



Dari Limbah Menjadi Solusi: Inovasi Material Sisa Industri untuk Pengolahan Seng (Zn)

Aldo Geo Frengky Saragih¹, Anggun Maharani^{2*}, Elit Manaman Gulo³, Hotma Br Butar Butar⁴, Mutia Patmasari Batubara⁵, Sarnika Simbolon⁶, Iis Siti Jahro⁷

¹⁻⁷ Universitas Negeri Medan, Indonesia

*Penulis Korespondensi: anggun.4231131037@mhs.unimed.ac.id²

Abstract. Zinc (Zn) is one of the most common heavy metal contaminants found in industrial wastewater and solid residues such as slag, electroplating waste, and metal ash. At excessive concentrations, Zn can cause environmental disturbances, including toxicity to aquatic organisms, disruption of microbial activity, and groundwater contamination. Long-term exposure may also lead to bioaccumulation and potential health risks to humans. This article presents a comprehensive literature review that discusses the chemical properties of Zn, its environmental behavior, and the development of recent treatment technologies within the last five years. Several techniques, including adsorption using modified or composite materials, biosorption utilizing microalgae and agricultural biomass, as well as solidification–stabilization with amendment agents such as biochar or iron-sulfide compounds, are evaluated and compared. The literature indicates that no single treatment method is universally effective for all waste types; therefore, hybrid or integrated treatment systems are considered more efficient and sustainable. Based on the reviewed evidence, this study proposes an engineering concept that emphasizes environmental safety, cost-effectiveness, and industrial applicability.

Keywords: Adsorption; Biosorption; Industrial Waste; Stabilization; Zinc.

Abstrak. Seng (Zn) merupakan salah satu logam berat yang umum ditemukan dalam limbah cair pada industri maupun limbah padat seperti slag, abu logam, dan residu proses pelapisan logam. Pada konsentrasi tinggi, Zn dapat memicu berbagai dampak negatif terhadap lingkungan, termasuk toksisitas pada organisme air, perubahan struktur mikroba, serta kontaminasi air tanah yang berpotensi berbahaya bagi kesehatan manusia melalui bioakumulasi. Artikel ini menyajikan kajian literatur komprehensif mengenai karakteristik kimia Zn, perilaku senyawa Zn di lingkungan, serta perkembangan teknologi pengolahan limbah yang dilaporkan dalam lima tahun terakhir. Metode yang dianalisis meliputi adsorpsi menggunakan material termodifikasi, biosorpsi dengan biomassa atau mikroalga, serta stabilisasi-padatifikasi menggunakan bahan amender seperti biochar atau senyawa besi-sulfida. Berdasarkan hasil kajian literatur, tidak ada satu metode yang sepenuhnya optimal untuk semua jenis limbah, sehingga pendekatan terintegrasi dinilai lebih efektif dan berkelanjutan. Kajian ini kemudian mengusulkan rancangan rekayasa pengolahan terpadu yang berfokus pada efisiensi teknis, keberlanjutan, dan kelayakan aplikatif pada skala industri.

Kata kunci: Adsorpsi; Biosorpsi; Limbah Industri; Seng; Stabilisasi.

1. LATAR BELAKANG

Pencemaran logam berat seng (Zn) dari berbagai kegiatan industri (mis. pengolahan logam, galvanisasi, pembuatan pigmen, dan limbah industri rumah tangga) merupakan masalah lingkungan yang signifikan karena Zn pada konsentrasi tinggi dapat bersifat toksik bagi organisme akuatik dan berpotensi menimbulkan risiko kesehatan bagi manusia melalui rantai makanan. Studi-studi regional melaporkan efek toksik dan kebutuhan akan pengendalian kadar Zn pada air dan sedimen (Rahayu dkk., 2014)

Di antara banyak metode pengolahan limbah logam, adsorpsi muncul sebagai teknik yang banyak diteliti dan diaplikasikan karena sederhana, relatif murah, dan efektif untuk konsentrasi rendah–menengah. Berbagai penelitian di Indonesia telah menunjukkan bahwa

Naskah Masuk: 24 Oktober 2025; Revisi: 15 November 2025; Diterima: 06 Desember 2025; Terbit: 10 Desember 2025.

adsorben berbahan limbah pertanian atau limbah industri (mis. sekam padi, kulit singkong, biochar dari sludge) dapat menyisihkan Zn dengan efisiensi tinggi pada kondisi operasi tertentu, sehingga menawarkan solusi berbiaya rendah dan sejalan dengan prinsip ekonomi sirkular (Indah et al., 2021).

Pemanfaatan bioadsorben berbasis limbah (contoh: kulit singkong, sekam padi) juga dilaporkan mampu mencapai efisiensi penyisihan Zn yang tinggi pada percobaan kolom dan batch, sehingga layak dipertimbangkan untuk skala komunitas atau industri kecil—namun kapasitas dan kinetika adsorpsi bergantung pada perlakuan aktivasi/penyediaan permukaan serta kondisi pH dan laju alir. Hasil-hasil ini menegaskan potensi metoda adsorpsi yang memanfaatkan sumber daya lokal sebagai alternatif ekonomis (Nisya et al., 2022)

Selain adsorpsi, literatur nasional juga menunjukkan keberagaman pendekatan lain (mis. modifikasi kimia adsorben, kombinasi beberapa tahap pengolahan, serta teknik stabilisasi–padatifikasi untuk residu padat) yang diperlukan ketika menghadapi variasi jenis limbah (cair vs. padat) dan rentang konsentrasi Zn. Oleh karena itu, kajian komprehensif yang membandingkan metode-metode tersebut dan merumuskan strategi hibrida (mis. tahap awal pengurangan konsentrasi diikuti adsorpsi lanjutan dan stabilisasi residu) menjadi penting untuk menghasilkan rekomendasi terapan yang aman, efisien, dan berkelanjutan (Nisa dkk., 2013)

2. KAJIAN TEORITIS

Seng (Zn) merupakan salah satu unsur logam transisi golongan IIB yang memiliki peranan penting dalam sistem biologis dan industri. Unsur ini berfungsi sebagai kofaktor bagi berbagai enzim seperti dehidrogenase dan karboksipeptidase yang berperan dalam metabolisme protein serta pembentukan DNA (Kilo, 2018). Dalam bidang industri, seng banyak digunakan pada proses pelapisan logam (galvanisasi), pembuatan baterai, cat, kosmetik, serta paduan logam karena daya tahan korosi dan konduktivitas listriknya yang baik (Sugiyarto & Suyanti, 2009). Namun, penggunaan seng dalam jumlah besar telah menyebabkan meningkatnya emisi limbah cair dan padat yang mengandung ion Zn^{2+} ke lingkungan. Limbah tersebut umumnya berasal dari industri baja, pelapisan logam, dan baterai, di mana Zn dilepaskan dalam bentuk larutan ionik atau partikel padat (Manninen, M., Kangas, T., Hu, T., Varila, T., Lassi, U., & Runtti, 2023)

Secara kimia, seng memiliki konfigurasi elektron $[Ar]3d^{10}4s^2$ dengan bilangan oksidasi stabil +2, bersifat diamagnetik, dan cenderung membentuk kompleks koordinasi dengan ligan donor seperti $-OH$, $-COOH$, dan $-NH_2$ (Farida, 2018). Senyawa ZnO dan $Zn(OH)_2$ bersifat amfoter, yang artinya dapat larut baik dalam asam maupun basa, sehingga kelarutannya sangat

bergantung pada pH lingkungan (Adlim, 2009). Dalam perairan, Zn^{2+} sering membentuk kompleks seperti $Zn(OH)_2$, $ZnCO_3$, atau $ZnCl_4^{2-}$ yang memiliki kestabilan tinggi, menyebabkan senyawa tersebut sulit terdegradasi secara alami. Akibatnya, ion seng dapat bertahan lama di air maupun sedimen dan berpotensi mengalami akumulasi biologis pada organisme air (Guo et al., 2021)

Peningkatan kadar seng dalam lingkungan berdampak negatif terhadap kesehatan manusia dan biota akuatik. Paparan kronis Zn^{2+} dapat menyebabkan gangguan pencernaan, iritasi kulit, dan kerusakan organ hati serta ginjal (Sugiyarto & Suyanti, 2009). Pada ekosistem air, kelebihan Zn menyebabkan penurunan kadar oksigen terlarut, menghambat proses fotosintesis fitoplankton, dan menurunkan produktivitas biota air (Arifiyana & Wardani, 2021). Selain itu, logam seng yang mengendap di sedimen dapat mengalami remobilisasi kembali ke kolom air akibat perubahan pH dan aktivitas mikroorganisme, menimbulkan pencemaran sekunder yang sulit dikendalikan. Oleh karena itu, pengolahan limbah yang mengandung seng menjadi isu penting untuk mencegah kerusakan lingkungan lebih lanjut (Wijaya et al., 2020).

Berbagai teknologi pengolahan limbah telah dikembangkan untuk mengurangi kandungan Zn^{2+} , meliputi metode kimia, fisika, dan biologi. Proses kimia mencakup presipitasi, pertukaran ion, dan stabilisasi padat; metode fisika umumnya berupa adsorpsi dan filtrasi membran; sedangkan pendekatan biologi seperti biosorpsi memanfaatkan mikroalga, jamur, atau biomassa tumbuhan untuk menyerap ion logam berat (Manninen, M., Kangas, T., Hu, T., Varila, T., Lassi, U., & Runtti, 2023). Penelitian menunjukkan bahwa material alkali-activated dari limbah industri baja memiliki kemampuan menyerap Zn^{2+} hingga 17,25 mg/g, sedangkan biosorben alami seperti kulit pisang Mas dan daun teh mampu menurunkan kadar logam seng dengan efisiensi lebih dari 90 %. Hasil-hasil ini menunjukkan potensi besar dari material alami dan limbah industri sebagai sumber adsorben alternatif (Arifiyana & Wardani, 2021)

Namun demikian, setiap metode pengolahan memiliki keunggulan dan keterbatasan. Adsorpsi menggunakan bahan sintesis seperti grafena oksida magnetik memberikan efisiensi tinggi tetapi biaya produksinya mahal serta sulit diregenerasi (Guo et al., 2021). Sebaliknya, biosorpsi menggunakan limbah pertanian bersifat murah dan ramah lingkungan, tetapi efisiensinya bergantung pada pH, waktu kontak, dan kondisi kimia permukaan biosorben (Arifiyana & Wardani, 2021). Dengan demikian, diperlukan strategi pengolahan yang inovatif dan berkelanjutan, yakni mengombinasikan berbagai pendekatan seperti adsorpsi, biosorpsi, dan stabilisasi padat untuk memperoleh hasil optimal dalam penanganan pencemaran limbah cair maupun padat yang mengandung logam seng (Syamsidar, 2013).

3. METODE PENELITIAN

Penelitian ini berupa studi literatur. Langkah-langkahnya dengan pencarian jurnal ilmiah dan artikel penelitian dari tahun 2019–2025 melalui basis data (ScienceDirect, MDPI, PubMed, dan lain-lain) dengan kata kunci “zinc removal”, “zinc adsorption”, “zinc stabilization slag”, “biosorption Zn”. Seleksi lima jurnal paling relevan dengan fokus teknik pengolahan limbah Zn baik cair maupun padat. Analisis deskriptif komparatif atas metode, efisiensi, kelebihan dan kelemahan masing-masing studi. Sintesis ide solusi rekayasa terpadu berdasarkan hasil analisis (menggabungkan elemen-elemen unggul dari tiap studi).

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Berikut lima jurnal (2019–2025) terkini yang membahas pemecahan masalah Zn, dengan ringkasan dan evaluasi:

Tabel 1. Hasil studi literatur.

No	Jurnal & Tahun	Teknik / Material	Hasil & Catatan	Kelebihan & Keterbatasan
1	Manninen <i>et al.</i> (2024)	Alkali-activated material (AAM) dari slag baja, kolom alir tetap	Adsorpsi Zn hingga kapasitas tinggi dan efisiensi tinggi dalam kondisi optimum	Kelebihan: material murah (slag bekas), cocok untuk pengolahan alir terus-menerus. Keterbatasan: performa menurun bila beban Zn sangat tinggi; regenerasi adsorben perlu dievaluasi
2	Shah <i>et al.</i> (2024)	Biochar dari limbah sludge pengolahan air limbah (SSB)	Penghilangan Zn dan Cd dalam air, efisiensi baik pada pH optimum	Kelebihan: bahan limbah, biaya rendah. Keterbatasan: kapasitas terbatas, waktu kontak mungkin panjang
3	Deng <i>et al.</i> (2024)	Komposit MgFe-LDH @ Banana Straw Biochar (MgFe-LDH@BB)	Kapasitas adsorpsi Zn ~414,9 mg/g, mekanisme ion exchange, kompleksasi, presipitasi hidroksida / karbonat	Kelebihan: kapasitas tinggi, multifungsi terhadap logam lain. Keterbatasan: proses sintesis relatif kompleks, memerlukan optimasi bahan penopang
4	Samchenko <i>et al.</i> (2025)	Material hasil ferritization (FeOOH / Fe_3O_4) dari limbah industri, dengan aktivasi ultrasound	Menghapus Zn hingga ~92–98,9 % tergantung pH, stabilitas tinggi pada $\text{pH} \geq 8$	Kelebihan: efisiensi tinggi, stabilitas. Keterbatasan: butuh perlakuan ultrasound dan kontrol pH, mungkin biaya tambahan
5	Rajasekar <i>et al.</i> (2025)	Presipitasi biologis (microorganisme) untuk konsentrasi tinggi Zn, Cd, Ni	Efisiensi > 93% penghilangan Zn dalam beberapa kondisi tinggi spesifik	Kelebihan: metode biologis, potensi ramah lingkungan. Keterbatasan: rentan kondisi lingkungan (pH, suhu), kecepatan relatif rendah dibandingkimia

Analisis dan Pembandingan: (a) Material dari slag (AAM) dan biochar-modifikasi menunjukkan potensi tinggi karena memanfaatkan limbah sendiri sebagai bahan dasar, menekan biaya. (b) Komposit dengan LDH (lapisan dua logam) seperti MgFe-LDH@BB memberikan kapasitas tinggi dan fleksibilitas terhadap banyak logam (Zn, Pb, Cd), menjadikannya metode multifungsi. (c) Metode ferritization dengan aktivasi ultrasound menonjol karena stabilitas sorben dan efisiensi tinggi pada pH basa, tetapi memerlukan fasilitas tambahan (ultrasound). (d) Presipitasi biologis cocok untuk konsentrasi tinggi, namun kontrol kultur mikroba dan kondisi lingkungan menjadi tantangan. (e) Biochar dari sludge sederhana dan murah, namun kapasitasnya pada umumnya lebih rendah dibanding komposit modifikasi.

Pengolahan limbah yang mengandung logam seng (Zn) menjadi perhatian penting karena logam ini bersifat toksik pada kadar tinggi dan tidak dapat terurai secara alami. Berdasarkan hasil kajian terhadap lima jurnal penelitian terbaru, berbagai pendekatan telah dikembangkan untuk menurunkan kandungan Zn^{2+} baik dalam limbah cair maupun padat, seperti adsorpsi, biosorpsi, elektrosorpsi, serta stabilisasi-padatifikasi (*solidification/stabilization*). Setiap metode memiliki prinsip kerja dan keunggulan yang berbeda, namun semuanya bertujuan untuk mengurangi mobilitas dan toksisitas logam seng di lingkungan.

Metode adsorpsi merupakan salah satu teknik paling banyak digunakan karena sederhana dan efisien. Modifikasi permukaan silika mesopori dengan gugus EDTA dapat meningkatkan daya ikat terhadap ion Zn^{2+} melalui pembentukan kompleks koordinasi. Adsorben ini memiliki kapasitas serap tinggi dan mudah diregenerasi menggunakan larutan asam ringan (Ezzeddine, Z., Al-Harbi, S., & Bukhari, 2023). Penggunaan biochar dari limbah sludge, yang terbukti efektif dan ekonomis. Walaupun kapasitas serapnya lebih rendah dibanding bahan sintetis, biochar memiliki keuntungan dalam aspek ketersediaan bahan, biaya, serta keberlanjutan lingkungan (Shah, A., Nisar, J., & Anwar, 2024)

Pendekatan lain yang cukup inovatif adalah elektrosorpsi. Teknik ini memanfaatkan gaya elektrostatis yang ditimbulkan oleh beda potensial listrik untuk menarik ion logam menuju elektroda karbon aktif. Hasilnya, proses penghilangan Zn berlangsung lebih cepat dan dapat dikendalikan dengan mudah. Selain itu, adsorben dapat diregenerasi hanya dengan membalik polaritas arus listrik. Kelemahannya adalah kebutuhan energi listrik yang relatif tinggi dan peralatan yang lebih kompleks dibanding metode konvensional (Dong et al., 2024)

Untuk limbah padat seperti lumpur industri dan abu logam, metode stabilisasi-padatifikasi (S/S) menjadi solusi utama. Teknik ini melibatkan pencampuran limbah padat

dengan bahan pengikat seperti semen, slag, atau residu alkali untuk mengubah logam menjadi bentuk yang tidak larut. Hasilnya, logam Zn menjadi terperangkap secara kimia dan fisik di dalam matriks padat (Chen et al., 2023). Pengembangam pendekatan S/S menggunakan komposit phosphogypsum–slag (PSC) yang lebih ramah lingkungan dan memiliki kekuatan mekanik tinggi. Bahan ini tidak hanya mengurangi mobilitas Zn, tetapi juga menghasilkan produk padat yang stabil dan berpotensi dimanfaatkan sebagai material konstruksi non-struktural (Liu et al., 2025).

Berdasarkan kelima penelitian tersebut, dapat disimpulkan bahwa tidak ada satu metode tunggal yang sepenuhnya ideal untuk semua jenis limbah seng. Namun, hasil analisis menunjukkan bahwa kombinasi beberapa teknik dapat menghasilkan sistem pengolahan yang lebih efektif dan berkelanjutan. Untuk limbah cair dengan konsentrasi Zn tinggi, elektrosorpsi dapat digunakan sebagai tahap awal untuk mempercepat penurunan kadar logam, diikuti dengan adsorpsi menggunakan bahan termodifikasi seperti silika-EDTA atau biochar untuk menghilangkan sisa ion logam hingga ke tingkat aman. Adapun limbah padat seperti lumpur atau slag sebaiknya diolah melalui proses stabilisasi-padatifikasi menggunakan komposit PSC agar logam seng terperangkap permanen dalam struktur padat dan tidak mudah larut kembali ke lingkungan.

Dengan demikian, solusi yang paling tepat untuk pengolahan limbah seng adalah pendekatan hibrida tiga tahap, yaitu: (a) Elektrosorpsi cepat untuk menghilangkan sebagian besar ion Zn^{2+} dari limbah cair. (b) Adsorpsi lanjutan menggunakan bahan modifikasi EDTA atau biochar untuk menyerap sisa ion logam. (c) Stabilisasi-padatifikasi (S/S) dengan komposit PSC untuk mengolah residu padat dan lumpur hasil proses sebelumnya.

Pendekatan integratif ini tidak hanya mampu menurunkan kadar Zn hingga di bawah batas aman, tetapi juga meminimalkan risiko pencemaran sekunder melalui imobilisasi permanen logam dalam fase padat. Selain itu, penggunaan bahan berbasis limbah (seperti slag dan biochar) mendukung prinsip *circular economy* yang berkelanjutan dan ramah lingkungan.

5. KESIMPULAN DAN SARAN

Berdasarkan hasil telaah dari lima jurnal ilmiah terkini, dapat disimpulkan bahwa pencemaran logam seng (Zn) dari limbah cair maupun padat merupakan permasalahan lingkungan yang memerlukan penanganan komprehensif. Setiap metode pengolahan seperti adsorpsi, biosorpsi, elektrosorpsi, serta stabilisasi-padatifikasi memiliki efektivitas dan keunggulannya masing-masing. Adsorpsi menggunakan bahan termodifikasi seperti silika-

EDTA terbukti meningkatkan kapasitas pengikatan ion Zn^{2+} secara signifikan, sedangkan pemanfaatan biochar dari sludge memberikan alternatif ramah lingkungan dengan biaya rendah. Elektrosorpsi menawarkan efisiensi tinggi dan proses regenerasi yang cepat, sementara metode padatifikasi menggunakan komposit phosphogypsum–slag (PSC) mampu mengunci logam seng dalam struktur padat yang stabil dan aman untuk penyimpanan jangka panjang.

Dari hasil analisis perbandingan tersebut, metode pengolahan yang paling tepat adalah pendekatan hibrida tiga tahap, yakni kombinasi elektrosorpsi, adsorpsi, dan stabilisasi-padatifikasi. Tahap elektrosorpsi berfungsi menghilangkan sebagian besar ion Zn^{2+} dengan cepat; tahap adsorpsi berperan menyerap residu logam menggunakan bahan modifikasi atau biochar; sedangkan tahap padatifikasi berfungsi menstabilkan sisa logam dalam bentuk padat yang tidak mudah larut. Pendekatan ini dinilai efektif karena mampu menurunkan konsentrasi Zn hingga di bawah ambang batas aman, meminimalkan risiko pencemaran sekunder, dan mendukung prinsip circular economy melalui pemanfaatan kembali limbah industri sebagai bahan pengikat atau adsorben.

Untuk pengembangan lebih lanjut, disarankan agar penelitian mendatang melakukan uji eksperimental secara langsung terhadap sistem hibrida tersebut dengan memvariasikan parameter seperti pH, waktu kontak, serta dosis adsorben untuk menentukan kondisi optimum penghilangan Zn^{2+} . Pihak industri juga diharapkan mulai menerapkan teknologi pengolahan berbasis bahan alami dan limbah seperti biochar atau slag untuk menekan biaya serta meningkatkan keberlanjutan lingkungan. Selain itu, kolaborasi antara akademisi, pemerintah, dan sektor industri sangat diperlukan guna mempercepat penerapan teknologi pengolahan limbah logam yang efisien, ramah lingkungan, dan sesuai dengan regulasi nasional mengenai pengelolaan limbah berbahaya.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada institusi mitra dan lembaga penelitian yang telah memberikan dukungan selama proses penyusunan studi literatur ini. Apresiasi khusus diberikan kepada Laboratorium Lingkungan dan Teknologi Material, yang telah menyediakan akses ke berbagai basis data ilmiah seperti ScienceDirect, MDPI, dan PubMed, sehingga memungkinkan penelusuran jurnal secara komprehensif. Untuk pengembangan lebih lanjut, disarankan agar penelitian mendatang melakukan uji eksperimental secara langsung terhadap sistem hibrida tersebut dengan memvariasikan parameter seperti pH, waktu kontak, serta dosis adsorben untuk menentukan kondisi optimum penghilangan Zn^{2+} . Pihak industri juga diharapkan mulai menerapkan teknologi pengolahan berbasis bahan alami dan limbah seperti

biochar atau slag untuk menekan biaya serta meningkatkan keberlanjutan lingkungan. Selain itu, kolaborasi antara akademisi, pemerintah, dan sektor industri sangat diperlukan guna mempercepat penerapan teknologi pengolahan limbah logam yang efisien, ramah lingkungan, dan sesuai dengan regulasi nasional mengenai pengelolaan limbah berbahaya.

DAFTAR REFERENSI

- Adlim. (2009). *Kimia Anorganik*. Banda Aceh: Syiah Kuala University Press.
- Arifiyana, D., & Wardani, R. K. (2021). Adsorpsi logam kadmium dalam limbah cair buatan menggunakan biosorben kulit pisang mas (*Musa acuminata colla*). *Journal of Science and Technology*, 14(3), 360-366. <https://doi.org/10.21107/rekayasa.v14i3.12391>
- Chen, L., Wang, J., & Liu, Q. (2023). Review on stabilization/solidification methods and mechanism of heavy metals based on OPC-based binders. *Journal of Environmental Management*, 3(2), 160-171. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.117362>
- Dong, Y., Jiang, M., Zhao, J., Zhang, F., Ma, S., & Zhang, Y. (2024). Adsorption and desorption behavior of Zn^{2+} in a flow-through electrosorption assembly using activated carbon electrodes. *Environmental Technology & Innovation*, 27(4), 1-14. <https://doi.org/10.1016/j.isci.2024.109514>
- Ezzeddine, Z., Al-Harbi, S., & Bukhari, S. M. (2023). Zinc removal from water via EDTA-modified mesoporous silica (SBA-15 and SBA-16): Adsorption performance and regeneration behavior. *Materials Research Express*, 11(4), 1-16. <https://doi.org/10.3390/toxics11030205>
- Farida, I. (2018). *Kimia Anorganik: Karakteristik logam blok-s dan -p*. Bandung: UIN Sunan Gunung Djati Press.
- Guo, T., Bulin, C., Ma, Z., Li, B., Zhang, Y., Zhang, B., & Xing, R. (2021). Mechanism of Cd (II) and Cu (II) adsorption onto few-layered magnetic graphene oxide as an efficient adsorbent. *ACS Omega*, 6(2), 16515-16545. <https://doi.org/10.1021/acsomega.1c01770>
- Indah, S., Helard, D., Ramadhan, D., Lingkungan, J. T., Teknik, F., Andalas, U., & Barat, S. (2021). Penerapan kolom adsorpsi seri dengan adsorben sekam padi pada penyisihan logam seng (Zn) dari air tanah. *Jurnal Riset Kimia*, 12(1), 19-26. <https://doi.org/10.25077/jrk.v12i1.389>
- Kilo, A. L. (2018). *Kimia anorganik: Struktur dan kereaktifan*. Gorontalo: UNG Press.
- Liu, Z., Li, J., & Yang, F. (2025). Solidification/stabilization mechanism of compound heavy metal cations by phosphogypsum-slag composite (PSC): Immobilization and microstructural insights. *Science China Technological Sciences*, 68(2), 415-427. <https://doi.org/10.1007/s11431-025-2941-y>
- Manninen, M., Kangas, T., Hu, T., Varila, T., Lassi, U., & Runtti, H. (2023). Zn (II) removal from wastewater by an alkali-activated material prepared from steel industry slags: Optimization and modelling of a fixed-bed process. *Environmental Technology*, 45(13), 2519-2530. <https://doi.org/10.1080/09593330.2023.2177565>
- Nisa, C., Irawati, U., & S. (2013). Model adsorpsi timbal (Pb) dan seng (Zn) dalam sistem air. *Jurnal Konversi*, 2(1), 7-14. <https://doi.org/10.20527/k.v2i1.118>

- Nisya, R. A., Pribadi, A., Auvaria, S. W., & Widayanti, P. (2022). Penyisihan kadar seng (Zn) dengan bioadsorben kulit singkong menggunakan sistem kontinyu dengan berdasarkan Permenkes RI Nomor 492 Tahun 2010 tentang Persyaratan Kualitas Air. *Jurnal Sains & Teknologi Lingkungan*, 14(1), 95-107. <https://doi.org/10.20885/jstl.vol14.iss1.art9>
- Rahayu, H. S., Elystia, S., & Azis, Y. (2016). Adsorpsi logam seng (Zn) menggunakan precipitated calcium carbonate (PCC) dari limbah cangkang kerang lokan (*Geloina expansa*). *Jom FTEKNIK*, 3(2), 1-8.
- Shah, A., Nisar, J., & Anwar, S. (2024). Sustainable chemistry for the environment: Removal of cadmium and zinc from water using sewage sludge-derived biochar. *Sustainable Chemistry for the Environment*, 6(1), 100-115. <https://doi.org/10.1016/j.scenv.2024.100118>
- Sugiyarto, K. H., & Suyanti, R. D. (2009). *Kimia anorganik logam*. Yogyakarta: Graha Ilmu.
- Syamsidar, H. S. (2013). *Dasar reaksi kimia anorganik*. Makassar: UIN Alauddin Press.
- Wijaya, I. K., Farra, Y., & Udyani, K. (2020). Pemanfaatan daun teh sebagai biosorben logam berat dalam air limbah. *Jurnal Envirotek*, 12(2), 25-33. <https://doi.org/10.33005/envirotek.v12i2.55>