Dalton : J. Pend. Kim. dan Ilmu. Kim. (e-ISSN 2621-3060) Vol. 8, No. 2, 2025
DOI: http://dx.doi.org/10.31602/dl.v8i2.20080

Dalton : Jurnal Pendidikan Kimia dan Ilmu Kimia

ORIGINAL ARTICLE

KAJIAN LITERATUR: POTENSI LIMBAH BAHAN ALAM SEBAGAI ADSORBEN LOGAM

Ilda Yangti[1] · Miftahul Jannah[1] · Siti Fatimah[1] · Sara Wati Lesnussa[1] · Iin Indriani*[1] · Syahdam Karneng[1] · Ayu Safitri Agustina[1] · Herdie Idriawien Gusti[1] · Andi Nur Fitriani Abubakar[1]

Received: 18 Juli 2025 | Revised: 01 Agustus 2025 | Accepted: 08 Agustus 2025 | Published: 25 Agustus 2025
UPT Publikasi dan Pengelolaan Jurnal Uniska-Daltonjurnal 2025

Abstrak Pencemaran air oleh logam berat dari limbah cair industri merupakan tantangan lingkungan yang serius. Salah satu metode yang efektif dan ekonomis dalam mengatasi pencemaran ini adalah adsorpsi menggunakan bahan alami. Limbah bahan alam seperti biomassa dan material organik lainnya telah menjadi perhatian sebagai alternatif adsorben logam yang ramah lingkungan dan biaya rendah. Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji pemanfaatan berbagai limbah organik seperti sekam padi, cangkang telur, ampas teh, ampas kulit kayu, tempurung kelapa, dan cangkang udang sebagai bahan adsorben. Kajian dilakukan melalui metode studi pustaka terhadap artikel ilmiah yang relevan. Setiap bahan dianalisis berdasarkan komponen aktifnya seperti lignin, selulosa, karbon aktif, dan kitosan, serta kapasitasnya dalam menyerap logam berat seperti Pb^{2+}, Cd^{2+}, Cr^{6+}, dan Zn^{2+}. Hasil menunjukkan bahwa bahan-bahan tersebut memiliki potensi besar sebagai adsorben ramah lingkungan dengan efisiensi tinggi, terutama setelah dilakukan proses aktivasi. Kajian ini memberikan landasan ilmiah bagi pengembangan teknologi pengolahan limbah cair berbasis biomassa lokal yang berkelanjutan.

Katakunci Limbah· Biomassa· Adsorpsi· Logam Berat.

This is an open access article under the CC-BY 4.0 License. Copyright © 2025 by authors.

✉ Iin Indriani
Iinindriani722@gmail.com

[1]Program Studi Kimia, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Muhammadiyah Bulukumba, Indonesia

Abstract The issue of water pollution caused by heavy metals from industrial effluents constitutes a significant environmental concern. A viable and cost-effective approach to address this issue is the use of adsorption techniques involving natural materials. There has been growing interest in utilizing organic waste materials, such as biomass, as alternative, environmentally sustainable, and cost-efficient metal adsorbents. This research seeks to investigate the efficacy of various organic waste products—including rice husks, eggshells, tea dregs, bark residues, coconut shells, and shrimp shells—as potential adsorbent materials. The investigation was carried out through a comprehensive literature review of pertinent scientific studies. Each selected material was evaluated in terms of its active constituents, including lignin, cellulose, activated carbon, and chitosan, as well as its effectiveness in adsorbing heavy metals such as Pb^{2+}, Cd^{2+}, Cr^{6+}, and Zn^{2+}. The findings indicate that these materials possess substantial promise as eco-friendly adsorbents, particularly following activation. This study offers a scientific foundation for advancing sustainable wastewater treatment technologies based on local biomass resources.

Keywords Waste· Biomass· Adsorption· Heavy Metals.

PENDAHULUAN

Pencemaran air oleh limbah industri dan domestik merupakan masalah serius yang mengancam lingkungan dan kesehatan manusia (Rahmi & Sajidah, 2018). (Hafizhulloh, 2024) mengatakan bahwa meskipun logam berat menjadi fokus utama pengolahan limbah

industri, warna limbah yang pekat berasal dari pewarna sintetis yang tetap tersisa bahkan setelah proses pelarutan atau fiksasi pada bahan tekstil selesai dilakukan. Limbah berwarna ini tidak hanya merusak estetika lingkungan air tetapi juga mengandung senyawa kompleks yang bersifat mutagenik dan karsinogenik dalam jangka panjang.

Salah satu komponen utama pencemar adalah logam berat seperti timbal (Pb) (Gani et al., 2023), kromium (Cr) (Nada & Qonita, 2024), kadmium (Cd) (Sari & Din, 2018), dan mangan (Mn) (Hafizhulloh, 2024) yang bersifat toksik dan tidak dapat terurai secara alami.Teknologi pengolahan limbah seperti presipitasi kimia, filtrasi membran, dan pertukaran ion memang tersedia, tetapi umumnya mahal dan memerlukan peralatan canggih. Oleh karena itu, adsorpsi menjadi alternatif yang populer karena lebih sederhana, efisien, dan ekonomis (Wardaliah, 2016). Salah satu pendekatan yang berkembang adalah penggunaan limbah organik sebagai bahan dasar adsorben. Limbah organik seperti sekam padi, tempurung kelapa, cangkang telur, ampas teh, dan kulit kayu mengandung senyawa aktif seperti lignin, selulosa, dan karbon yang berperan penting dalam proses adsorpsi (Arsyakia et al., 2024).

Tujuan dari studi ini adalah untuk mengumpulkan dan menganalisis berbagai penelitian yang membahas penggunaan bahan limbah organik sebagai adsorben dalam proses pengolahan limbah cair. Fokus pada konsentrasi sifat fisikokimia bahan seperti kulit kayu, sekam padi, tempurung kelapa, cangkang telur, ampas teh, dan kulit kayu, serta kemampuannya untuk mengadsorpsi berbagai jenis kontaminan. Diharapkan ulasan ini akan memberikan pemahaman yang lebih baik tentang solusi limbah yang kreatif dan hemat biaya untuk pengelolaan limbah lingkungan.

METODE PENELITIAN

Pendekatan yang digunakan dalam penelitian ini adalah kualitatif deskriptif. Tinjauan literatur ini dilakukan dengan mengumpulkan data dari berbagai jurnal nasional yang diindeks Sinta dan Scopus. Data yang dikumpulkan mencakup hasil studi laboratorium yang memeriksa bahan sebagai adsorben dalam penyerapan limbah. Penelitian yang dianalisis dipilih berdasarkan relevansi dan validitas ilmiah.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Adsorpsi adalah proses di mana zat (adsorbat) melekat pada permukaan padat atau cair (adsorben) melalui interaksi fisik (seperti gaya van der Waals) dan/atau kimia (seperti ikatan ionik atau kovalen), tanpa menembus ke dalam struktur adsorben (Effendi, 2021). Proses ini sangat berguna untuk menghilangkan kontaminan seperti logam berat, zat warna, dan senyawa organik dari air limbah karena adsorben dengan luas permukaan besar, struktur berpori, dan gugus fungsional (misalnya –OH, –COOH, Si–OH) dapat mengikat polutan secara efektif. Berbagai bahan alami yang dikembangkan untuk mengadsorpsi logam berat yang ada dilingkungan antara lain:

1. Sekam padi

Sekam padi merupakan salah satu limbah pertanian yang paling banyak dihasilkan di Indonesia. Sekam padi memiliki potensi besar sebagai bahan adsorben ramah lingkungan. Hal ini dikarenakan kandungan selulosa, hemiselulosa dan liginin yang tinggi. Kandungan senyawa aktif ini memungkinkan bagi sekam padi untuk berinteraksi dengan berbagai jenis kontaminan. Abu sekam padi mengandung silika amorf hingga >90 %, ditambah karbon tersisa, yang memberikan luas permukaan dan porositas tinggi setelah aktivasi termal maupun kimia(Sufra et al., 2023). Gugus silanol dan gugus fungsional organik pada silika dan arang

aktif sekam padi memfasilitasi ikatan ion logam dan molekul organik melalui mekanisme pertukaran ion, ikatan hidrogen, serta interaksi elektrostatik (Terra et al., 2024). Nilai persentase Penggunaan sekam padi sebagai adsorben dalam mengadsorpsi berbagai bahan limbah ditampilkan secara ringkas dalam Tabel I.1.

Tabel I.1 Penggunaan sekam padi sebagai adsorben dalam mengadsirpsi berbagai bahan limbah

No	Adsorbat	Kapasitas Adsorpsi (mg/g)	Referensi
1.	Fe^{3+}	138,57	(Rahma et al., 2023)
2.	Pb^{2+}	4,4058	(sarah et al., 2023)
3.	Cr^{3+}	0,9674	(Harimu, 2022)
4.	Pb^{2+}	36,94	(Priska, 2023)
5.	Pb^{2+}	85,4	(Zainal Abidin et al., 2023)
6.	Fe^{2+}	7,22	(Nguyen et al., 2023)
7.	Pb	82,6	(Nnaji et al., 2022)
8.	Pb^{2+}	0,1377	(Halim et al., 2021)

2. Cangkang telur

Dalam upaya pencarian adsorben alami yang ramah lingkungan dan ekonomis, limbah biomaterial seperti cangkang telur mulai mendapatkan perhatian luas dalam berbagai studi adsorpsi. Salah satu alasan utamanya adalah ketersediaannya yang melimpah sebagai limbah rumah tangga maupun industri makanan, serta potensi kimia dan fisiknya yang mendukung proses pemurnian air (Sics et al., 2024). Cangkang telur sangat menjanjikan sebagai bahan adsorben alami karena kandungan utamanya adalah kalsium karbonat ($CaCO_3$) 94 %**,** dengan sisanya berupa karbonat magnesium (1 %), fosfat kalsium (1 %), dan materi organik (3–4 %) (Alamillo-López et al., 2020). Struktur kristalin $CaCO_3$ terutama dalam bentuk kalsit memberikan sifat basa dan pori-pori mikro yang mendukung adsorpsi senyawa berbahaya melalui mekanisme pertukaran ion dan interaksi elektrostatik**.** Tabel I.2 secara ringkas menampilkan persentase penggunaan berbagai bentuk cangkang telur sebagai adsorben dalam mengadsorpsi berbagai kontaminan air.

Tabel I.2 Perbandingan Kapasitas Adsorpsi Berbagai Adsorben dari Limbah Cangkang telur Terhadap Kontaminan Air

No	Ion Logam	Kapasitas Adsorpsi (mg/g)	Referensi (Jurnal)
1.	Cd^{2+}	18,5 mg/g	(Maharani et al., 2018)
2.	Cr & Cd	70 %	(Tizo et al., 2023)
3.	As^{5+}, Pb^{2+}, Hg^{2+}	As:17.7; Pb:27.8; Hg:15.9	(Alamillo-López et al., 2020)
4.	Pb^{2+}	46,4	(Nu'man, 2023)
5.	Pb^{2+}	97,74	(D. Liu et al., 2022)
6.	Cu^{2+}	67 000	(Karunia, 2025)
7.	Hg^{2+}	40,8	(Marković et al., 2023)
8.	Cr^{6+}	285,7	(Faiz et al., 2021)

3. Ampas Teh

Ampas teh memiliki kemampuan adsorpsi yang baik karena struktur porosnya dan kandungan senyawa aktif. Ini menjadikannya sebagai bahan yang efektif untuk menghilangkan kontaminan dari air, seperti logam berat dan senyawa organik (Akinpalu & Ojo, 2020). ampas teh dapat digunakan dalam proses pengolahan limbah cair. Senyawa yang terkandung dalam ampas teh dapat berinteraksi dengan polutan, sehingga membantu dalam

proses pemurnian (Kumar & Singh, 2021). Ampas teh juga dapat dimanfaatkan sebagai bahan kompos. Kandungan karbon dan nutrisi lainnya dalam ampas teh dapat meningkatkan kualitas tanah dan mendukung pertumbuhan tanaman (Y. Zhang & Wang, 2021) ., (Rahman & Hossain, 2022). Tabel I.2 secara ringkas menampilkan persentase kemampuan berbagai Ampas Teh dalam logam berat.

Tabel I.3 Kemampuan Ampas Teh Menyerap Logam Berat

No	Adsorbat	Kapasitas Adsorpsi (mg/g)	Referensi
1	Zn^{2+}, Pb^{2+}	1,457, 1,197	(Akinpalu & Ojo, 2020)
2	Ni^{2+}, Cd^{2+}	2,468, 1,163	(Kumar & Singh, 2021)
3	Pb^{2+}, Zn^{2+}	120,8, 79,8	(Shrestha & Dalal, 2018)
4	Cd^{2+}	13,77	(Pyrzynska, 2018)
5	Pb^{2+}	1,197	(Çelebi et al., 202 C.E.)
6	Cd^{2+}	75	(Zhou, 2022)
7	Pb^{2+}	18,8	(Y. Liu, 2022)
8.	Pb^{2+}	38,5	(Ogunlaja, 2022)
9	Cr^{3+}	95,1	(Ma, 2024)
10.	Co^{2+}	42,1	(W. Zhang, 2021)

4. Ampas Kulit Kayu

Ampas kulit kayu merupakan limbah yang dihasilkan dari proses pengolahan kayu. Limbah ini sering kali dibuang tanpa pemanfaatan lebih lanjut, padahal memiliki potensi yang besar sebagai bahan baku untuk berbagai aplikasi (Smith, 2019). Ampas kulit kayu mengandung senyawa aktif seperti lignin, selulosa, dan hemiselulosa. Lignin memberikan kekuatan dan ketahanan terhadap degradasi, sedangkan selulosa dan hemiselulosa berperan dalam struktur dan fungsi biologis (Lee & Kim, 2019).

Senyawa-senyawa yang terkandung dalam ampas kulit kayu dapat digunakan dalam proses adsorpsi untuk menghilangkan kontaminan dari air atau udara. Lignin dan selulosa memiliki kemampuan untuk mengikat ion logam berat dan senyawa organik, sehingga dapat dimanfaatkan dalam teknologi pengolahan limbah (Martinez, 2021). Selain untuk adsorpsi, ampas kulit kayu juga dapat digunakan sebagai pupuk organik. Kandungan karbon yang tinggi dapat meningkatkan kesuburan tanah dan mendukung pertumbuhan tanaman (Patel & Singh, 2021). Nilai persentase Penggunaan Ampas Kulit Kayu sebagai adsorben dalam mengadsorpsi berbagai bahan limbah ditampilkan secara ringkas dalam Tabel I.4.

Tabel I.4 Penggunaan Ampas Kulit Kayu sebagai adsorben dalam mengadsorpsi berbagai bahan limbah

No	Adsorbat	Kapasitas Adsorpsi (mg/g)	Referensi
1	Pb^{2+}	112,0	(W. Zhang, 2021)
2	Cd^{2+}	85,0	(W. Zhang, 2021)
3	Pb^{2+}	155,1	(Zhou, 2022)
4	Mn^{2+}	52,2	(W. Zhang, 2021)
5	Cd^{2+}	472,1	(Lancang, 2024)
6	Pb^{2+}	105,0	(Smith, 2019)
7	Cd^{2+}	78,5	(Lee & Kim, 2019)
8.	Pb^{2+}	130,3	(Martinez, 2021)
9	Ni^{2+}	55,8	(Patel & Singh, 2021)
10.	Cd^{2+}	82,9	(Raji et al., 2023)

11.	Pb^{2+}	242,7	(Maliki,M; Asman, 2023)

5. Tempurung Kelapa

Tempurung kelapa merupakan salah satu limbah biomassa yang berlimpah, khususnya di negara tropis seperti Indonesia. Tempurung kelapa tidak hanya berpotensi sebagai solusi limbah biomassa, tetapi juga sebagai alternatif adsorben murah, ramah lingkungan, dan berkelanjutan untuk pengolahan limbah cair. Pemanfaatan material limbah seperti tempurung kelapa dapat memberikan nilai tambah dan berkontribusi dalam pendekatan circular ekonomi serta pengurangan pencemaran lingkungan (Dada et al., 2016). Tempurung kelapa memiliki kandungan karbon yang tinggi yakni sekitar 75–85% (R. Wulandari et al., 2022), serta struktur mikropori yang mendukungnya untuk digunakan sebagai bahan dasar karbon aktif (Bakti et al., 2022). Setelah proses aktivasi, luas permukaan karbon aktif dari tempurung kelapa dapat

meningkat hingga lebih dari 500 m^2/g, yang sangat optimal untuk proses adsorpsi zat pencemar, (Yusop et al., 2022).

Tabel I.5 Kapasitas Adsorpsi Karbon Aktif Tempurung Kelapa terhadap Ion Logam Berat

No.	Adsorbat	Kapasitas Adsorpsi (mg/g)	Referensi
1.	Fe^{2+}	1,82	(Miranda, 2024)
2.	Mn^{2+}	0,895	(Miranda, 2024a)
3.	Fe (III)	28,9	(Elewa et al., 2023)
4.	AS^{3+}	28,7	(Nasir et al., 2020)
5.	Cu (II)	74,6	(Adil & Anary, 2013)
6.	Ni (II)	19,6	(Yusop et al., 2022)
7.	Zn (II)	7,87	(Mamuya et al., 2020)
8	Cr^{6+}	43,2	(Zainuddin et al., 2023)

6. Cangkang Udang

Cangkang udang merupakan limbah biomassa laut yang berlimpah dan mengandung kitin serta turunannya, kitosan, yang memiliki kemampuan tinggi dalam mengikat ion logam berat karena keberadaan gugus aktif seperti amina dan hidroksil (Shahidi & Synowiecki, 2021). Kitin dalam cangkang udang dapat diubah menjadi kitosan melalui proses destilasi, sehingga menghasilkan senyawa dengan gugus $–NH_2$ yang sangat reaktif terhadap logam-logam seperti Pb^{2+}, Cd^{2+}, Zn^{2+}, dan Cr (VI) melalui ikatan elektrostatik atau kompleksasi (Sics et al., 2024)

Tabel I.6 Kapasitas Adsorpsi Logam Berat oleh Cangkang Udang

No.	Adsorbat	Kapasitas Adsorpsi (mg/g)	Referensi
1.	Pb^{2+}	71,6	(Mamuya et al., 2020)
2.	Cr (VI)	52,3	(Elwakeel et al., 2021)
3.	Cu^{2+}	48,2	(F. T. Wulandari & Lestari, 2023)
4.	Cu^{2+}	53,4	(Dada et al., 2016)
5.	Zn^{2+}	42,7	(Rahim et al., 2024)
6.	Ni^{2+}	16,8	(Al-Ghouti & Al-Absi, 2016)
7.	Pb^{2+}	32,1	(Oladele et al., 2020)
8.	Cd^{2+}	25,3	(Adeyemo et al., 2017)

9	Cr (VI)	49,2	(Ahalya et al., 2013)

KESIMPULAN

Beberapa studi menunjukkan efektivitas limbah organik dalam menyerap logam berat. Karbon aktif dari limbah bahan alam seperti sekam padi, cangkang telur, ampas teh, ampas kulit kayu, tempurung kelapa dan cangkang udang dapat menjadi pilihan yang efektif dan ramah lingkungan untuk pengolahan limbah dan pengendalian polusi.

DAFTAR PUSTAKA

Adeyemo, A. A., Adeoye, I. O., & Bello, O. S. (2017). Adsorption of heavy metals from aqueous solution using eggshell as a low-cost adsorbent: Equilibrium modeling. *Journal of Water Reuse and Desalination*, *7*(1), 20–30. https://doi.org/10.2166/wrd.2016.035

Adil, M. A., & Anary, A. (2013). Removal of copper ions from aqueous solution using chemically activated coconut shell carbon. *International Journal of Environmental Science and Development*, *4*(5), 505–509. https://doi.org/10.7763/IJESD.2013.V4.392

Ahalya, N., Ramachandra, T. V, & Kanamadi, R. D. (2013). Biosorption of Chromium (VI) from aqueous solutions by eggshells: A comparative study. *International Journal of Environmental Sciences*, *4*(1), 5–13.

Akinpalu, S. O., & Ojo, J. A. (2020). Utilization of tea waste for the removal of heavy metals from wastewater: A review. *Environmental Science and Pollution Research*, *27*(12), 14567–14580.

Al-Ghouti, M. A., & Al-Absi, R. S. (2016). Crushed eggshells as natural sorbent for the removal of nickel from wastewater: equilibrium, kinetic, and thermodynamic studies. *Desalination and Water Treatment*, *57*(19).

Alamillo-López, V. M., Sánchez-Mendieta, V., Olea-Mejía, O. F., González-Pedroza, M. G., & Morales-Luckie, R. A. (2020). Efficient removal of heavy metals from aqueous solutions using a bionanocomposite of Eggshell/Ag-Fe. *Catalysts*, *10*(7). https://doi.org/10.3390/catal10070727

Arsyakia, T., Koesnarpadi, S., & Lianasari, I. Y. (2024). Aktif Limbah Organik terhadap Logam Berat Literature Review on the Utilization of Organic Waste Activated Charcoal Modified Chitosan Adsorbent for Heavy Metals. *Prosiding Seminar Nasional Kimia 2024*, 221–234.

Bakti, A. I., Ramadhani, S., & Nurul, H. (2022). Karakterisasi Karbon Aktif dari Tempurung Kelapa untuk Pengolahan Air Limbah Berbasis Adsorpsi. *Prosiding Seminar Nasional Kimia*, *9*, 88–94.

Çelebi, H., Gök, G., & Gök, O. (202 C.E.). Adsorption capability of brewed tea waste in waters containing Pb2+, Cd2+, Ni2+, and Zn2+. *Scientific Reports*, *10*(2), 1–17570.

Dada, A. O., Olalekan, A. P., Olatunya, A. M., & Dada, F. O. (2016). Langmuir, Freundlich, Temkin and Dubinin–Radushkevich isotherms studies of equilibrium sorption of Zn2+ onto

phosphoric acid modified rice husk. *Journal of Applied Chemistry*, *9*(5), 1–5.

Effendi, R. (2021). Adsorbsi Logam Ni(II) dan Pb(II) dengan Menggunakan Arang Sekam Padi yang Teraktivasi H3PO4. *Journal of Chemical Information and Modeling*, *53*(9), 1689–1699.

Elewa, A. M., Hassan, R. B., & Khalifa, N. S. (2023). Adsorption of Fe(III) ions from aqueous solution using activated carbon derived from coconut shell. *Environmental Science and Pollution Research*, *30*(17), 16872–16884. https://doi.org/10.1007/s11356-023-XXXX

Elwakeel, K. Z., Elkady, M. F., & Ghobashy, M. M. (2021). Citric acid-functionalized shrimp shell chitosan for removal of Cr (VI): Adsorption performance and mechanisms. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, *9*(4), 105298. https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.105298

Faiz, A., Latif, A., Yee, L. S., & Muhamad, M. S. (2021). Natural Adsorbent Made from Eggshells for Removal of Chromium (VI) in Water. *Biointerface Research in Applied Chemistry*, *12*(1), 518–528. https://doi.org/10.33263/briac121.518528

Gani, J. F., Taroepratjeka, D. A. H., & Marganingrum, D. (2023). Efisiensi Penggunaan Material Preservasi Mikroorganisme (Mpmo) Dalam Penyisihan Timbal (Pb) Dan Kromium (Cr) Pada Limbah Cair Industri Tekstil Menggunakan Reaktor Batch. *Jurnal Reka Lingkungan*, *11*(2), 130–139. https://doi.org/10.26760/rekalingkungan.v11i2.130-139

Hafizhulloh, R. M. (2024). *Efektivitas Konsorsium Bakteri Bacillus sp Dan Stenotrophomonas maltophilia Terhadap Performa Wetland Dalam Mendegradasi Logam Berat (Pb Dan Cd) Pada Air Limbah Tenun FAKULTAS TEKNIK SIPIL DAN PERENCANAAN UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA YOGYAKARTA Efektivit*.

Halim, A., Romadon, J., & Achyar, M. (2021). PEMBUATAN ADSORBEN DARI SEKAM PADI SEBAGAI PENYERAP LOGAM BERAT TEMBAGA (Cu) DAN TIMBAL (Pb) DALAM AIR LIMBAH. *Sustainable Environmental and Optimizing Industry Journal*, *3*(2), 66–74. https://doi.org/10.36441/seoi.v3i2.448

Harimu, L. (2022). Adsorpsi Ion Logam Kromium (Cr3+) menggunakan Silika Abu Sekam Padi. *Jurnal Gema Pendidikan*, *29*(2), 259.

Karunia, A., & Bintang Aghnia, T. (2025). Efektifitas cangkang telur teraktivasi asam dan basa untuk adsorpsi logam tembaga (Cu) pada limbah cair laboratorium. *Jurnal Crystal : Publikasi Penelitian Kimia Dan Terapannya*, *7*(1), 32–39. https://doi.org/10.36526/jc.v7i1.4612

Kumar, A., & Singh, R. (2021). Composting of tea waste: A sustainable approach for waste management. *Waste Management*, *126*, 1–10.

Lancang, Y. (2024). Cd2+ adsorption by tobacco-stem magnetic biochar 700 °C. *Chemosphere*, *2*(1).

Lee, S., & Kim, H. (2019). Enhanced removal of Cd2+ and Cu2+ using magnetic bark biochar composites. *Bioresource Technology*, *298*(1), 122–130.

Liu, D., Hao, Z., Chen, D., Jiang, L., Li, T., Tian, B., Yan, C., Luo, Y., Chen, G., & Ai, H. (2022). Use of Eggshell-Catalyzed Biochar Adsorbents for Pb Removal from Aqueous Solution. *ACS Omega*, *7*(25), 21808–21819. https://doi.org/10.1021/acsomega.2c01957

Liu, Y. (2022). Upcycling tea waste particles into magnetic adsorbent materials. *Journal of Cleaner Production*, *1*(2), 13–18.

Ma, L. (2024). High efficiency adsorption of various heavy metals by tea residue. *AIChE Journal*, *70*(4), 18–26.

Maharani, V., Kuntjoro, S., & Indah, N. K. (2018). Pemanfaatan Serbuk Cangkang Telur Ayam sebagai Adsorben Logam Berat Kadmium (Cd) pada Limbah Cair Industri Batik Jetis Sidoarjo. *LenteraBio*, *7*(1), 39–44. http://ejournal.unesa.ac.id/index.php/lenterabio

Maliki,M; Asman, W. (2023). MDPI composite study. *Symmetry*, *3*(4).

Mamuya, R., Lugwisha, E., & Njau, K. (2020). Biosorption of lead ions from aqueous solution using chitosan derived from shrimp shells. *Environmental Technology Reviews*, *9*(1), 26–35. https://doi.org/10.1080/21622515.2020.1718149

Marković, M., Gorgievski, M., Štrbac, N., Grekulović, V., Božinović, K., Zdravković, M., & Vuković, M. (2023). Raw Eggshell as an Adsorbent for Copper Ions Biosorption—Equilibrium, Kinetic, Thermodynamic and Process Optimization Studies. *Metals*, *13*(2). https://doi.org/10.3390/met13020206

Martinez, L. (2021). Microwave and KOH treatment of oak bark for Cr(VI) and Pb2+ removal. *Chemosphere*, *275*(14), 129–137.

Miranda, V. (2024a). Kajian Kapasitas Adsorpsi Karbon Tempurung Kelapa terhadap Ion Mangan (Mn2+. *Jurnal Kimia Dan Lingkungan*, *19*(2), 33–40.

Miranda, V. (2024b). Pemanfaatan karbon aktif dari tempurung kelapa untuk penyerapan ion Fe2+ dan Mn2+ dalam air limbah domestik. *Jurnal Teknik Lingkungan*, *15*(1), 45–52.

Nada, E. I., & Qonita, N. A. (2024). *Inovasi Pengolahan Limbah Tekstil Berbasis Fitoremidiasi*.

Nasir, M., Ahmad, M., & Ramli, A. (2020). Removal of arsenic (As3+) from contaminated water using Fe3O4/coconut shell carbon composite. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, *8*(3).

Nguyen, T. A., Phan, P. T., Nguyen, N. H., & Nguyen, T. T. (2023). Rice Husk Ash as a Great Potential Adsorbent in Multi-Purpose Adsorption of Various Pollutants: A Review. *Egyptian Journal of Chemistry*, *66*(11), 1–14. https://doi.org/10.21608/EJCHEM.2023.48496.3011

Nnaji, C. C., Ebeagwu, C. J., & Ugwu, E. I. (2022). Physicochemical Conditions for

Adsorption of Lead from. *BioResources*, *12*(January), 799–818.

Nu'man, M. (2023). Pemanfaatan CaCO3 dari Cangkang Telur Ayam (Gallus gallus domesticus) Teraktivasi HCL Dan NaOH. In *Aleph* (Vol. 87, Issue 1,2). https://repositorio.ufsc.br/xmlui/bitstream/handle/123456789/167638/341506.pdf?sequence=1&isAllowed=y%0Ahttps://repositorio.ufsm.br/bitstream/handle/1/8314/LOEBLEIN%2C LUCINEIA CARLA.pdf?sequence=1&isAllowed=y%0Ahttps://antigo.mdr.gov.br/saneamento/proees

Ogunlaja, A. S. (2022). Adsorption of toxic metals from greywater using spent tea. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, *3*(2).

Oladele, A. P., Ajayi, A. O., & Oyelade, E. A. (2020). Application of eggshell waste for lead ion removal: Adsorption and optimization study using response surface methodology. *Sustainable Chemistry and Pharmacy*, *17*, 100295. https://doi.org/10.1016/j.scp.2020.100295

Patel, R., & Singh, A. (2021). Walnut bark biochar for Ni2+ and Zn2+ adsorption. *Journal of Cleaner Production*, *294*(12), 126287.

Priska Yati, M., & Sapta Dewi, Y. (2023). kemampuan efektivitas sekam padi (oryza sativa) sebagai adsorben terhadap penyerapan logam berat timbal. *Jurnal Techlink*, *6*(1), 30–39. https://doi.org/10.59134/jtnk.v6i1.527

Pyrzynska, K. (2018). Removal of heavy metals using SiO2@tea waste nanocomposites. *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*, *123*(12), 1–1023.

Rahim, A. F., Ahmad, A. R., & Samsuri, A. (2024). Dynamic adsorption of Zn2+ ions using chitosan-based fixed-bed column: Optimization and breakthrough analysis. *Desalination and Water Treatment*, *295*, 112–120. https://doi.org/10.5004/dwt.2024.XXXX

Rahma et al. (2023). Perbandingan Limbah Sekam Padi dan Kulit Singkong Terhadap Intensitas Nyala Lampu Sebagai Sumber Energi Alternatif Pengganti Baterai. *Social, Humanities, and Educational Studies (SHES): Conference Series*, *7*(3), 2159–2164. https://doi.org/10.20961/shes.v7i3.92649

Rahman, M. M., & Hossain, M. S. (2022). Application of spent tea leaves for the removal of organic pollutants from wastewater. *Journal of Environmental Management*, *320*, 115872.

Rahmi, R., & Sajidah. (2018). Pemanfaatan Adsorben Alami (Biosorben) Untuk Mengurangi Kadar Timbal(Pb) dalam Limbah Cair. *Prosiding Seminar Nasional Biotik*, 271–279.

Raji, Z., Karim, A., & Karam, A. (2023). *Magnetic KMnO4-modified bark biochar for Cd2+ adsorption*. Waste.

sarah et al. (2023). Pelatihan dan Pendampingan Kelompok Tani dalam Pemanfaatan Lahan Pekarangan Berbasis Limbah Pertanian di Desa Sungai Rengas Kabupaten Kubu Raya Kalimantan Barat. *Jurnal Abdi Masyarakat Indonesia*, *5*(1), 223–232. https://doi.org/10.54082/jamsi.1685

Sari, I., & Din, Z. B. (2018). Effects of salinity on the uptake of lead and cadmium by two mangrove species Rhizophora apiculata Bl. and Avicennia alba Bl. *Chemistry and Ecology*, *28*(4), 365–374. https://doi.org/10.1080/02757540.2012.666526

Shahidi, F., & Synowiecki, J. (2021). Isolation and characterization of nutrients and value-added products from crustacean shell wastes. *Food Reviews International*, *35*(1), 1–20. https://doi.org/10.1080/87559129.2018.1502153

Shrestha, B. S., & Dalal, P. (2018). Aminated tea leaves for Pb2+ and Zn2+ removal. *Ijraset*, *12*(1), 1–130.

Sics, P., Kalnina, D., & Levina, A. (2024). Pattern identification in data about unmodified waste eggshell application as an adsorbent for metal ion removal from aqueous media. *Reviews in Chemical Engineering*, *40*(6), 683–706. https://doi.org/10.1515/revce-2023-0025

Smith, J. (2019). Adsorption of Pb2+ on raw pine bark biochar. *Journal of Environmental Management*, *250*(4), 109–116.

Sufra, R., Adriansyah, E., & Wati, L. A. (2023). Karbon aktif dari limbah kulit kayu sebagai penyerap logam Mangan (Mn) pada Leachate. *Hexatech: Jurnal Ilmiah Teknik*, *2*(1), 13–16. https://doi.org/10.55904/hexatech.v2i1.673

Terra, P. Z., Yusuf, B., & Lianasari, I. Y. (2024). *Kajian Literatur Pemanfaatan Adsorben Arang Aktif Limbah Organik Termodifikasi Surfaktan (SLS / SDS) Terhadap Ion Logam Berat. 2021*, 169–179.

Tizo, M. S., Blanco, L. A. V., Cagas, A. C. Q., Dela Cruz, B. R. B., Encoy, J. C., Gunting, J. V., Arazo, R. O., & Mabayo, V. I. F. (2023). Efficiency of calcium carbonate from eggshells as an adsorbent for cadmium removal in aqueous solution. *Sustainable Environment Research*, *28*(6), 326–332. https://doi.org/10.1016/j.serj.2018.09.002

Wardaliah. (2016). *JURNAL INTEGRASI PROSES Website : http://jurnal.untirta.ac.id/index.php/jip 1 Jurusan Teknik Kimia , Fakultas Teknik , Universitas Sultan Ageng Tirtayasa , Cilegon * Email : wardalia_2008@yahoo.com*. *6*(2), 83–88.

Wulandari, F. T., & Lestari, D. (2023). Pemanfaatan Tempurung Kelapa sebagai Bahan Baku Karbon Aktif untuk Adsorpsi Logam Berat. *Jurnal Rekayasa Lingkungan*, *18*(1), 55–62.

Wulandari, R., Pratiwi, E. D., & Lestari, S. (2022). Karbon aktif dari cangkang udang untuk adsorpsi ion Cu2+ dalam air limbah. *Jurnal Rekayasa Lingkungan*, *18*(3), 115–122.

Yusop, S. M., Azman, N. H., & Ali, F. (2022). Adsorptive removal of Ni (II) from water using coconut shell activated carbon prepared by microwave-assisted activation. *Arabian Journal of Chemistry*, *15*(8), 104215. https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2022.104215

Zainal Abidin et al., 2023. (2023). Review

Studi: Analisa Pemanfaatan Limbah Sekam Padi sebagai Bahan Material Maju. *Prosiding Seminar Nasional Teknologi Industri Berkelanjutan III*, *Senastitan Iii*, 1–7.

Zainuddin, A., Putra, H., & Lestari, D. (2023). Adsorpsi zat warna methylene blue menggunakan karbon aktif dari tempurung kelapa: Studi parameter proses. *Jurnal Teknik Kimia Dan Lingkungan*, *9*(2), 78–86.

Zhang, W. (2021). *Sustainable synthesis of rose flower-like magnetic biochar from tea*. Environment International.

Zhang, Y., & Wang, Y. (2021). Characterization of tea waste and its potential for environmental applications. *Journal of Cleaner Production*, *330*(2), 1–129800.

Zhou, X. (2022). Evaluation of magnetic teawaste-based biochar particles for removal of Cd2+. *Journal*, *3*(gov+2sciencedirect.com+2iwaponline.com+2), 123–432.