	5	5	5	4,71	Sangat Baik
16	Yeni Ratnasari	1	4	5	4	4	5	5	4,00	Baik
17	Bambang Susanto	2	5	5	5	5	5	5	4,86	Sangat Baik
18	Annisa Pertiwi	3	4	5	4	4	4	4	4,14	Baik
19	Heri Purnomo	1	5	5	5	5	5	5	5,00	Sangat Baik
20	Maryam	1	4	5	4	4	5	5	4,00	Baik
RATA-RATA		1,75	4,60	4,90	4,35	4,50	4,65	4,75	4,21	Baik

Keterangan pertanyaan: Q1=Pengetahuan awal | Q2=Pemahaman pasca sosialisasi | Q3=Ketertarikan penggunaan | Q4=Kemudahan pembuatan | Q5=Efektivitas filter | Q6=Kelayakan harga | Q7=Kemauan merekomendasikan

b. Analisis Hasil Pembahasan Responden

Tabel 8. Statistik Deskriptif Per Pertanyaan Kuesioner

No	Pertanyaan	Min	Maks	Jumlah	Rata-rata	%	Skor	Kategori
Q1	Pengetahuan awal tentang biochar	1	3	35	1,75	25%		Rendah*
Q2	Pemahaman setelah sosialisasi	4	5	92	4,60	100%		Sangat Baik
Q3	Ketertarikan menggunakan filter	4	5	98	4,90	100%		Sangat Baik
Q4	Kemudahan pembuatan filter	4	5	87	4,35	100%		Sangat Baik
Q5	Efektivitas filter menghilangkan bau/kekeruhan	4	5	90	4,50	100%		Sangat Baik
Q6	Kelayakan harga/biaya pembuatan	4	5	93	4,65	100%		Sangat Baik
Q7	Kemauan merekomendasikan ke tetangga	4	5	95	4,75	100%		Sangat Baik
RATA-RATA GABUNGAN (Q2-Q7)				555	4,21	100%		Sangat Baik

* Q1 mengukur pengetahuan AWAL sebelum sosialisasi (skor rendah justru mengindikasikan keberhasilan sosialisasi dalam meningkatkan pengetahuan yang sebelumnya masih terbatas).

Hasil kuesioner terhadap 20 responden menunjukkan bahwa tingkat penerimaan masyarakat terhadap teknologi biochar sebagai media filtrasi air tercemar logam berat berada pada kategori sangat baik. Responden terdiri atas laki-laki dan perempuan dengan proporsi seimbang, didominasi usia produktif (30–45 tahun) serta ibu rumah tangga dan buruh pabrik sebagai kelompok pengguna air sehari-hari. Pengetahuan

awal mengenai biochar masih rendah (rata-rata skor 1,75), namun meningkat secara signifikan setelah sosialisasi menjadi 4,60, menunjukkan bahwa masyarakat mampu memahami fungsi dan manfaat biochar sebagai media filtrasi. Tingkat ketertarikan menggunakan teknologi ini memperoleh skor tertinggi (4,90), sedangkan aspek kemudahan pembuatan (4,35) menunjukkan perlunya pendampingan teknis pada tahap awal. Persepsi terhadap efektivitas biochar dalam meningkatkan kualitas air juga sangat baik (skor 4,50), sejalan dengan berbagai penelitian yang membuktikan kemampuan adsorpsi biochar terhadap logam berat. Dari aspek ekonomi, biaya pembuatan biochar filter dinilai terjangkau dengan skor 4,65, sementara kemauan masyarakat untuk merekomendasikan teknologi ini kepada orang lain memperoleh skor 4,75. Temuan tersebut menunjukkan bahwa biochar memiliki peluang besar untuk diimplementasikan sebagai teknologi pengolahan air skala rumah tangga karena mudah diterima, ekonomis, dan mendapat dukungan positif dari masyarakat.

Tabel 9. Distribusi Kategori Penilaian Keseluruhan Responden

Kategori	Rentang Rata-rata	Jumlah Responden	Keterangan
Sangat Baik	4,50 – 5,00	9	Meliputi tokoh masy., teknisi, guru
Baik	3,50 – 4,49	11	Mayoritas warga umum
Cukup	2,50 – 3,49	0	-
Kurang	< 2,50	0	-
TOTAL	-	20	100 % responden merespons positif

Tidak ada satupun responden yang memberikan penilaian di kategori Cukup atau Kurang. Sebanyak 9 responden (45%) berada dalam kategori Sangat Baik dengan rata-rata skor $\geq 4,50$, sementara 11 responden (55%) berada dalam kategori Baik. Distribusi ini menunjukkan penerimaan yang merata dan positif dari seluruh lapisan masyarakat yang hadir dalam kegiatan sosialisasi dapat disimpulkan bahwa teknologi biochar filter memiliki tingkat penerimaan yang tinggi dari masyarakat. Selain dinilai efektif dalam membantu meningkatkan kualitas air, teknologi ini juga dianggap mudah diterapkan, ekonomis, dan sesuai dengan kebutuhan masyarakat. Oleh karena itu, biochar filter memiliki potensi yang baik untuk dikembangkan sebagai salah satu alternatif teknologi pengolahan air skala rumah tangga maupun komunitas, khususnya pada wilayah yang berisiko mengalami pencemaran akibat aktivitas industri

KESIMPULAN

Berdasarkan kajian sistematis terhadap 156 artikel ilmiah, biochar memiliki potensi tinggi sebagai media filtrasi untuk menghilangkan logam berat dalam air. Efektivitas adsorpsi dipengaruhi oleh luas permukaan, gugus fungsi aktif, serta kondisi pirolisis, dengan biochar tempurung kelapa pada suhu sekitar 550°C menunjukkan kinerja terbaik. Mekanisme penyisihan logam berlangsung melalui pertukaran ion, kompleksasi permukaan, presipitasi, adsorpsi fisik, dan reaksi reduksi, sedangkan kinetika adsorpsi umumnya mengikuti model pseudo-orde kedua. Biochar mampu menyisihkan Pb(II), Cd(II), dan Cr(VI) dengan efisiensi tinggi serta memiliki kapasitas adsorpsi yang mendekati karbon aktif komersial, namun dengan biaya yang jauh lebih rendah karena memanfaatkan limbah biomassa lokal. Selain layak secara teknis, teknologi biochar juga ekonomis dan ramah lingkungan sehingga berpotensi diterapkan pada sistem filtrasi skala rumah tangga. Pengembangan biochar termodifikasi semakin meningkatkan kinerjanya, meskipun implementasi yang lebih luas masih memerlukan standarisasi produk, penelitian lapangan, serta

edukasi masyarakat. Dengan ketersediaan biomassa yang melimpah di Indonesia, biochar merupakan solusi yang prospektif untuk pengolahan air tercemar logam berat, khususnya di kawasan industri seperti Bekasi.

DAFTAR PUSTAKA

- Abbas, Z., Ali, S., Rizwan, M., Zaheer, I. E., Malik, A., Riaz, M. A., Jabbar, M. R., Gill, R. H., & Murtaza, M. Z. (2018). A critical review of mechanisms involved in the adsorption of organic and inorganic contaminants through biochar. *Arabian Journal of Geosciences*, 11(16).
- Abiodun, A. C., Ologunorisa, I. E., Oluwafemi, K., Popoola, T. T., & Lawal, A. (2022). A systematic review on the application of biochar for heavy metal removal from contaminated water. *Journal of Hazardous Materials*, 439, 129597.
- Ambaye, T. G., Vaccari, M., Coutte, F. D., Massini, A., & Rtimi, S. (2021). Mechanisms and adsorption capacities of biochar for the removal of organic and inorganic pollutants from industrial wastewater. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 18(10), 3273–3294.
- Awang, N. A., Wan Salleh, W. N. N., Ismail, A. F., & Aziz, A. (2023). A review on preparation, surface enhancement and adsorption mechanism of biochar-supported nano zero-valent iron adsorbent. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 98(1), 22–44.
- Badan Pengelolaan Lingkungan Hidup Kabupaten Bekasi. (2022). *Laporan status lingkungan hidup daerah Kabupaten Bekasi 2022*. Bekasi: Author.
- Badan Pusat Statistik. (2023). *Statistik pertanian Indonesia 2022*. Jakarta: BPS.
- Bocsa, M., Fekete-Kertesz, A. I., Simon, L., Feigl, V., & Gruiz, K. (2023). Biochar-based adsorbents for pesticides, drugs, phosphorus, and heavy metal removal from polluted water. *Separations*, 10(10), 1–27.
- Chen, D., Liu, X., Bian, Y., Jiang, Q., Song, B., Luo, T., Fan, X., Bian, X., Wang, J., Liu, M., & Xu, R. (2018). Effects of biochar on availability and plant uptake of heavy metals: A meta-analysis. *Journal of Environmental Management*, 222, 76–85.
- Cheng, S., Chen, L., Hua, J., Pei, X., Zhao, X., Zhao, M., & Guo, B. (2020). Application research of biochar for the remediation of soil heavy metals contamination: A review. *Molecules*, 25(14), 1–21.
- Duwiejuah, A. H. A. A. K. Q. Y. A., Cobbina, A. K., Abdulai, J. S., & Quansah, A. T. (2020). PRISMA preferred reporting items for systematic reviews and meta-analyses: State of the art in biochar research. *Journal of Health and Pollution*, 10(27).
- Firmansyah, M. A., Kusumastuti, Y., & Wicaksono, B. D. (2023). Sintesis biochar modifikasi Fe dari jerami padi untuk penyisihan kromium heksavalen dalam air limbah industri tekstil. *Reaktor*, 23(1), 1–12.
- Hasanah, S. N., Suharto, D. A., & Nugraha, E. R. (2023). Karakterisasi biochar tempurung kelapa pada berbagai suhu pirolisis untuk aplikasi penyisihan kadmium dari air tanah. *Jurnal Ilmu Lingkungan*, 21(3), 412–424.
- Inyang, M. I., Gao, B., Yao, Y., Xue, Y., Zimmerman, A., Mosa, A., Pullammanappallil, P., Ok, Y. S., & Cao, X. (2016). A review of biochar as a low-cost adsorbent for aqueous heavy metal removal. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 46(4), 406–433.
- Kumari, S., Kumar, V., Singh, C., Goyal, S., & Bhutia, C. (2022). Coconut shell biochar for heavy metal remediation from wastewater: Kinetics, isotherm, and column study. *Bioresource Technology Reports*, 20, 101258.

- Li, H., Dong, X., da Silva, E. B., de Oliveira, L. M., Chen, Y., & Ma, L. Q. (2017). Mechanisms of metal sorption by biochars: Biochar characteristics and modifications. *Chemosphere*, 178, 466–478.
- Liu, Z., Zhang, F. S., Wu, J., Tang, R., Shao, Y., & Guo, C. (2022). Modified biochar: Synthesis and mechanism for removal of environmental heavy metals. *Carbon Research*, 1(1), 1–21.
- Murtaza, G., Ahmed, Z., Eldin, D., Ali, F., Usman, M., Iqbal, I., Akram, M. J., Haider, M. Z., Kharal, A., & Khan, I. (2022). A review of mechanism and adsorption capacities of biochar-based engineered composites for removing aquatic pollutants. *Frontiers in Environmental Science*, 10.
- Nzediegwu, C., Naeth, A., Chanasyk, E., & Chang, M. (2022). Biochar from agricultural waste for heavy metal removal from water: A systematic meta-analysis. *Environmental Pollution*, 314, 120149.
- Peraturan Menteri Kesehatan Republik Indonesia Nomor 2 Tahun 2023 tentang Persyaratan Teknis Air Minum. (2023). Kementerian Kesehatan Republik Indonesia.
- Prasetyo, R., Susilo, H., & Firdaus, A. M. (2023). Efektivitas biochar sekam padi sebagai adsorben timbal (Pb) dalam air limbah industri: Studi lapangan di Karawang, Jawa Barat. *Jurnal Teknik Lingkungan*, 14(2), 87–98.
- Qin, P., Wang, Y., Gan, L., Li, S., Liu, Q., Wang, M., & Qiu, Z. (2022). Biochar-based filter column for simultaneous removal of Pb, Cd, and Cr(VI) from wastewater. *Water Research*, 224, 119063.
- Shakoor, M. B., Nawaz, Z. A., Hussain, F., Raza, M., Ali, S., Rizwan, A., Oh, S., & Ahmad, S. (2020). A review of biochar-based sorbents for separation of heavy metals from water. *International Journal of Phytoremediation*, 22(2), 111–126.
- Wahyuni, H., Marlina, E., & Ramadhani, F. (2023). Perbandingan efisiensi adsorpsi logam berat oleh biochar sekam padi dan tempurung kelapa pada sistem aliran kontinyu. *Jurnal Sains dan Teknologi Lingkungan*, 15(1), 45–58.
- Wang, Y., Liu, L., Fang, H., Wan, X., & Cai, T. (2024). Research status, trends, and mechanisms of biochar adsorption for wastewater treatment. *Environmental Sciences Europe*, 36(1).
- World Health Organization. (2022). *Guidelines for drinking-water quality* (4th ed., incorporating the 1st and 2nd addenda). World Health Organization.
- Widyawati, I., & Fathurohman, T. (2023). Analisis kelayakan ekonomi teknologi filter biochar berbasis masyarakat untuk penyediaan air bersih di kawasan industri. *Jurnal Pengelolaan Sumberdaya Alam dan Lingkungan*, 13(2), 198–211.
- Xu, M., Xia, G., Wu, C., Li, W., Pan, B., & Xing, B. S. (2018). The factors affecting biochar application in restoring heavy metal-polluted soil: A review. *Chemistry and Ecology*, 34(2), 177–197.
- Zhang, S., Huang, J., Li, H., Liu, Y., Zhang, S., Liu, T., & Lei, Y. (2023). Rice husk and rice husk biochar as silicon-rich carriers for soil improvement and heavy metal immobilization. *Journal of Cleaner Production*, 382, 135295.