

Literature Review

Potensi Karbon Aktif Menggunakan Material Lokal Untuk Adsorpsi Logam Berat Dari Air Asam Tambang: Sebuah Kajian

Potential Of Locally Sourced Activated Carbon For Heavy Metal Adsorption From Acid Mine Drainage: A Review

Yudha Agung Pratama^{1*}, Mycelia Paradise²

¹Jurusan Teknik Geofisika, Fakultas Teknologi Mineral dan Energi, Universitas Pembangunan Nasional “Veteran” Yogyakarta, Indonesia. Jl. Padjajaran Jl. Ring Road Utara No.104, Ngropoh, Condongcatur, Kec. Depok, Kabupaten Sleman, Daerah Istimewa Yogyakarta 55283

²Program Studi Teknik Pertambangan, Fakultas Teknik dan Perencanaan, Institut Teknologi Nasional Yogyakarta, Indonesia. Jl. Babarsari, Tambak Bayan, Caturtunggal, Kec. Depok, Kabupaten Sleman, Daerah Istimewa Yogyakarta 55281

*Penulis korespondensi

e-mail: yudha.agung@upnyk.ac.id

ABSTRAK

Air asam tambang (AAT) merupakan limbah berbahaya yang mengandung logam berat seperti besi (Fe), mangan (Mn), tembaga (Cu), kadmium (Cd), dan merkuri (Hg), yang berpotensi mencemari lingkungan serta membahayakan kesehatan manusia. Kajian literatur ini bertujuan untuk mengevaluasi potensi karbon aktif berbasis material lokal dalam mengadsorpsi logam berat dari AAT melalui kajian terhadap sebelas artikel ilmiah terkini. Sumber karbon aktif yang digunakan meliputi limbah pertanian, biomassa, dan batubara lokal, yang telah melalui proses aktivasi fisik, kimia, atau kombinasi keduanya. Hasil kajian menunjukkan bahwa karbon aktif dari material lokal mampu menurunkan konsentrasi logam berat dengan efisiensi bervariasi, mencapai hingga 99,93%. Ukuran partikel dan metode aktivasi berpengaruh signifikan terhadap kapasitas adsorpsi, di mana ukuran partikel lebih kecil dan penggunaan aktivasi kimia atau kombinasi meningkatkan luas permukaan serta porositas karbon aktif.

Kata Kunci: air asam tambang, adsorpsi, karbon aktif, material lokal

ABSTRACT

Acid mine drainage (AMD) is a hazardous waste containing heavy metals such as iron (Fe), manganese (Mn), copper (Cu), cadmium (Cd), and mercury (Hg), which can pollute the environment and pose health risks. This study aims to evaluate the potential of locally sourced activated carbon for heavy metal adsorption from AMD through a review of eleven scientific articles. The activated carbon materials analyzed were derived from agricultural waste, biomass, and local coal, all subjected to physical, chemical, or combined activation methods. The findings indicate that activated carbon from local materials effectively reduced concentrations of heavy metals with efficiencies reaching up to 99.93%. Particle size and activation methods significantly influenced adsorption performance, where smaller particle sizes and chemical or combined activation enhanced surface area and porosity

Keywords: acid mine drainage, activated carbon, adsorption, local materials

I. PENDAHULUAN

Kegiatan penambangan seringkali menghasilkan air asam tambang (AAT), yang merupakan salah satu isu lingkungan utama akibat sifatnya yang sangat asam dan kandungan logam berat terlarut yang tinggi (Amari

et al., 2014; Simate & Ndlovu, 2014). AAT terbentuk akibat proses oksidasi mineral sulfida, terutama pirit, yang terpapar udara dan air (Akçıl & Koldas, 2005; Courtney & Pietrzykowski, 2018). AAT berpotensi mencemari sumber daya air permukaan maupun air tanah, menimbulkan ancaman serius bagi kualitas

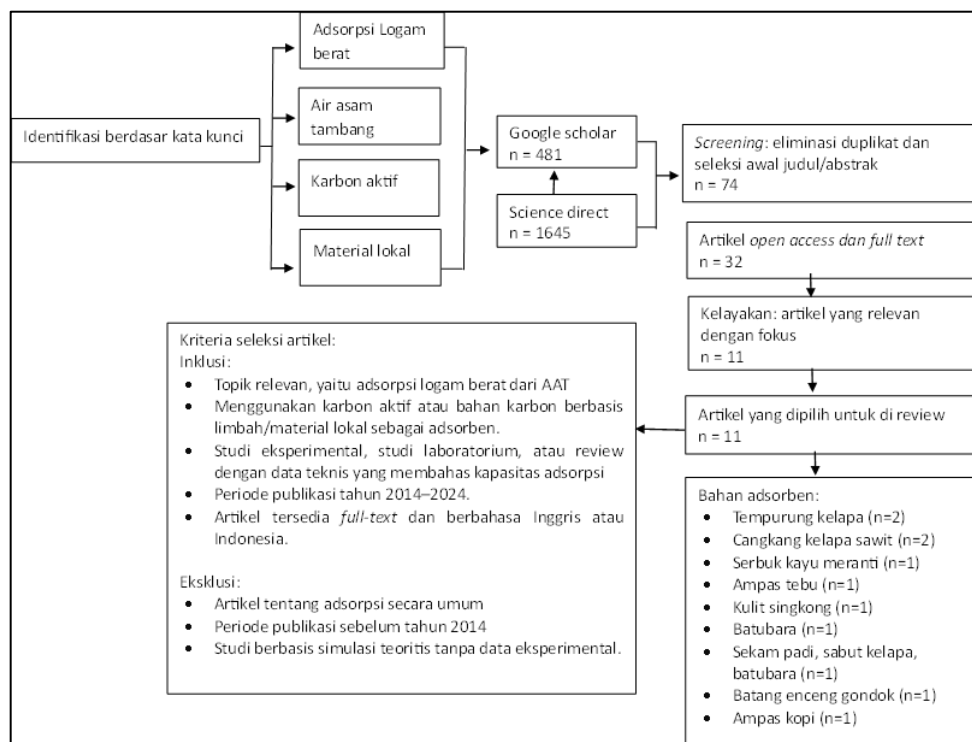
Naskah masuk : 11 Juni 2025
Revisi pertama : 22 Juni 2025
Naskah diterima : 25 Juni 2025
Naskah dipublikasi online : 26 Juni 2025

lingkungan, kesehatan masyarakat, serta infrastruktur (Chen et al., 2021). Air limbah tambang yang tidak melalui proses pengolahan dapat membawa padatan tersuspensi dan zat pencemar lainnya yang mengganggu keseimbangan kimia dan ekologi perairan, serta menurunkan kualitas lahan dan habitat (Miller, 2010; Sihotang et al., 2021; Kobpob & Kulikova, 2021). Karakteristik dan tingkat keparahan AAT sangat dipengaruhi oleh kondisi geologi setempat, komposisi mineralogi batuan, metode penambangan yang digunakan, serta faktor iklim (Tughyan, 2020; Makapob et al., 2018).

Berbagai material telah digunakan sebagai adsorben untuk pengolahan AAT, termasuk karbon aktif, zeolit, dan mineral lempung (Wang et al., 2021). Pemanfaatan sumber daya berkelanjutan dan adsorben berbasis limbah merupakan pendekatan yang menjanjikan, karena berpotensi menekan biaya serta memberikan solusi ramah lingkungan dalam mengatasi kontaminasi logam berat pada AAT (Aziz et al., 2023; Jibril et al., 2021; Latorrata et al., 2021). Aplikasi karbon aktif dalam skala besar masih memiliki tantangan tingginya biaya produksi karbon aktif komersial. Untuk mengatasi keterbatasan tersebut, berbagai penelitian telah diarahkan pada pemanfaatan material lokal yang melimpah dan berbiaya rendah sebagai bahan baku karbon aktif (Mohan et al., 2014). Berbagai sumber material lokal dapat digunakan sebagai adsorben logam berat, diantaranya tempurung kelapa, sabut kelapa, serbuk gergaji, sekam padi, limbah pertanian, serta limbah organik lainnya (Lu et al., 2020). Selain karbon aktif-

konvensional, biochar juga telah menjadi perhatian sebagai adsorben alternatif yang ramah lingkungan dan berkelanjutan. Biochar dihasilkan melalui pirolisis biomassa dan memiliki karakteristik fisikokimia yang mendukung untuk proses adsorpsi logam berat, seperti luas permukaan besar, volume pori tinggi, serta adanya gugus fungsi permukaan (Senthilkumar & Prasad, 2020; Liu et al., 2019). Fungsionalisasi biochar, misalnya dengan β -siklodekstrin, telah terbukti meningkatkan afinitas terhadap logam berat (Zhao et al., 2018).

Meskipun telah banyak studi mengenai potensi material lokal sebagai bahan baku karbon aktif, informasi mengenai efektivitas masing-masing jenis material dalam mengatasi AAT masih tersebar dan belum dibahas secara sistematis (Sud et al., 2008). Selain itu, belum banyak kajian yang memetakan jenis logam berat spesifik, efektivitas adsorpsi, serta metode aktivasi yang digunakan secara komprehensif. Oleh karena itu, kajian ini bertujuan untuk melakukan telaah sistematis terhadap literatur yang membahas penggunaan karbon aktif berbasis material lokal untuk adsorpsi logam berat dalam air asam tambang. Melalui pendekatan *Systematic Literature Review* (SLR), studi ini berupaya mengidentifikasi jenis material lokal yang paling potensial, metode aktivasi yang umum digunakan, serta kinerja adsorpsi terhadap jenis logam berat tertentu. Manfaat dari kajian ini adalah sebagai dasar ilmiah dalam pengembangan teknologi pengolahan AAT yang berbiaya rendah dan berbasis sumber daya lokal, serta sebagai referensi dalam memilih jenis adsorben yang tepat dan aplikatif di lapangan.



Gambar 1. Diagram alir SLR

II. METODE

Pedoman PRISMA 2020 (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses) digunakan dalam penulisan artikel ini dengan pendekatan Systematic Literature Review (SLR). Metode ini digunakan secara sistematis untuk menelusuri, mengevaluasi, dan mensintesis berbagai penelitian tentang adsorpsi logam berat dari air asam tambang (AAT) dengan karbon aktif, terutama yang berasal dari limbah atau material lokal khusus yang diadaptasi di Indonesia. Tahapan dalam proses SLR ini meliputi: (1) identifikasi dokumen melalui pencarian berbasis kata kunci yang telah ditentukan; (2) proses screening untuk memilah artikel berdasarkan judul dan abstrak; serta (3) seleksi artikel yang memenuhi syarat terkait inklusi dan eksklusi. Sumber data utama dalam studi ini diperoleh dari Google Scholar dan ScienceDirect, dengan menggunakan kata kunci: adsorpsi logam berat, air asam tambang, karbon aktif, dan material lokal. Hasil awal pencarian menghasilkan 481 artikel dari Google Scholar dan 1.645 artikel dari ScienceDirect. Setelah melakukan proses penyaringan dan seleksi sesuai dengan kriteria yang disebutkan di atas, sebelas artikel dianggap paling relevan dan memenuhi kriteria untuk analisis lebih lanjut. Analisis dalam studi ini mencakup informasi mengenai klasifikasi bahan baku karbon aktif, parameter proses adsorpsi (pH, dosis, waktu kontak, konsentrasi, suhu), efisiensi penghilangan logam berat, serta kajian terhadap model isoterm dan kinetika adsorpsi yang digunakan. Gambar 1 menunjukkan diagram alir SLR pada kajian ini.

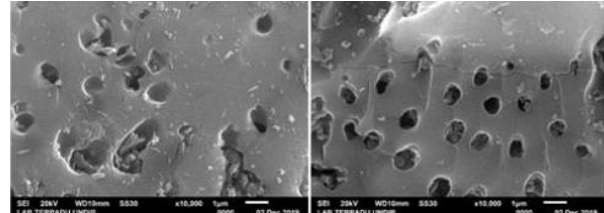
III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Kajian ini menganalisa 11 artikel ilmiah lokal yang membahas pemanfaatan karbon aktif dari berbagai material untuk mengadsorpsi logam berat dalam air asam tambang. Seluruh material yang digunakan telah melalui proses aktivasi, baik secara fisik, kimia, maupun kombinasi keduanya, untuk meningkatkan daya adsorpsinya terhadap logam-logam seperti besi (Fe), mangan (Mn), tembaga (Cu), kadmium (Cd), dan merkuri (Hg).

Karakteristik Karbon Aktif

Karbon aktif merupakan material ideal untuk menyerap logam berat sebab memiliki luas permukaan yang besar (Demirbaş, 2004; Wu & Tseng, 2005). Sebagai ilustrasi, satu gram karbon aktif dapat memiliki luas permukaan antara 500 hingga 3000 m² (Aziz et al., 2024), yang mengindikasikan kapasitas adsorpsi yang sangat baik (Kerimkulova et al., 2017; Yuliusman et al., 2017). Luas permukaan yang tinggi ini memungkinkan karbon aktif untuk mengadsorpsi berbagai jenis zat dengan efektif (Al-Soudany et al., 2018). Efektivitas karbon aktif dalam mengadsorpsi logam berat terutama disebabkan oleh sifat fisikokimia unik yang dimilikinya, seperti keberadaan gugus fungsi aktif pada permukaan dan struktur pori yang

berkembang dengan baik (Hariani et al., 2013). Mikropori dan mesopori sangat berperan dalam adsorpsi molekul logam berat. Karbon aktif umumnya memiliki volume pori yang besar, yaitu berkisar antara 0,2 hingga 1,8 cm³/g, tergantung pada bahan baku dan metode aktivasi yang digunakan. Volume pori yang tinggi ini berperan penting dalam meningkatkan kapasitas adsorpsi, karena menyediakan ruang yang lebih besar untuk penyerapan molekul atau ion dari larutan (Gupta & Suhas, 2009).



Gambar 2. *Scanning Electron Microscope* (SEM) arang aktif cangkang kelapa sawit yang tidak diaktivasi (kiri) dan yang diaktivasi menggunakan H₃PO₄ (kanan) pada pembesaran 10.000× (Najmia dkk., 2021)

Gambar SEM (gambar 2) menunjukkan perbedaan morfologi arang aktif cangkang kelapa sawit sebelum dan setelah aktivasi. Pada arang aktif tanpa aktivasi (kiri), permukaan terlihat lebih kasar dengan pori-pori yang lebih kecil dan kurang terstruktur. Sebaliknya, pada arang aktif yang telah diaktivasi dengan H₃PO₄ (kanan), tampak adanya peningkatan jumlah dan ukuran pori, yang menunjukkan bahwa proses aktivasi berhasil memperbesar luas permukaan dan meningkatkan potensi adsorpsi.

Tabel 1. Hasil uji BET karbon aktif dari batubara teraktivasi

Jenis	Luas Permukaan (m ² /g)	Volume Pori (cc/g)	Diameter Pori (Å)
Batubara 60 Mesh	2,876	0,0039	27,3252
Karbon Aktif	296,379	0,1562	10,5419

(Sumber: Yulianti dkk, 2024)

Berdasarkan hasil pengujian BET (Tabel 1), diperoleh data luas permukaan batubara 60 mesh sebesar 2,876 m²/g, yang mengalami peningkatan signifikan setelah diubah menjadi karbon aktif, yaitu sebesar 296,379 m²/g. Pengujian ini menunjukkan terjadinya peningkatan luas permukaan yang cukup besar. Selain itu, volume pori juga mengalami peningkatan, dari 0,0039 cc/g pada batubara menjadi 0,1562 cc/g setelah proses aktivasi. Peningkatan luas permukaan yang signifikan berkontribusi terhadap bertambahnya nilai volume pori. Sementara itu, pengukuran diameter pori batubara 60 mesh menunjukkan ukuran 27,3252 Å, namun setelah aktivasi dan karbonisasi, diameter pori berkurang menjadi 10,5419 Å. Diameter pori yang lebih kecil ini dapat meningkatkan jumlah pori dan memperbesar luas permukaan.

Sumber Bahan Karbon Aktif

Dalam beberapa dekade terakhir, tren global menunjukkan peningkatan signifikan dalam pemanfaatan limbah pertanian sebagai bahan baku produksi karbon aktif. Dorongan terhadap pengembangan adsorben berbasis limbah ini dipicu oleh beberapa faktor, antara lain meningkatnya kesadaran akan keberlanjutan lingkungan, ketersediaan sumber daya limbah yang melimpah, serta kebutuhan untuk menekan biaya produksi karbon aktif komersial. Penggunaan karbon aktif secara luas didorong oleh efisiensi biaya, kemudahan operasional, serta kemampuannya untuk beradaptasi terhadap beragam kondisi proses, menjadikannya pilihan utama dalam penanganan pencemaran lingkungan dan pemulihan sumber daya (Sulaiman et al., 2021). Penelitian-penelitian terbaru banyak mengarahkan fokus pada biomassa pertanian seperti tempurung kelapa, sekam padi, cangkang kelapa sawit, batang jagung, ampas kopi, dan limbah kayu. Bahan-bahan ini tidak hanya murah dan mudah diperoleh, tetapi juga menawarkan karakteristik kimia dan struktur yang mendukung pembentukan karbon aktif berkualitas tinggi. Proses aktivasi fisika dan kimia terus dioptimalkan untuk menghasilkan karbon aktif dengan luas permukaan besar, distribusi ukuran pori yang terkontrol, serta gugus fungsi aktif yang disesuaikan untuk aplikasi tertentu, seperti pengolahan air limbah, adsorpsi gas, dan pemurnian logam berat, limbah pertanian dan biomassa seperti tempurung kelapa, cangkang kelapa sawit, ampas tebu, kulit singkong, serbuk kayu meranti, batang eceng gondok, dan ampas kopi merupakan sumber prekursor yang berkelanjutan dan ekonomis (Adinata dkk., 2005). Bahan dasar karbon aktif dalam 11 penelitian yang dianalisis (Tabel 2) semuanya berasal dari material lokal dan dapat dikategorikan menjadi dua kelompok besar yaitu limbah pertanian dan biomassa (10 artikel) terdiri atas tempurung kelapa, cangkang kelapa sawit, ampas tebu, kulit singkong, serbuk kayu meranti, batang eceng gondok, dan ampas kopi dan batubara (1 artikel) sebagai sumber karbon alami yang diolah menjadi karbon aktif. Pemanfaatan limbah pertanian menunjukkan potensi ganda, yaitu pengurangan limbah dan pengolahan air tercemar secara berkelanjutan. Penerapan adsorben dari limbah dan sumber daya alam, termasuk kondisi operasional dalam penelitian terkait, dapat dilihat pada Tabel 2. Tabel 2 merangkum berbagai sumber bahan baku karbon aktif yang digunakan dalam 11 penelitian yang dianalisis, beserta kondisi operasional utama seperti metode aktivasi, jenis aktivator, dan parameter proses lainnya. Data ini memperlihatkan kecenderungan kuat dalam pemanfaatan limbah pertanian dan biomassa sebagai bahan dasar karbon aktif, sekaligus menunjukkan keberagaman pendekatan dalam proses aktivasi untuk meningkatkan kinerja adsorpsi terhadap logam berat.

Metode Aktivasi

Sintesis karbon aktif umumnya dilakukan melalui proses karbonisasi bahan prekursor yang kaya karbon, seperti batu bara, kayu, gambut, serta limbah pertanian seperti tempurung kelapa, yang kemudian diikuti dengan proses aktivasi untuk meningkatkan porositas dan fungsionalitas permukaannya (Zakaria et al., 2021). Peningkatan luas permukaan dan porositas akibat proses aktivasi berkontribusi secara langsung terhadap peningkatan kapasitas adsorpsi karbon aktif (Sulaiman et al., 2021). Modifikasi permukaan dengan gugus fungsi atau pelapis tertentu juga berperan dalam meningkatkan efisiensi dan selektivitas adsorpsi logam berat (Zieliński et al., 2022). Proses aktivasi dapat dilakukan secara fisik, menggunakan gas seperti uap atau karbon dioksida pada suhu tinggi, maupun secara kimia, dengan bahan kimia seperti asam fosfat, kalium hidroksida, atau seng klorida (Kalderis et al., 2008). Pemilihan metode aktivasi dan jenis prekursor NAJM secara signifikan mempengaruhi sifat tekstur dan karakteristik permukaan karbon aktif yang dihasilkan, yang pada akhirnya menentukan kinerjanya dalam aplikasi tertentu (Yuliusman et al., 2017). Kapasitas adsorpsi karbon aktif sangat dipengaruhi oleh suhu karbonisasi yang digunakan selama proses produksinya. Penelitian menunjukkan bahwa suhu karbonisasi yang lebih tinggi cenderung meningkatkan luas permukaan dan volume pori (Negara et al., 2020). Metode aktivasi yang digunakan pada 11 artikel bervariasi antar penelitian, meliputi aktivasi kimia menggunakan larutan seperti H_3PO_4 , NaOH, dan HCl serta aktivasi fisika pada suhu 300°C hingga 900°C. Beberapa penelitian juga mengombinasikan aktivasi kimia dan fisika. Karbon aktif dari cangkang kelapa sawit yang diaktivasi dengan H_3PO_4 dan aktivasi fisika pada suhu 750°C mampu menurunkan kadar Fe hingga 89,68% (Najmia et al., 2021). Karbon aktif dari ampas tebu juga menunjukkan hasil optimal setelah diaktivasi kimia menggunakan HCl dan aktivasi fisika pada suhu 600°C (Imani et al., 2021).

Ukuran partikel adsorben

Ukuran partikel karbon aktif mempengaruhi luas permukaan dan porositas, yang berdampak pada kapasitas adsorpsi. Ukuran partikel adsorben secara signifikan memengaruhi berbagai parameter penting, termasuk luas permukaan eksternal, kinetika difusi intrapartikel, serta kapasitas adsorpsi secara keseluruhan, yang pada akhirnya menentukan efisiensi dan efektivitas proses pemisahan maupun pemurnian (Gee & Or, 2002). Partikel dengan ukuran lebih kecil cenderung memiliki luas permukaan eksternal yang lebih besar per satuan massa dibandingkan dengan partikel berukuran lebih besar (Hanemann & Szabó, 2010). Peningkatan luas permukaan ini menyediakan lebih banyak situs aktif bagi interaksi molekul adsorbat, sehingga memfasilitasi kinetika adsorpsi yang lebih baik dan meningkatkan kapasitas penyerapan pada kondisi kesetimbangan (Manchisi et

al., 2020). Pengurangan ukuran partikel secara intrinsik berkaitan dengan peningkatan probabilitas adsorpsi, sebagaimana telah dibuktikan secara statistik melalui sejumlah percobaan penempelan partikel (Kang et al., 2018). Selain itu, pengaturan distribusi ukuran partikel memperkenalkan kompleksitas tambahan dalam dinamika proses adsorpsi, sebab polidispersitas ukuran partikel dapat memengaruhi efisiensi cakupan permukaan (Marques et al., 2012). Hubungan antara ukuran partikel dan kinerja adsorpsi tidak hanya terbatas pada aspek luas permukaan, tetapi juga mencakup peran penting difusi intrapartikel (Akhtar et al., 2024). Panjang jalur difusi, yaitu jarak yang harus ditempuh oleh molekul adsorbat untuk mencapai situs aktif internal, sebanding dengan ukuran partikel. Oleh karena itu, partikel yang lebih kecil memungkinkan jalur difusi yang lebih pendek, sehingga mempercepat kinetika difusi intrapartikel dan memungkinkan pencapaian kesetimbangan adsorpsi dalam waktu yang lebih singkat (Rodriguez & Alvarado, 2012). Berdasarkan 11 artikel yang dianalisis, serbuk kayu meranti memiliki luas permukaan 13-16 m²/g (Busyairi et al., 2019) dan

karbon aktif dari Batubara 296 m²/g (Yulianti et al., 2024). Perbedaan tersebut mencerminkan peran penting proses aktivasi dalam meningkatkan performa material sebagai adsorben. Karbon aktif memiliki struktur mikropori dan luas permukaan internal yang tinggi, yang memungkinkan terjadinya proses adsorpsi secara efisien terhadap berbagai jenis polutan, baik dalam fase cair maupun gas. Karbon aktif berbasis batubara secara umum menunjukkan karakteristik fisik yang unggul, seperti kandungan karbon yang tinggi, struktur pori yang stabil, dan kemampuan untuk membentuk mikropori dalam jumlah besar. Hal ini menjadikannya sebagai bahan baku yang efektif untuk pembuatan adsorben dengan kinerja tinggi. Namun demikian, sumber bahan alternatif seperti biomassa (termasuk serbuk kayu meranti) tetap memiliki potensi yang signifikan, terutama dari sisi keberlanjutan, ketersediaan yang melimpah, dan nilai ekonomisnya (Busyairi et al., 2019).

Tabel 2. Aplikasi adsorben berbasis material lokal dan parameter adsorpsinya

Referensi	Adsorben						adsorpsi				pH		Isoterm	Kondisi optimum	
	Bahan	Massa	Metode pembuatan	Luas permukaan (m2/g)	Ukuran partikel	Logam berat	Waktu kontak (menit)	suhu	rpm	Efisiensi (%)	Kapasitas (mg/g)	Awal			akhir
Busyairi et al., 2019	Serbuk kayu meranti	N/A	Aktivasi kimia: KOH 1M dan pemanasan pada suhu 600°C	80 mesh: 13,5034 100 mesh: 16,3763	80 dan 100 mesh	Besi (Fe), Mangan (Mn)	10, 20, 30, dan 40	N/A	100	Fe: 99,909%; Mn: 92,919%	Fe: 7,4242 Mn: 5,2608	3,10	5,0 – 6,4	Isoterm Freundlich untuk Fe dan Mn	Ukuran adsorben: 100 mesh, waktu kontak: 40 menit
Noor et al., 2020	Cangkang kelapa sawit	5, 10, 20, 30	Aktivasi kimia menggunakan H ₃ PO ₄	N/A	N/A	Kadmium (Cd) dan Tembaga (Cu)	N/A	N/A	N/A	Cd: 51,16%; Cu: 4,82%	N/A	3,88	Tanpa aktivasi: 5,05. dengan aktivasi: 5,21	N/A	Dosis 5 gram arang aktif teraktivasi H ₃ PO ₄
Najmia et al., 2021	Cangkang kelapa sawit	5, 10, 20, dan 30	Aktivasi kimia: H ₃ PO ₄ 5% dan pemanasan pada suhu 750°C	N/A	100 mesh	Besi (Fe) dan Mangan (Mn)	120	N/A	100	Fe: 89,68%; Mn: 7,38%	N/A	3,8	5-5,2	N/A	Massa adsorben 30 gram
Imani et al., 2021	Ampas tebu	1,2,3	Aktivasi kimia: HCl 0,1 N dan pemanasan pada suhu 600°C	N/A	200 mesh	Besi (Fe) dan Mangan (Mn)	30, 60, 90	N/A	N/A	Fe: 79,65%; Mn: 60%	N/A	3,26	N/A	N/A	3 gram adsorben, waktu kontak 60 menit
Nimah et al., 2022	Limbah tempurung kelapa	2, 3, 4, 6, 7	aktivasi kimia: H ₃ PO ₄ 20% dan pemanasan pada suhu 300°C	N/A	N/A	Tembaga (Cu ²⁺) dan Mangan (Mn ²⁺)	N/A	N/A	N/A	Cu ²⁺ : 57,62%; Mn ²⁺ : 91,37%	Mn: 15,16; Cu: 4,7	N/A	N/A	isoterm langmuir	4 gram adsorben
Jabat et al., 2023	batang eceng gondok	1, 2, 3, dan 5	Aktivasi kimia: NaOH 2M dan pemanasan suhu 350°C	N/A	100 mesh	Besi (Fe) dan Mangan (Mn)	60	25	100	Fe: 99,8%; Mn: 96,3%	N/A	N/A	N/A	N/A	Massa adsorben 5 gram
Muharani & Purbana, 2023	Ampas kopi	2, 3, 4	Aktivasi kimia: NaOH 10% dan pemanasan suhu 300°C	N/A	N/A	Merkuri (Hg)	30, 60, dan 90	N/A	90	99,93%	N/A	6,2	7,5	Isoterm Langmuir	Massa adsorben 4 gram
Eli et al., 2024	Kulit singkong	3	aktivasi kimia: KOH 3 M dan pemanasan suhu 350°C	N/A	100 mesh	Besi (Fe) dan Mangan (Mn)	30, 60, dan 90	N/A	100	Fe: 99,33%; Mn: 89,01%	Fe: 14,2589; Mn: 5,4714	2,62	6,4	Freundlich untuk Fe dan Mn	Fe: 30 menit, Mn: 90 menit
Yulianti et al., 2024	batubara	2	Aktivasi kimia: H ₃ PO ₄ 40%; pemanasan pada suhu 800°C	296,379	60 mesh	Besi (Fe) dan Mangan (Mn)	N/A	N/A	N/A	Fe: 99,47%; Mn: 99,93%	Fe: 2,81; Mn: 1,52	N/A	N/A	Fe: Langmuir Mn: Freundlich	konsentrasi awal Fe: 28,2541 mg/L; Mn: 15,2241 mg/L
Miranda et al., 2024	tempurung kelapa	2, 4, 6, dan 8	Aktivasi kimia: H ₃ PO ₄ 1M dan pemanasan pada suhu 900°C	N/A	N/A	Besi (Fe) dan Mangan (Mn)	30, 60, 90, dan 120	N/A	N/A	Fe: 99,09%; Mn: 96,98%	N/A	3,52	7,6-9,7	Isoterm Freundlich untuk Fe dan Mn)	Massa adsorben: 8 gram; Waktu kontak: 120 menit
Hendriono et al., 2025	Sekam padi, sabut kelapa, dan batubara	25, 50	Aktivasi kimia: NaOH 30% dan pemanasan pada suhu 650°C	N/A	N/A	Besi (Fe) dan tembaga (Cu)	24, 48, 72 jam	N/A	N/A	Fe: 98,90%; Cu 98,71%	N/A	3,8	7	N/A	50 gram adsorben, 72 jam waktu kontak

Efisiensi dan Kapasitas Adsorpsi

Kinerja karbon aktif sebagai adsorben sangat berkaitan dengan struktur pori-porinya, yang terdiri atas mikropori, mesopori, dan makropori. Struktur pori ini secara signifikan memengaruhi aksesibilitas molekul adsorbat ke permukaan internal, sehingga menentukan kapasitas adsorpsi secara keseluruhan. Komposisi kimia prekursor, khususnya rasio selulosa, hemiselulosa, dan lignin, sangat memengaruhi karakteristik karbon aktif yang dihasilkan (Contescu et al., 2018). Efisiensi penurunan logam berat sangat bervariasi. Sebagian besar studi menunjukkan efisiensi penurunan Fe yang sangat tinggi, dengan nilai mencapai hingga 99,909% (Busyairi et al., 2019). Efisiensi penurunan Mn bervariasi, dengan nilai tertinggi hingga 99,93% (Yulianti et al., 2024), namun ada juga yang melaporkan efisiensi lebih rendah, seperti 7,38% (Najmia et al., 2021). Efisiensi penurunan Cu mencapai hingga 98,71% (Hendriono et al., 2025), menunjukkan potensi karbon aktif dalam mengadsorpsi logam ini. Efisiensi penurunan Cd dilaporkan hingga 51,16% (Noor et al., 2020), menunjukkan bahwa beberapa karbon aktif memiliki kemampuan terbatas dalam mengadsorpsi Cd. Penurunan Hg mencapai efisiensi hingga 99,93% (Muharani & Purba, 2023), menunjukkan efektivitas karbon aktif dari ampas kopi dalam mengadsorpsi Hg. Beberapa penelitian melaporkan kapasitas adsorpsi dengan rentang 1,52-15,16 mg/g, tergantung pada logam target, jenis adsorben, dan kondisi uji.

Model Isoterm Adsorpsi

Sebagian besar studi menggunakan model isoterm Langmuir dan Freundlich untuk menggambarkan perilaku adsorpsi. Model Langmuir digunakan untuk permukaan homogen dengan adsorpsi monolayer. Yulianti et al. (2024) melaporkan bahwa adsorpsi ion Fe oleh karbon aktif dari batubara mengikuti model Langmuir dengan nilai koefisien determinasi (R^2) sebesar 99%, menunjukkan kesesuaian yang sangat baik dengan model ini. Sementara itu, Nimah et al. (2022) juga melaporkan bahwa adsorpsi ion logam Cu dan Mn oleh karbon aktif mengikuti model Langmuir. Muharani & Purba (2023) melaporkan bahwa adsorpsi ion logam Hg oleh karbon aktif mengikuti model Langmuir. Model Freundlich digunakan untuk permukaan heterogen. Busyairi et al. (2019), Eli et al. (2024) dan Miranda et al. (2024) dalam penelitiannya menunjukkan bahwa adsorpsi ion Fe dan Mn oleh karbon aktif mengikuti model Freundlich. Pemilihan model isoterm yang tepat sangat penting untuk memahami mekanisme dan efisiensi proses adsorpsi. Model Langmuir menggambarkan adsorpsi yang terjadi secara seragam pada satu lapisan permukaan aktif, sedangkan model Freundlich lebih sesuai untuk permukaan yang tidak seragam dan heterogen. Hasil studi tersebut menunjukkan bahwa karakteristik permukaan adsorben, jenis ion logam, serta kondisi

proses sangat mempengaruhi kecocokan model. Oleh karena itu, analisis isoterm adsorpsi tidak hanya berfungsi untuk menggambarkan kapasitas adsorpsi, tetapi juga memberikan gambaran mengenai sifat fisis dan kimiawi dari sistem adsorpsi yang digunakan.

IV. KESIMPULAN

Karbon aktif yang berasal dari material lokal, seperti limbah pertanian dan biomassa, menunjukkan potensi signifikan dalam mengadsorpsi logam berat dari air asam tambang. Proses aktivasi, baik secara fisik, kimia, maupun kombinasi keduanya, terbukti meningkatkan efisiensi adsorpsi terhadap logam-berat seperti Fe, Mn, Cu, Cd, dan Hg, dengan efisiensi penurunan mencapai 99,93%. Kajian ini berkontribusi dalam memperkaya literatur mengenai pemanfaatan material lokal sebagai solusi berkelanjutan untuk pengolahan air asam tambang, serta memberikan dasar ilmiah bagi pengembangan teknologi adsorpsi yang ramah lingkungan dan ekonomis. Penelitian lanjutan terkait optimalisasi parameter adsorpsi masih diperlukan. Selain itu, pengembangan karbon aktif dari material lokal lainnya yang belum banyak diteliti dapat menjadi alternatif potensial.

DAFTAR PUSTAKA

- Adinata, D., Wandaud, W., & Aroua, M. K. (2005). Preparation and characterization of activated carbon from palm shell by chemical activation with K_2CO_3 . *Bioresource Technology*, 98(1), 145. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2005.11.006>
- Ahmad, H., Ee, C., & Baharudin, N. (2016). A preliminary study for removal of heavy metals from acidic synthetic wastewater by using pressmud-rice husk mixtures. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 36, p. 012031). IOP Publishing. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/36/1/012031>
- Akçıl, A., & Koldaş, S. (2005). Acid mine drainage (AMD): Causes, treatment and case studies. *Journal of Cleaner Production*, 14(12-13), 1139–1145. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2004.09.006>
- Akhtar, M. S., Ali, S., & Zaman, W. (2024). Innovative adsorbents for pollutant removal: Exploring the latest research and applications. *Molecules*, 29(18), 4317.
- Amari, K., Valera, P., Hibti, M., Pretti, S., Marcello, A., & Essarraj, S. (2014). Impact of mine tailings on surrounding soils and groundwater: Case of Kettara old mine, Morocco. *Journal of African Earth Sciences*, 100, 437–445. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2014.07.017>
- Aziz, K. H. H., Mustafa, F. S., Omer, K. M., Hama, S., Hamarawf, R. F., & Rahman, K. O. (2023). Heavy metal pollution in the aquatic environment: Efficient and low-cost removal approaches to eliminate their toxicity: A review. *RSC Advances*,

- 13,14608–14648.
<https://doi.org/10.1039/D3RA00723E>
- Aziz, S., Mazhar, A. R., Ubaid, A., Shah, S. M. H., Riaz, Y., Talha, T., & Jung, D. W. (2024). A comprehensive review of membrane-based water filtration techniques [Review of A comprehensive review of membrane-based water filtration techniques]. *Applied Water Science*, 14(8). Springer Nature. <https://doi.org/10.1007/s13201-024-02226-y>
- Bishnoi, N. R., Bajaj, M., Sharma, N., & Gupta, A. (2003). Adsorption of Cr(VI) on activated rice husk carbon and activated alumina. *Bioresource Technology*, 91(3), 305–307. [https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(03\)00204-9](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(03)00204-9)
- Busyairi, M., Firlina, F., Sarwono, E., & Saryadi, S. (2019). Pemanfaatan serbuk kayu meranti menjadi karbon aktif untuk penurunan kadar besi (Fe), mangan (Mn) dan kondisi pH pada air asam tambang. *Jurnal Sains & Teknologi Lingkungan*, 11(2), 87–101
- Chakravarty, P., Sarma, N. S., & Sarma, H. (2010). Biosorption of cadmium(II) from aqueous solution using heartwood powder of Areca catechu. *Chemical Engineering Journal*, 162(3), 949–955. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2010.06.048>
- Chen, J., Deng, S., Wei, J., Li, X., & Chang, J. (2021). Removal of multiple heavy metals from mining-impacted water by biochar-filled constructed wetlands: Adsorption and biotic removal routes. *Bioresource Technology*, 331, 125061. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.125061>
- Courtney, R., & Pietrzykowski, M. (2018). Soil quality indices for evaluation of acid mine spoil. In Elsevier eBooks (pp. 33–54). Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812986-9.00002-6>
- Demirbaş, A. (2004). Effects of temperature and particle size on bio-char yield from pyrolysis of agricultural residues. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 72(2), 243. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2004.07.003>
- Dhiwar, J. (2021). Metal removal from acid mine water by using the SAPS. *International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology*, 9(4), 1694–1698. <https://doi.org/10.22214/ijraset.2021.34648>
- Eli, M., Magdalena, H., Nugroho, W., Devi, S. D., & Winarno, A. (2024). Pemanfaatan Kulit Singkong Guna Menurunkan pH Dan Kadar Fe Mn Pada Air Asam Tambang Pada PT. Anugerah Krida Utama Kalimantan Timur. *Jurnal Cahaya Mandalika Issn 2721-4796 (Online)*, 5(1), 284–296
- Gee, G.W. and Or, D. (2002). 2.4 Particle-Size Analysis. In *Methods of Soil Analysis* (eds J.H. Dane and G. Clarke Topp). <https://doi.org/10.2136/sssabookser5.4.c12>
- Guo, X., Zhang, S., & Shan, X. (2007). Adsorption of metal ions on lignin. *Journal of Hazardous Materials*, 151(1), 134–142. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.05.065>
- Gupta, V. K. (2009). Application of low-cost adsorbents for dye removal—a review. *Journal of environmental management*, 90(8), 2313–2342
- Hariani, P. L., Faizal, M., Ridwan, R., Marsi, & Setiabudidaya, D. (2013). Characterization of Activated Carbon from Oil Palm Shell Prepared by H3PO4 for Procion Red Dye Removal. *Applied Mechanics and Materials*, 391, 51. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amm.391.51>
- Hendriono, H., Cahyadi, T. A., & Ernawati, R. (2025). Neutralizing Acid Mine Drainage (AMD) and Reducing Iron (Fe) and Copper (Cu) Content Using Biomass Adsorbents. *Journal of Earth and Marine Technology (JEMT)*, 5(2), 142–150.
- Imani, A., Sukwika, T., & Febrina, L. (2021). Karbon aktif ampas tebu sebagai adsorben penurun kadar besi dan mangan limbah air asam tambang. *Jurnal Teknologi*, 13(1), 33–42.
- Jaba, Y., Nugroho, W., Oktaviani, R., Devy, S. D., & Pontus, A. J. (2023). Efektivitas Penggunaan Arang Batang Eceng Gondok dalam Penurunan Kadar Logam Besi (Fe) dan Mangan (Mn) pada Air Asam Tambang PT. Anugerah Krida Utama. *Jurnal Teknologi Mineral Ft Unmul*, 11(2), 42–48.
- Jibril, H. B., Salga, S. M., Ahmed, S., & Saddiq, M. (2021). Application of agricultural wastes for the aqueous removal of heavy metals from wastewater. *FUDMA Journal of Sciences*, 5(3), 231–236. <https://doi.org/10.33003/fjs-2021-0503-748>
- Kerimkulova, A., Azat, C., Manocha, L., Manocha, S., Zhusupova, G., & Mansurov, Z. (2017). Synthesis and application of carbon adsorbents in chromatographic separation of biologically active complexes. *Frontiers in Nanoscience and Nanotechnology*, 3(2). <https://doi.org/10.15761/fnn.1000150>
- Kujawska, J., & Wasąg, H. (2021). Biochar: A low-cost adsorbent of Methylene Blue from aqueous solutions. *Journal of Physics: Conference Series*, 1736(1), 012002. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1736/1/012002>
- Kovrov, O. S., & Kulikova, D. (2021). Improvement of the mine water purification efficiency via modified settling tank. *Ecological Engineering & Environmental Technology*, 23(3), 84–90.
- Latorrata, S., Balzarotti, R., Adami, M. I., Marino, B., Mostoni, S., Scotti, R., Bellotto, M., & Cristiani, C. (2021). Wastewater treatment using alkali-

- activated-based sorbents produced from blast furnace slag. *Applied Sciences*, 11(7), 2985. <https://doi.org/10.3390/app11072985>
- Liu, L., Li, Y., & Fan, S. (2019). Preparation of KOH and H₃PO₄ modified biochar and its application in methylene blue removal from aqueous solution. *Processes*, 7(12), 891. <https://doi.org/10.3390/pr7120891>
- Lu, N., Han, J., Wei, Y., Li, G., & Sun, Y. (2020). The heavy metal adsorption capacity of stalk biochar in an aqueous phase. *Applied Ecology and Environmental Research*, 18(2), 2569–2579. https://doi.org/10.15666/aeer/1802_25692579
- Marques, J. F., Lima, A. B., Araújo, N. A. M., & Cadilhe, A. (2012). Effect of particle polydispersity on the irreversible adsorption of fine particles on patterned substrates. *Physical Review E—Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics*, 85(6), 061122.
- Miller, B. G. (2010). The effect of coal usage on human health and the environment. In Elsevier eBooks (pp. 85–117). Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/B978-1-85617-710-8.00004-2>
- Miranda, V., Nugroho, W., Magdalena, H., Devy, S. D., & Hasan, H. (2024). Efektivitas Adsorpsi Karbon Aktif Tempurung Kelapa Terhadap Kandungan Besi (Fe) dan Mangan (Mn) Serta pH Pada Pengelolaan Air Asam Tambang Batubara. *Jurnal Inovasi Global*, 2(2), 214–228.
- Mohan, D., Sarswat, A., Ok, Y. S., & Pittman, C. U. (2014). Organic and inorganic contaminants removal from water with biochar, a renewable, low cost and sustainable adsorbent – A critical review. *Bioresource Technology*, 160, 191–202. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.01.120>
- Molahid, V. L. M., Kusin, F. M., Hasan, S. N. M. S., Ramli, N. A. A., & Abdullah, A. M. (2022). CO₂ sequestration through mineral carbonation: Effect of different parameters on carbonation of Fe-rich mine waste materials. *Processes*, 10(2), 432. <https://doi.org/10.3390/pr10020432>
- Muharani, S., & Purba, E. (2023). Mercury (Hg) Adsorption in Traditional Gold Mining Liquid Waste with Activated Carbon from Coffee Ground. *Indonesian Journal of Chemical Science*, 12(1), 70–80.
- Najmia, H., Mahreda, E. S., Mahyudin, R. P., & Kissinger, K. (2021). Pemanfaatan Arang Aktif Cangkang Kelapa Sawit Teraktivasi H₃PO₄ untuk Penurunan Kadar Besi (Fe), Mangan (Mn) dan Kondisi pH pada Air Asam Tambang. *EnviroScienceae*, 17(1), 30–37.
- Naseer, A., Jamshaid, A., Hamid, A., Muhammad, N., Ghauri, M., Iqbal, J., Rafiq, S., Shahzad, K., & Shah, N. S. (2018). Lignin and lignin based materials for the removal of heavy metals from wastewater—An overview. *Zeitschrift für Physikalische Chemie*, 233(3), 315–329. <https://doi.org/10.1515/zpch-2018-1209>
- Nimah, L., Mahfud, M., & Juliastuti, S. R. (2022). Study of Activated Carbon from Coconut Shell Waste to Adsorb Cu and Mn Metals in Acid Mine Drainage. *Journal of Fibers and Polymer Composites*, 1(1), 34–42.
- Noor, I., Priatmadi, B. J., Fatmawati, F., & Kissinger, K. (2020). Pemberian Arang Aktif Dari Cangkang Kelapa Sawit Terhadap Penyerapan Logam Berat Kadmium (Cd) Dan Tembaga (Cu) Pada Air Asam Tambang. *EnviroScienceae*, 16(2), 216–224.
- Obasi, P. N., & Akudinobi, B. B. (2020). Potential health risk and levels of heavy metals in water resources of lead–zinc mining communities of Abakaliki, southeast Nigeria. *Applied Water Science*, 10, 232. <https://doi.org/10.1007/s13201-020-01233-z>
- Ramírez-Rodríguez, T., & de Landa Castillo-Alvarado, F. (2012). Application of the intra-particle diffusion model for activated carbon fibers in an aqueous medium. *MRS Online Proceedings Library (OPL)*, 1373, imrc-1373.
- Senthilkumar, R., & Prasad, D. M. R. (2020). Sorption of heavy metals onto biochar. In IntechOpen eBooks. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.92346>
- Shane, A., Xu, X., Siame, J., Nguvulu, A., Tena, T. M., Lungu, M., Chinyanta, S., Kawala, J., Bowa, V. M., & Chirambo, B. (2021). Removal of copper from acid mine drainage (AMD) or acid rock drainage (ARD). *Journal of Water Resource and Protection*, 13(7), 435–446. <https://doi.org/10.4236/jwarp.2021.137026>
- Sihotang, M., Rinanti, A., & Fachrul, M. F. (2021). Heavy metal removal and acid mine drainage neutralization with bioremediation approach. In IOP Conference Series: Earth and Environmental Science (Vol. 894, p. 012041). IOP Publishing. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/894/1/012041>
- Simate, G. S., & Ndlovu, S. (2014). Acid mine drainage: Challenges and opportunities. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2(3), 1785–1803. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2014.07.021>
- Singh, S., Chaudhary, I. J., & Kumar, P. (2019). Utilization of low-cost agricultural waste for removal of toxic metals from environment: A review. *International Journal of Scientific Research in Biological Sciences*, 6(4), 56–61. <https://doi.org/10.26438/ijrsbs/v6i4.5661>
- Sud, D., Mahajan, G., & Kaur, M. (2008). Agricultural waste material as potential adsorbent for

- sequestering heavy metal ions from aqueous solutions – A review. *Bioresource Technology*, 99(14), 6017–6027. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2007.11.064>
- Sulaiman, N. S., Amini, M. H. M., Danish, M., Sulaiman, O., & Hashim, R. (2021). Kinetics, Thermodynamics, and Isotherms of Methylene Blue Adsorption Study onto Cassava Stem Activated Carbon. *Water*, 13(20), 2936. <https://doi.org/10.3390/w13202936>
- Tughyan, M. (2020). Impact of coal mining on environment and natural resources – Causes and potential effects. *International Journal of Mining Science*, 6(1), 1–6. <https://doi.org/10.20431/2454-9460.0601003>
- Wang, X., Li, X., Peng, L., Han, S., Hao, C., Jiang, C., Wang, H., & Fan, X. (2021). Effective removal of heavy metals from water using porous lignin-based adsorbents. *Chemosphere*, 279, 130504. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.130504>
- Wu, F., & Tseng, R. (2005). Preparation of highly porous carbon from fir wood by KOH etching and CO₂ gasification for adsorption of dyes and phenols from water. *Journal of Colloid and Interface Science*, 294(1), 21. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2005.06.084>
- Yulianti, R., Suliestyah, S., Tuheteru, E. J., Palit, C., & Yomaki, C. C. (2024). Studi Isotermal Adsorpsi Karbon Aktif Batubara Dengan Aktivasi Asam Pospat Terhadap Logam Fe Dan Mn Dalam Air Asam Tambang. *Jurnal Penelitian Dan Karya Ilmiah Lembaga Penelitian Universitas Trisakti*, 276-286.
- Yuliusman, Y., Nasruddin, N., Afdhol, M. K., Amiliana, R. A., Hanafi, A., & Rachmanda, B. (2017). Preparation of Activated Carbon from Palm Shells using KOH and ZnCl₂ as the Activating Agent. *IOP Conference Series Materials Science and Engineering*, 180, 12282. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/180/1/012282>
- Zhao, H., Ma, S., Zheng, S., Han, S., Yao, F., Wang, X., Wang, S., & Feng, K. (2018). β -cyclodextrin functionalized biochars as novel sorbents for high-performance of Pb²⁺ removal. *Journal of Hazardous Materials*, 362, 206–216. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2018.09.027>
- Zieliński, B., Miądlicki, P., & Przepiórski, J. (2022). Development of activated carbon for removal of pesticides from water: case study. *Scientific Reports*, 12(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-022-25247->