

Material Adsorben untuk Remediasi Air: Tinjauan Literatur Berdasarkan Variabel pH, Waktu Kontak, dan Konsentrasi

Rivaldo Bintang Sitorus^{1*} Sovian Aritonang²

^{1,2)} Program Studi Fisika, Universitas Pertahanan Republik Indonesia

*Email: rivaldobintangstorus@gmail.com

ABSTRACT

Heavy metal contamination in water sources has become a growing environmental concern due to industrial, mining, and domestic waste activities. Metals such as Pb, Cd, Cr, Cu, and Fe are toxic, non-biodegradable, and tend to accumulate in living organisms. One effective method for removing heavy metals from water is adsorption, a process where metal ions adhere to the surface of solid materials. This method is favored for its efficiency, low cost, and ability to utilize natural materials. This literature review examines fifteen recent studies (2020–2025) focusing on the performance of natural and modified adsorbents derived from agricultural biomass, fishery waste, and natural minerals. The analysis emphasizes the influence of pH, contact time, and metal concentration on adsorption capacity and efficiency. The findings show that optimum conditions generally occur at pH 4–6 with contact times of 30–120 minutes, and higher metal concentrations increase adsorption capacity until surface saturation. Chitosan- and activated carbon-based materials achieved efficiencies exceeding 90%. The study highlights the potential of natural adsorbents as sustainable and eco-friendly materials for water treatment.

Keywords: Adsorption, Heavy Metals, pH, Contact Time, Concentration, Water Remediation.

PENDAHULUAN

Pencemaran air oleh logam berat telah menjadi perhatian global karena dampaknya yang luas terhadap lingkungan dan kesehatan manusia. Logam berat seperti timbal (Pb), kadmium (Cd), kromium (Cr), tembaga (Cu), dan besi (Fe) banyak dijumpai pada air limbah industri, terutama dari sektor elektroplating, tekstil, baterai, serta pertambangan. Zat-zat ini memiliki sifat bioakumulatif dan toksik, sehingga meskipun berada dalam konsentrasi rendah, dapat mengganggu fungsi fisiologis organisme perairan dan manusia yang mengonsumsinya. Metode pengolahan limbah cair yang mengandung logam berat telah dikembangkan dengan berbagai pendekatan, di antaranya presipitasi kimia, pertukaran ion, filtrasi membran, dan elektrokoagulasi. Namun, sebagian besar metode tersebut memiliki kekurangan seperti biaya operasional tinggi, penggunaan bahan kimia berlebih, serta potensi terbentuknya lumpur residu berbahaya. Sebaliknya, adsorpsi menjadi alternatif yang lebih efisien karena memanfaatkan material alami yang melimpah, prosesnya sederhana, dan tidak menimbulkan produk samping berbahaya.

Material adsorben dapat berasal dari biomassa pertanian (ampas tebu, sekam padi, tongkol jagung), limbah perikanan (kitosan dari kulit udang), maupun mineral alam seperti zeolit dan silika. Keunggulan material ini terletak pada ketersediaannya yang tinggi, kemampuan permukaan yang besar, serta adanya gugus fungsi aktif seperti $-OH$, $-COOH$, dan $-NH_2$ yang berperan penting dalam penyerapan ion logam. Dalam beberapa penelitian, bahan alami juga dimodifikasi dengan aktivasi kimia atau penambahan oksida logam (misalnya ZnO atau Fe_3O_4) untuk meningkatkan luas permukaan dan kapasitas adsorpsi [14–16]. Kinerja proses adsorpsi dipengaruhi oleh sejumlah parameter penting, yaitu pH larutan, waktu kontak antara adsorben dan logam, serta konsentrasi ion logam awal. Nilai pH memengaruhi muatan permukaan adsorben, sedangkan waktu kontak menentukan laju reaksi hingga mencapai kesetimbangan. Konsentrasi ion logam awal berhubungan dengan ketersediaan situs aktif pada permukaan adsorben. Kombinasi optimum dari ketiga faktor ini menentukan efektivitas proses penghilangan logam berat dari air. Melalui telaah literatur dari lima belas penelitian, studi ini bertujuan untuk menggambarkan hubungan antara pH, waktu kontak, dan konsentrasi logam terhadap efisiensi adsorpsi berbagai jenis material alami. Diharapkan, hasil kajian ini dapat menjadi referensi bagi pengembangan teknologi pengolahan air berbasis material lokal yang efisien, berbiaya rendah, dan berkelanjutan.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan tinjauan literatur (*literature review*) terhadap lima belas jurnal ilmiah nasional dan internasional yang diterbitkan pada periode 2020 hingga 2025. Sumber literatur dipilih berdasarkan kesesuaian topik, yaitu penggunaan material adsorben alami dan hasil modifikasi untuk penurunan kadar logam berat di dalam air. Data yang dikaji mencakup lima parameter utama yaitu pH larutan, waktu kontak, konsentrasi ion logam, efisiensi penyerapan (%), dan kapasitas adsorpsi (mg/g). Setiap literatur yang ditelaah memuat informasi mengenai jenis material, jenis logam berat, serta kondisi optimum dari proses adsorpsi. Langkah pertama adalah mengumpulkan 15 artikel dari jurnal bereputasi yang membahas topik adsorpsi logam berat. Lalu menganalisis setiap data untuk mendapatkan pola hubungan antara pH, waktu kontak, dan konsentrasi logam dengan efisiensi adsorpsi. Setelah itu menyajikan hasil dalam bentuk tabel perbandingan dan grafik tren untuk menilai kesamaan hasil antarpeleliti serta melakukan analisis deskriptif dan interpretatif terhadap setiap temuan untuk menjelaskan mekanisme ilmiah yang terjadi. Pendekatan ini tidak hanya menggambarkan angka hasil eksperimen, tetapi juga menekankan pemahaman teoretis mengenai bagaimana kondisi operasi memengaruhi kinerja adsorben, sehingga dapat dijadikan dasar dalam perancangan material baru untuk pengolahan air.

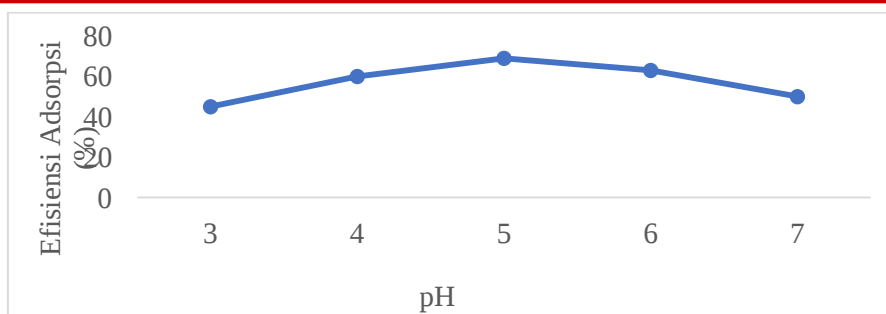
HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengaruh pH Terhadap Efisiensi Adsorpsi

Nilai pH berperan besar dalam menentukan efisiensi adsorpsi karena dapat mengubah muatan permukaan adsorben dan spesiasi ion logam dalam larutan. Pada kondisi pH rendah (asam), permukaan adsorben cenderung bermuatan positif akibat protonasi gugus fungsi seperti $-OH$ dan $-NH_2$. Hal ini menimbulkan gaya tolak-menolak dengan ion logam bermuatan positif, sehingga efisiensi penyerapan menurun. Sebaliknya, pada pH basa, gugus fungsi mengalami deprotonasi sehingga permukaan bermuatan negatif dan lebih mudah menarik ion logam bermuatan positif melalui gaya elektrostatik. Namun, peningkatan pH di atas titik optimum dapat menimbulkan presipitasi logam dalam bentuk hidroksida, yang bukan bagian dari proses adsorpsi murni. Oleh karena itu, pH optimum menjadi titik keseimbangan antara gaya tarik elektrostatik dan kestabilan ion logam dalam larutan.

Tabel 1. Rentang pH optimum berbagai jenis adsorben alami dan hasil modifikasi.

Jenis Adsorben	Logam Target	Rentang pH Optimum	Efisiensi (%)	Sumber
Kitosan limbah kulit udang	Cr^{6+}	4-5	93.2	[2]
Zeolit alam teraktivasi	Pb^{2+}	5-6	89.7	[9]
Abu sekam padi (silika)	Cd^{2+}	6	91.5	[4]
Gulma siam (arang aktif)	Pb^{2+}	5	69.0	[1]



Gambar 1. Hubungan antara variasi pH dan efisiensi adsorpsi logam Pb pada berbagai material adsorben.

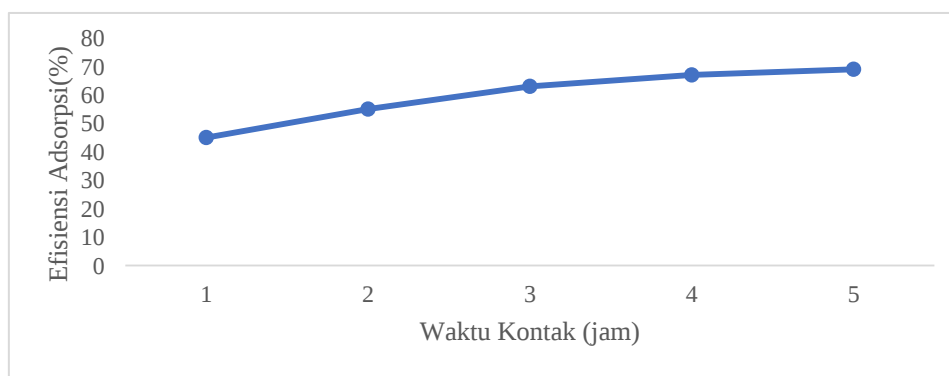
Dari Tabel 1 dan Gambar 1 dapat dilihat bahwa efisiensi adsorpsi meningkat signifikan seiring kenaikan pH hingga sekitar 5 hingga 6. Kitosan menunjukkan kinerja terbaik pada kondisi asam lemah karena memiliki gugus amino yang mampu mengikat ion logam secara koordinatif. Silika dari abu sekam padi dan zeolit teraktivasi juga efektif karena memiliki situs hidroksil aktif. Sementara itu, pada pH lebih dari 7, sebagian besar penelitian melaporkan terjadinya penurunan efisiensi akibat presipitasi ion logam menjadi hidroksida ($\text{Pb}(\text{OH})_2$, $\text{Cr}(\text{OH})_3$).

Pengaruh Waktu Kontak Terhadap Kinetika Adsorpsi

Waktu kontak merupakan faktor penting dalam menentukan berapa lama interaksi antara adsorben dan ion logam berlangsung sebelum mencapai keadaan setimbang. Pada fase awal 0 sampai 30 menit, laju adsorpsi relatif cepat karena banyak situs aktif yang masih kosong di permukaan adsorben. Setelah itu, laju adsorpsi melambat karena permukaan mulai jenuh dan ion logam harus berdifusi ke pori-pori bagian dalam material.

Tabel 2. Waktu kontak optimum dari beberapa penelitian terdahulu.

Jenis Adsorben	Logam Target	Waktu Kontak (menit)	Efisiensi (%)	Sumber
Kitosan-ZnO	Pb^{2+}	60	95,1	[13]
Ampas tebu	Cd^{2+}	90	88,7	[11][7]
Tongkol jagung	Cu^{2+}	120	90,2	[14]
Biomassa organik	Cr^{6+}	45	85,3	[9-10]



Gambar 2. Hubungan waktu kontak terhadap efisiensi penyerapan logam Pb dari gulma siam (*Chromolaena odorata* L.)

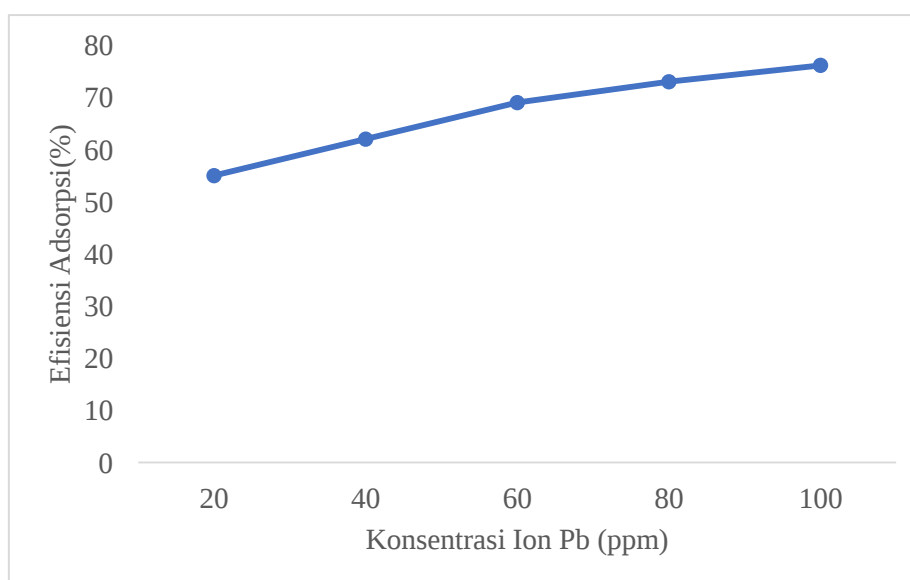
Dari tabel 2 dan gambar 2 di atas, sebagian besar material mencapai kesetimbangan pada waktu kontak 60 hingga 120 menit. Kitosan–ZnO menunjukkan waktu reaksi paling cepat karena struktur porinya besar dan interaksi antara gugus amino dengan ion logam berlangsung kuat. Sementara itu, biomassa padat seperti ampas tebu dan tongkol jagung memerlukan waktu lebih lama karena proses difusi ion logam ke pori-pori internal lebih lambat. Pada umumnya, data eksperimen dapat dimodelkan dengan kinetika orde dua semu (pseudo second-order), yang menunjukkan bahwa proses adsorpsi dikendalikan oleh gaya kimia melalui pertukaran elektron antara gugus aktif adsorben dan ion logam.

Pengaruh Konsentrasi Ion Logam Terhadap Kapasitas Adsorpsi

Konsentrasi awal ion logam dalam larutan berpengaruh langsung terhadap kapasitas penyerapan material adsorben. Pada konsentrasi rendah 1 sampai 5 ppm, sebagian besar situs aktif masih tersedia sehingga efisiensi tinggi, tetapi kapasitas total (mg/g) rendah. Ketika konsentrasi meningkat, jumlah ion logam yang menempel pada permukaan meningkat hingga titik jenuh, di mana semua situs aktif telah terisi.

Tabel 3. Kapasitas adsorpsi maksimum beberapa jenis material adsorben terhadap logam berat.

Jenis Adsorben	Logam Target	Konsentrasi Awal (ppm)	Kapasitas (mg/g)	Sumber
Abu sekam padi (silika)	Cd^{2+}	10	19.16	[4-5]
Gulma siam (karbon aktif)	Pb^{2+}	8	11.32	[1][6]
Zeolit alam teraktivasi	Pb^{2+}	6	9.85	[13] [15]
Kitosan dari kulit udang	Cr^{6+}	10	15.67	[2][8]



Gambar 3. Konsentrasi ion logam terhadap efisiensi penyerapan ion Pb pada berbagai jenis adsorben.

Kapasitas adsorpsi meningkat seiring peningkatan konsentrasi ion logam karena lebih banyak partikel logam yang tersedia untuk berinteraksi dengan situs aktif. Namun, pada titik tertentu, efisiensi menurun karena jumlah ion logam melebihi kapasitas maksimum permukaan adsorben.

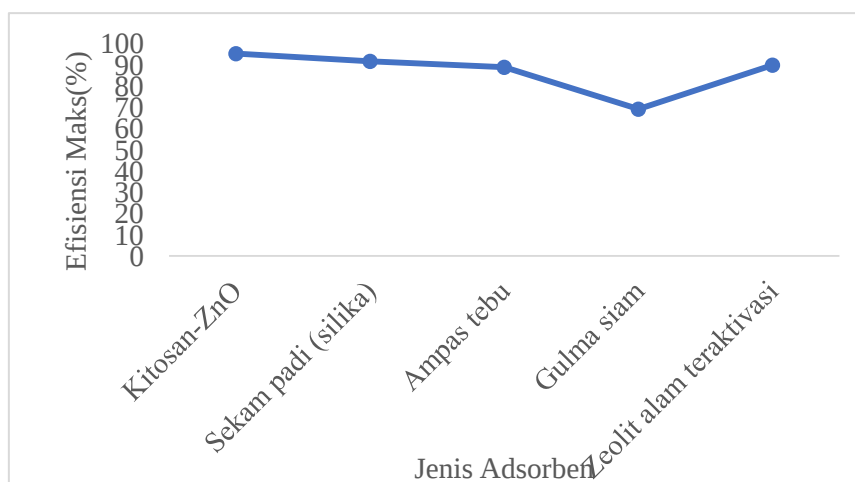
Fenomena ini menunjukkan adanya batas kejenuhan yang tergantung pada struktur pori, ukuran partikel, dan jenis gugus fungsional material.

Perbandingan Beberapa Jenis Adsorben

Untuk memberikan gambaran umum efektivitas material adsorben, beberapa penelitian dibandingkan berdasarkan parameter utama pH, waktu kontak, dan konsentrasi.

Tabel 4. Rekapitulasi kondisi optimum dan efisiensi berbagai material adsorben alami.

Jenis Adsorben	Logam Target	pH Optimum	Waktu Kontak (menit)	Efisiensi Maks (%)	Sumber
Kitosan	Pb ²⁺	4-5	60	95,1	[2]
Sekam padi (silika)	Cd ²⁺	6	90	91,5	[3-4]
Ampas tebu	Cu ²⁺	5	120	88,7	[11]
Gulma siam	Pb ²⁺	5	60	69	[1]
Zeolit alam	Pb ²⁺	6	60	89,7	[15]



Gambar 4. Perbandingan efisiensi penyerapan beberapa material adsorben alami terhadap ion logam berat.

Dari hasil komparasi tersebut, terlihat bahwa kitosan memiliki performa paling tinggi karena mengandung gugus amino yang mampu berikatan kuat dengan ion logam melalui mekanisme koordinasi. Zeolit alam dan silika juga menunjukkan performa tinggi berkat struktur porinya yang luas. Sementara biomassa seperti ampas tebu atau gulma siam memiliki efisiensi lebih rendah, namun tetap potensial karena biaya produksi yang murah dan ketersediaannya melimpah.

Analisis Umum dan Implikasi

Secara umum, semua penelitian menunjukkan bahwa adsorpsi menggunakan material alami dan limbah biomassa merupakan solusi efektif dan berkelanjutan untuk remediasi air. Keunggulan utama terletak pada ketersediaan bahan baku, biaya rendah, serta sifat ramah lingkungan. Selain itu, proses adsorpsi tidak menghasilkan residu berbahaya seperti lumpur logam dari metode kimia konvensional.

Tabel 5. Perbandingan kelebihan dan keterbatasan berbagai jenis adsorben.

Jenis Adsorben	Kelebihan	Keterbatasan
Kitosan	Efisiensi tinggi, mudah dimodifikasi	Mahal untuk skala besar
Zeolit alam	Stabil, tersedia melimpah	Kapasitas moderat
Sekam padi (silika)	Ramah lingkungan, berpori besar	Perlu aktivasi kimia
Biomassa organik	Murah, mudah diperoleh	Daya tahan rendah, perlu regenerasi

Hasil kajian ini menegaskan bahwa material berbasis biomassa seperti kitosan, sekam padi, dan ampas tebu berpotensi besar untuk diaplikasikan pada sistem pengolahan air bersih di daerah pedesaan dan industri kecil.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil kajian terhadap lima belas penelitian terbaru mengenai adsorpsi logam berat menggunakan material alami dan termodifikasi, dapat disimpulkan bahwa metode adsorpsi merupakan pendekatan yang efektif, sederhana, serta ramah lingkungan untuk remediasi air tercemar logam berat. Kinerja adsorpsi sangat dipengaruhi oleh tiga faktor utama, yaitu pH larutan, waktu kontak, dan konsentrasi ion logam. Proses paling efisien terjadi pada pH 4 hingga 6, dengan waktu kontak antara 30 hingga 120 menit, dan kapasitas adsorpsi meningkat seiring peningkatan konsentrasi logam hingga batas kejenuhan permukaan adsorben tercapai. Material berbasis kitosan dan biomassa karbon aktif menunjukkan efisiensi penyerapan lebih dari 90%, sedangkan zeolit teraktivasi dan abu sekam padi (silika) juga memberikan hasil yang baik dengan efisiensi 85 hingga 91%. Temuan ini menunjukkan bahwa pemanfaatan limbah alam seperti sekam padi, kulit udang, dan ampas tebu tidak hanya membantu mengurangi pencemaran lingkungan, tetapi juga memberikan nilai tambah sebagai material fungsional untuk pengolahan air bersih. Secara keseluruhan, adsorpsi menggunakan material alami berpotensi besar dikembangkan menjadi teknologi pengolahan air yang efisien dan berkelanjutan, terutama pada wilayah yang memiliki keterbatasan sumber daya dan teknologi tinggi.

SARAN

Berdasarkan hasil kajian yang telah dilakukan, penelitian selanjutnya disarankan untuk difokuskan pada beberapa aspek penting guna meningkatkan kinerja material adsorben dalam remediasi air. Pertama, perlu dilakukan optimasi parameter proses seperti suhu, ukuran partikel, dan kecepatan pengadukan untuk memperoleh kapasitas adsorpsi yang maksimal. Selain itu, modifikasi kimia atau fisis terhadap material alami menggunakan logam oksida seperti ZnO, TiO₂, dan Fe₃O₄ juga perlu dikembangkan, karena dapat memperbesar luas permukaan aktif serta memperkuat ikatan antara ion logam dan situs aktif adsorben. Selanjutnya, penelitian mengenai regenerasi adsorben perlu dilakukan agar material dapat digunakan kembali tanpa mengalami penurunan efisiensi yang signifikan, sehingga lebih ekonomis dan berkelanjutan. Terakhir, uji coba pada skala lapangan, khususnya pada sistem pengolahan air limbah industri, sangat penting untuk mengevaluasi performa dan stabilitas adsorben dalam kondisi nyata, sehingga hasil penelitian dapat diterapkan secara praktis di dunia industri dan lingkungan. Selain itu, kerja sama antara lembaga penelitian dan industri sangat diperlukan agar hasil penelitian dapat diimplementasikan dalam sistem pengolahan air yang terintegrasi, efisien, dan ramah lingkungan.

DAFTAR PUSTAKA

- [1]. L. N. D. Suryani and R. A. Suryani, "Pemanfaatan Gulma Siam (*Chromolaena odorata* L.) Sebagai Adsorben Logam Timbal (Pb)," *Jurnal Kimia dan Pendidikan Kimia*, vol. 5, no. 2, pp. 101–108, 2020.
- [2]. I. Amin and N. I. Amin, "Pengaruh Kitosan Limbah Kulit Udang Sebagai Adsorben Dalam Menurunkan Kadar Chrom Heksavalen (Cr⁶⁺)," *Prosiding Seminar Nasional Teknologi Industri (SNTI) VIII*, pp. 400–402, 2021.

- [3]. E. Handayani and S. R. Handayani, "Pemanfaatan Tempurung Kluwak Sebagai Adsorben Dalam Menurunkan Kadar Logam Berat Tembaga (Cu)," *Jurnal Sains dan Teknologi Lingkungan*, vol. 7, no. 1, pp. 23–30, 2020.
- [4]. S. A. Lestari and P. B. Hastuti, "Pemanfaatan Abu Sekam Padi Sebagai Sumber Silika Untuk Pembuatan Adsorben Ion Logam Cd (II) Melalui Teknik Imprinted Ionic," *ALCHEMY: Jurnal Penelitian Kimia*, vol. 17, no. 1, pp. 113–123, 2021.
- [5]. N. I. F. D. Ischak and B. D. N. Ischak, "Ekstraksi dan Karakterisasi Selulosa dari Limbah Kulit Kacang Tanah (*Arachys hypogaea* L.) Sebagai Adsorben Ion Logam Besi," *Jambura Journal of Chemistry*, vol. 3, no. 1, pp. 27–36, 2021.
- [6]. A. Rahayu and N. Kusmiati, "Pemanfaatan Kitosan dari Cangkang Udang Sebagai Adsorben Logam Berat Pb Pada Limbah Praktikum Kimia Farmasi," *Indonesian Journal of Laboratory*, vol. 2, no. 1, pp. 12–18, 2020.
- [7]. A. N. Siregar and P. A. Mahreni, "Review: Biomassa Sebagai Adsorben Untuk Pengolahan Logam Berat Pada Air Limbah Industri," *Jurnal Ilmu Kimia Terapan Indonesia*, vol. 8, no. 1, pp. 44–54, 2023.
- [8]. N. S. Aulia and S. H. Mardiana, "Sintesis Komposit Berbasis Styrofoam dan Kulit Kayu Galam Sebagai Adsorben Besi Pada Limbah Cair Pertambangan Intan," *Jurnal Material dan Teknologi*, vol. 9, no. 1, pp. 22–29, 2025.
- [9]. Y. A. Bunga and K. E. B. S. Neolaka, "Analisis Bibliometrik Adsorpsi Pb (II) Menggunakan Adsorben Berbasis Zeolit Alam," *Jurnal β Kimia*, vol. 4, no. 1, pp. 68–76, 2024.
- [10]. L. Rahmawati and S. D. Rahmawati, "Efektivitas Sampah Organik Sebagai Adsorben Logam Kromium (Cr) Dalam Limbah Cair Industri Tekstil: Sistematika Reviu," *Jurnal Teknologi dan Rekayasa Lingkungan*, vol. 8, no. 2, pp. 77–86, 2024.
- [11]. A. Riani and L. R. Riani, "Potensi Ampas Tebu Sebagai Adsorben Logam Berat Cd, Cu, dan Cr," *Jurnal Teknologi Lingkungan*, vol. 21, no. 2, pp. 45–52, 2020.
- [12]. J. Wa Ndibale, "Efektivitas Penyaringan Air Berbasis Kulit Durian Kering Sebagai Media Filtrasi Kadar Logam Berat Kadmium dan Timbal," *Journal of Green Environmental Learning (JGEL)*, vol. 4, no. 1, pp. 56–63, 2022.
- [13]. A. Wulandari and K. Wulandari, "Pengaruh Penambahan ZnO pada Kitosan Bead Sebagai Adsorben Pencemar Ion Logam Pb (II)," *Greensphere Journal of Environmental Chemistry*, vol. 3, no. 1, pp. 9–15, 2023.
- [14]. D. Yuliana and H. A. Yuliana, "Pemanfaatan Tongkol Jagung Sebagai Adsorben Limbah Logam Berat," *Jurnal Rekayasa Proses*, vol. 13, no. 2, pp. 65–72, 2021.
- [15]. D. Yulianti and F. N. Yulianti, "Efektivitas Biomassa Sebagai Adsorben Ramah Lingkungan Untuk Penyerapan Logam Berat Pada Limbah Cair," *Jurnal Kimia dan Teknologi Lingkungan*, vol. 6, no. 2, pp. 91–98, 2024.
- [16]. M. N. Yahaya et al., "Analysis of Temperature and Relative Humidity Distributions in a Dental Treatment Room at a Government Health Clinic in Malaysia," *J. Adv. Res. Fluid Mech. Therm. Sci.*, vol. 127, no. 1, pp. 1–19, 2025.