

**PEMANFAATAN MATERIAL BIOMASSA DAN LIMBAH INDUSTRI  
SEBAGAI ADSORBEN RAMAH LINGKUNGAN UNTUK  
PENURUNAN KADAR ION CD(II) DAN ZN(II)  
DALAM LIMBAH CAIR**

**Iis Siti Jahro<sup>1</sup>, Aulya Nurfaiza Br. Tarigan<sup>2</sup>, Elsa Elperida Pandiangan<sup>3</sup>, Regina  
Tesalonika Silaban<sup>4</sup>, Theresya Yolanda Kembaren<sup>5</sup>, Vanessa Putri Rizky  
Simanullang<sup>6</sup>**

**Universitas Negeri Medan, Sumatera Utara**

e-mail: <sup>2</sup>aulyanz10@gmail.com, <sup>3</sup>elsapandiangan93@gmail.com,

<sup>4</sup>reginatesalonika7@gmail.com, <sup>5</sup>vanessasimanullang7@gmail.com,

<sup>6</sup>yolandateresia648@gmail.com

**Abstract:** *This study aims to evaluate the effectiveness of utilizing biomass and industrial waste materials as environmentally friendly adsorbents in reducing the levels of heavy metal ions Cd(II) and Zn(II) in industrial wastewater. The research sample was a synthetic waste solution with a metal concentration of 10–100 ppm as a model population. The sampling technique used was purposive sampling on four types of adsorbents, namely SCOPY, EDTA-activated teak wood powder, modified fly ash, and iron-magnesium waste. Data were collected through laboratory experiments with metal content measurements using Atomic Absorption Spectroscopy (AAS). Data analysis included Langmuir and Freundlich isotherm methods, as well as pseudo-first and second-order adsorption kinetics models to understand the adsorption mechanism. The results showed that ironmagnesium waste was able to reduce Cd(II) and Zn(II) levels by more than 99%, followed by fly ash and SCOPY biomass with significant efficiency. This study demonstrates the great potential of sustainable adsorbent materials that support the principles of a circular economy and more environmentally friendly waste management solutions. It is recommended to develop industrial scale applications to support the Sustainable Development Goals in the field of providing clean water and proper sanitation.*

**Keyword:** *Environmentally Friendly Adsorbent, Biomass, Industrial Waste, Heavy Metal Ions, Cd(II), Zn(II)*

**Abstrak:** Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi efektivitas pemanfaatan material biomassa dan limbah industri sebagai adsorben ramah lingkungan dalam menurunkan kadar ion logam berat Cd(II) dan Zn(II) dalam limbah cair industri. Sampel penelitian berupa larutan limbah sintetik dengan konsentrasi logam 10–100 ppm sebagai populasi model. Teknik sampling yang digunakan adalah purposive sampling pada empat jenis adsorben, yaitu SCOPY, serbuk kayu jati teraktivasi EDTA, fly ash termodifikasi, dan limbah besi-magnesium. Data dikumpulkan melalui eksperimen laboratorium dengan pengukuran kadar logam menggunakan Atomic Absorption Spectroscopy (AAS). Analisis data meliputi metode isoterm Langmuir dan Freundlich, serta model kinetika adsorpsi pseudo-orde satu dan dua untuk memahami mekanisme penyerapan. Hasil menunjukkan bahwa limbah besi-magnesium mampu menurunkan kadar Cd(II) dan Zn(II) hingga lebih dari 99%, diikuti oleh fly ash dan biomassa SCOPY dengan efisiensi yang signifikan. Penelitian ini menunjukkan potensi besar material adsorben berkelanjutan yang mendukung prinsip ekonomi sirkular dan solusi pengelolaan limbah yang lebih ramah lingkungan. Disarankan pengembangan skala aplikasi industri guna mendukung tujuan Sustainable Development Goals pada bidang penyediaan air bersih dan sanitasi layak.

**Kata kunci:** Adsorben Ramah Lingkungan, Biomassa, Limbah Industri, Ion Logam Berat, Cd(II), Zn(II)

## PENDAHULUAN

Kadmium (Cd) dan seng (Zn) merupakan logam berat golongan IIB dalam tabel periodik yang memiliki kemiripan sifat kimia namun peran biologis dan toksisitasnya sangat berbeda. Berdasarkan hasil *Critical Book Review* (CBR), unsur Zn dikenal sebagai logam esensial bagi organisme hidup, berperan sebagai kofaktor berbagai enzim dan penting dalam proses metabolisme seluler (Aryani et al., 2025). Namun, akumulasi Zn dalam jumlah berlebih akibat aktivitas antropogenik seperti industri baja, pertambangan, dan limbah domestik dapat mengganggu keseimbangan ekosistem tanah dan perairan (Rahmadani & Diniariwisan, 2023). Sebaliknya, Cd merupakan logam berat yang bersifat sangat toksik, non-esensial, dan mudah menggantikan Zn dalam sistem biologis karena kesamaan konfigurasi elektron  $[Kr]4d^{10}5s^2$ . Akibatnya, Cd dapat terakumulasi dalam jaringan organisme dan menyebabkan gangguan fisiologis seperti kerusakan ginjal, hati, dan sistem saraf (Dwi Hariyoto, 2021)

Dalam konteks lingkungan, Cd dan Zn banyak ditemukan pada limbah cair industri seperti elektroplating, baterai, cat, pupuk fosfat, serta limbah hasil pembakaran batubara. Kedua logam ini dapat memasuki sistem perairan melalui buangan industri dan mengalami bioakumulasi di tubuh biota akuatik, meningkatkan risiko toksisitas kronis pada manusia melalui rantai makanan (Nugraha et al., 2023). Kandungan Cd dan Zn di sedimen Estuari Baturusa, misalnya, menunjukkan tingkat kontaminasi sedang hingga tinggi, terutama Cd yang didominasi oleh fraksi non-residual, menandakan sumber antropogenik utama berasal dari aktivitas tambang timah. Fakta ini memperlihatkan bahwa pencemaran logam berat di Indonesia bukan hanya masalah lokal,

tetapi juga menjadi isu nasional yang berkaitan dengan pengelolaan limbah industri dan perlindungan ekosistem perairan.

Sejalan dengan hasil *Critical Journal Review* (CJR), berbagai penelitian terkini telah mengembangkan metode pengolahan limbah cair yang mengandung Cd(II) dan Zn(II) melalui pendekatan adsorpsi. Adsorpsi dinilai lebih efisien, ekonomis, dan ramah lingkungan dibandingkan metode konvensional seperti presipitasi kimia, pertukaran ion, atau elektrokimia (Maliki et al., 2023). Berbagai material adsorben alternatif telah diuji, misalnya:

1. SCOPY (Symbiotic Culture of Bacteria and Yeast) hasil fermentasi kombucha, yang terbukti mampu menurunkan kadar Cd(II) hingga 87% berkat keberadaan gugus hidroksil (-OH) pada permukaannya (Wibisono et al., n.d.):
2. Serbuk gergaji kayu jati (*Tectona grandis*) teraktivasi EDTA, yang menunjukkan mekanisme adsorpsi kimisorpsi dengan model kinetika orde dua semu terhadap ion Zn (Sulistiyawati et al., 2024):
3. Fly ash teraktivasi NaOH dan  $Na_2SiO_3$ , yang mampu mengadsorpsi Zn(II) dengan efisiensi hingga 92,5%; dan
4. Limbah produksi besi-magnesium, yang secara signifikan menurunkan kadar  $Cd^{2+}$  dan  $Zn^{2+}$  masing-masing lebih dari 99% melalui mekanisme adsorpsi dan ko-presipitasi.

Hasil-hasil tersebut memperlihatkan adanya peluang besar dalam pemanfaatan limbah biomassa maupun limbah industri sebagai material adsorben berkelanjutan. Selain rendah biaya, material ini mendukung konsep ekonomi sirkular dengan memanfaatkan residu yang sebelumnya tidak bernilai menjadi agen penjernih air yang efektif.

Namun demikian, efisiensi penyerapan logam berat sangat dipengaruhi oleh sifat fisis dan kimia adsorben (ukuran pori, luas permukaan, gugus fungsi aktif), kondisi lingkungan (pH, suhu, waktu kontak), serta konsentrasi ion logam dalam larutan. Oleh karena itu, masih diperlukan kajian komparatif yang sistematis untuk menentukan adsorben paling efektif di antara biomassa (seperti SCOBY) dan limbah anorganik (seperti fly ash atau limbah Fe–Mg) dalam menyerap Cd(II) dan Zn(II) dari air limbah.

Rekayasa ide ini disusun berdasarkan hasil analisis literatur dari *Critical Book Review* dan *Critical Journal Review* kelompok, dengan fokus pada perbandingan karakteristik, toksisitas, serta teknologi penanganan logam berat Cd dan Zn. Kajian ini diharapkan dapat menjadi dasar pengembangan penelitian eksperimental untuk menentukan material adsorben ramah lingkungan dengan kinerja optimal dalam pengolahan limbah cair industri, sejalan dengan prinsip *Sustainable Development Goals* (SDGs) poin 6 (air bersih dan sanitasi layak) serta poin 12 (konsumsi dan produksi yang bertanggung jawab).

## METODE

### Teknologi Pengolahan Limbah Logam Berat

Metode konvensional yang digunakan untuk mengurangi logam berat di antaranya presipitasi kimia, koagulasi, pertukaran ion, filtrasi membran, dan elektrokimia. Namun, metode tersebut memiliki keterbatasan: biaya tinggi, pembentukan lumpur sekunder, dan efisiensi yang rendah pada konsentrasi logam rendah.

Sebagai alternatif, pendekatan adsorpsi menjadi metode yang populer karena sederhana, efektif, dan ramah lingkungan. Adsorpsi memanfaatkan kemampuan material padat untuk menyerap ion logam dari larutan melalui interaksi fisik (van der Waals, gaya

elektrostatik) atau kimia (ikatan kovalen dan kompleks koordinasi). Proses ini sangat dipengaruhi oleh sifat permukaan adsorben, luas area spesifik, ukuran pori, pH, serta afinitas ion logam terhadap gugus fungsional adsorben.

### Mekanisme Adsorpsi Ion Cd(II) dan Zn(II)

Adsorpsi Cd(II) dan Zn(II) umumnya melibatkan interaksi antara ion logam bermuatan positif dengan gugus fungsional bermuatan negatif atau netral pada permukaan adsorben. Mekanisme yang paling umum terjadi adalah:

1. Pertukaran ion, di mana ion  $\text{Cd}^{2+}$  atau  $\text{Zn}^{2+}$  menggantikan kation lain pada situs aktif adsorben.
2. Kompleksasi, pembentukan ikatan koordinasi antara ion logam dengan gugus fungsi seperti  $-\text{OH}$ ,  $-\text{COOH}$ ,  $-\text{NH}_2$ , atau  $-\text{SH}$ .
3. Presipitasi permukaan, terbentuknya endapan logam hidroksida pada permukaan adsorben saat pH meningkat.
4. Mekanisme ganda (adsorpsi + kopresipitasi), sering terjadi pada material anorganik seperti fly ash dan limbah besi-magnesium.

Guo et al. (2024) melaporkan bahwa fly ash termodifikasi nano-FeS mampu mengadsorpsi  $\text{Zn}^{2+}$  dengan efisiensi >95%, melalui kombinasi mekanisme adsorpsi permukaan dan presipitasi. Sementara itu, penelitian menunjukkan bahwa limbah besi-magnesium dapat menghilangkan  $\text{Cd}^{2+}$  hingga 99,5% karena adanya situs aktif  $\text{Mg-O}$  dan  $\text{Fe-O}$  yang membentuk ikatan kuat dengan kation logam berat.

Untuk biomassa seperti SCOBY dan serbuk kayu, proses adsorpsi lebih dominan bersifat kimisorpsi melalui gugus hidroksil dan karboksilat. Anfaqa & Wibisono menemukan bahwa gugus  $-\text{OH}$  pada permukaan SCOBY berperan penting dalam pengikatan  $\text{Cd}^{2+}$ , sedangkan Sulistyawati et al. (2024) menjelaskan bahwa serbuk gergaji teraktivasi EDTA menunjukkan afinitas

tinggi terhadap  $Zn^{2+}$  karena terbentuknya kompleks stabil  $Zn-EDTA$  pada permukaan adsorben.

### Model Isoterm dan Kinetika Adsorpsi

Untuk memahami proses adsorpsi secara kuantitatif, digunakan model isoterm dan kinetika adsorpsi. Dua model isoterm utama adalah Langmuir dan Freundlich.

1. Model Langmuir mengasumsikan bahwa adsorpsi terjadi pada permukaan homogen dan membentuk satu lapisan (monolayer).
2. Model Freundlich menggambarkan adsorpsi pada permukaan heterogen dengan kekuatan interaksi yang bervariasi.

Penelitian Wardana et al. (2023) menunjukkan bahwa adsorpsi  $Zn(II)$  pada fly ash memenuhi kedua model isoterm tersebut ( $R^2 \approx 1$ ), menandakan bahwa permukaannya bersifat campuran homogen dan heterogen. Sedangkan hasil dari Sulistyawati et al. (2024) menunjukkan bahwa kinetika adsorpsi  $Zn(II)$  mengikuti model pseudo-orde dua, menandakan keterlibatan ikatan kimia (kemisorpsi).

Kinetika adsorpsi umumnya digambarkan dengan dua model utama: pseudo-orde satu (fisik) dan pseudo-orde dua (kimia). Menurut Jabłońska et al. (2025), data kinetika yang mengikuti model pseudo-orde dua menunjukkan bahwa laju adsorpsi bergantung pada jumlah situs aktif dan interaksi kimia antara ion logam dengan adsorben.

### Arah Inovasi Rekayasa dalam Pengolahan Limbah $Cd(II)$ dan $Zn(II)$

Berdasarkan hasil *CJR* dan literatur terbaru, arah inovasi penelitian cenderung mengarah pada:

1. Pemanfaatan limbah biomassa seperti SCOBY dan serbuk kayu untuk adsorpsi logam berat dengan aktivasi kimia.
2. Pemanfaatan limbah industri seperti fly ash dan residu besi-magnesium

yang kaya oksida logam sebagai adsorben anorganik.

3. Pendekatan hibrid dengan mengombinasikan biosorpsi dan adsorpsi mineral untuk meningkatkan efisiensi serta mempermudah regenerasi adsorben.
4. Integrasi teknologi rendah emisi sesuai prinsip *green chemistry* dan *circular economy*.

Dari hasil integrasi CBR dan CJR, dapat disimpulkan bahwa penelitian lanjutan perlu diarahkan pada perbandingan eksperimental antar-adsorben dalam kondisi yang identik untuk menentukan material paling efisien, murah, dan berkelanjutan.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

### Solusi Kreatif

Permasalahan utama yang diangkat dari hasil CBR dan CJR adalah tingginya kadar logam berat Kadmium ( $Cd$ ) dan Seng ( $Zn$ ) pada limbah cair industri, seperti dari sektor elektroplating, batik, pupuk, dan pertambangan. Ion  $Cd^{2+}$  bersifat sangat toksik, bersifat bioakumulatif, dan sulit terdegradasi, sedangkan  $Zn^{2+}$  meski bersifat esensial, dalam kadar tinggi dapat menyebabkan gangguan fisiologis dan pencemaran ekosistem.

Solusi ini memadukan dua pendekatan yaitu biosorpsi dan adsorpsi anorganik untuk menciptakan sistem pengolahan limbah yang efisien, murah, dan berkelanjutan. Empat jenis adsorben yang diusulkan mewakili dua kategori tersebut:

1. SCOBY (Symbiotic Culture of Bacteria and Yeast) – biomassa organik dari fermentasi kombucha, kaya gugus hidroksil dan karboksilat yang mampu mengikat  $Cd^{2+}$ .
2. Serbuk kayu jati teraktivasi EDTA – memiliki gugus karboksilat ( $-COOH$ ) dan amina ( $-NH_2$ ) hasil kompleksasi dengan EDTA, efektif dalam mengikat  $Zn^{2+}$ .

3. Fly ash (abu terbang) termodifikasi NaOH–Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> – mengandung SiO<sub>2</sub> dan Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> yang memiliki sifat aktif terhadap ion logam.
4. Limbah besi–magnesium (Fe–Mg waste) – kaya situs oksida logam yang berpotensi tinggi untuk mengadsorpsi Cd<sup>2+</sup> dan Zn<sup>2+</sup> melalui mekanisme kompleksasi ionic.

Gagasan ini juga mendukung prinsip *Circular Economy* dan *Green Chemistry*, karena seluruh material yang digunakan berasal dari limbah pertanian atau sisa industri yang sebelumnya tidak termanfaatkan.

### Cara Kerja Gagasan

Konsep kerja dari gagasan ini adalah proses adsorpsi multi-adsorben, di mana ion logam berat dalam air limbah akan terikat pada permukaan material yang memiliki gugus aktif atau situs logam oksida. Prosesnya dijelaskan sebagai berikut:

#### Tahap Aktivasi Adsorben

1. Bahan biomassa (SCOBY dan serbuk kayu jati) diaktivasi secara kimia untuk memperluas pori dan meningkatkan gugus aktif.
2. Bahan anorganik (fly ash dan limbah Fe–Mg) diaktivasi menggunakan larutan basa agar terbentuk situs aktif Si–O<sup>–</sup>, Fe–O<sup>–</sup>, dan Mg–O<sup>–</sup> yang mudah berinteraksi dengan ion logam.

#### Tahap Adsorpsi Logam Berat

1. Air limbah mengandung ion Cd<sup>2+</sup> dan Zn<sup>2+</sup> dialirkan atau dicampur dengan adsorben dalam reaktor sederhana.
2. Ion logam akan berinteraksi dengan permukaan adsorben melalui:
3. Pertukaran ion (ion exchange): Cd<sup>2+</sup> atau Zn<sup>2+</sup> menggantikan kation H<sup>+</sup> atau Na<sup>+</sup> di permukaan adsorben.
4. Kompleksasi permukaan: pembentukan ikatan koordinasi antara ion logam dan gugus fungsional –OH, –COOH, atau –NH<sub>2</sub>.
5. Presipitasi mikro: pada adsorben anorganik, Cd(OH)<sub>2</sub> atau Zn(OH)<sub>2</sub>

dapat mengendap di permukaan pori.

### Tahap Regenerasi dan Pemanfaatan Kembali

Setelah proses adsorpsi selesai, adsorben dapat diregenerasi dengan pelarut asam encer (misalnya HCl 0,1 M) untuk melepaskan logam yang terikat. Adsorben kemudian dikeringkan kembali dan digunakan ulang. Pendekatan ini membuat sistem pengolahan lebih ekonomis dan berkelanjutan, sejalan dengan konsep *zero waste remediation*.

### Keluaran Proses (Outcome):

1. Air hasil olahan memiliki kadar Cd dan Zn di bawah ambang batas WHO (<0,01 mg/L untuk Cd dan <5 mg/L untuk Zn).
2. Adsorben bekas dapat digunakan kembali hingga beberapa siklus tanpa kehilangan kapasitas signifikan.

### Langkah Pelaksanaan

#### Tahap Persiapan

#### Identifikasi Masalah

Berdasarkan hasil CBR dan CJR, limbah cair industri di Indonesia masih banyak mengandung Cd<sup>2+</sup> dan Zn<sup>2+</sup> yang melebihi baku mutu.

#### Pengumpulan Bahan Lokal

1. SCOBY dari produsen kombucha lokal
2. Serbuk kayu jati dari limbah meubel
3. Fly ash dari PLTU
4. Limbah Fe–Mg dari sisa industri logam

#### Aktivasi dan Karakterisasi

1. Aktivasi kimia sesuai bahan (NaOH, Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>, atau EDTA).
2. Uji karakteristik awal adsorben (pH, luas permukaan, dan gugus fungsional dengan FTIR atau SEM).

### Tahap Eksperimen dan Simulasi

#### Pembuatan Larutan Uji Logam

1. Kadmium nitrat dan seng sulfat disiapkan dalam konsentrasi 10–100 ppm.

#### Proses Adsorpsi

1. Variasikan jenis adsorben, pH, waktu kontak, dan massa adsorben.

- Gunakan shaker pada suhu ruang (25°C).
- Pisahkan filtrat dan ukur kadar Cd dan Zn menggunakan AAS.

#### Analisis Efisiensi dan Kinetika

- Hitung efisiensi adsorpsi dan kapasitas penyerapan.
- Analisis kesesuaian model isoterm Langmuir/Freundlich dan kinetika pseudo-orde dua.

#### Tahap Evaluasi dan Implementasi

- Evaluasi Efisiensi  
Bandingkan keempat adsorben berdasarkan efisiensi dan kemudahan regenerasi.
- Analisis Keekonomian  
Tinjau biaya bahan, proses, dan potensi penerapan pada skala UMKM atau industri.
- Desain Prototipe Sistem Sederhana  
Rancang model filter multi-lapis dengan urutan:  
Lapisan 1: SCOPY → Lapisan 2: Serbuk Kayu-EDTA → Lapisan 3: Fly Ash → Lapisan 4: Limbah Fe-Mg.  
Sistem ini bekerja seperti kolom filtrasi bertahap untuk memastikan air limbah yang keluar telah memenuhi baku mutu.
- Evaluasi Lingkungan dan Keberlanjutan  
Pastikan seluruh material yang digunakan dapat dimanfaatkan ulang, tidak menimbulkan residu berbahaya baru, dan mendukung prinsip *green chemistry* serta *SDGs 2045*.

#### Nilai Inovatif dan Dampak

- Inovatif: Gagasan ini menggabungkan biomassa (SCOPY dan kayu) serta limbah industri (fly ash dan Fe-Mg) menjadi sistem hibrid multi-adsorben pertama dalam konteks pengolahan logam Cd dan Zn.
- Ekonomis: Semua bahan mudah didapat secara lokal dan tidak memerlukan reagen mahal.
- Lingkungan: Mengubah limbah menjadi material berguna yang

mengurangi pencemaran.

- Ilmiah: Didasarkan pada teori kimia logam, mekanisme adsorpsi, dan hasil riset terkini yang valid secara ilmiah.

#### SIMPULAN

Berdasarkan hasil telaah dari *Critical Book Review (CBR)* dan *Critical Journal Review (CJR)* yang telah dikaji, serta pengembangan ide kreatif berbasis kimia lingkungan, dapat disimpulkan bahwa:

- Masalah utama yang diangkat adalah tingginya kadar logam berat Cd(II) dan Zn(II) yang bersifat toksik dan mencemari air, tanah, serta organisme hidup.
- Solusi yang ditawarkan berupa inovasi sistem adsorpsi multi-adsorben ramah lingkungan yang memanfaatkan limbah biomassa (SCOPY dan serbuk kayu-EDTA) serta limbah anorganik industri (fly ash dan limbah Fe-Mg).
- Cara kerja sistem mengandalkan mekanisme pertukaran ion dan kompleksasi permukaan untuk mengikat ion logam berat hingga mencapai efisiensi optimal.
- Langkah pelaksanaan terdiri atas persiapan adsorben, aktivasi kimia, proses adsorpsi, analisis efisiensi, dan validasi hasil secara eksperimental.
- Gagasan ini bersifat inovatif, aplikatif, dan berkelanjutan, karena: memanfaatkan limbah lokal menjadi material fungsional bernilai tinggi, mendukung prinsip *green chemistry* dan *circular economy*, relevan dengan tujuan SDGs 6 (*Clean Water and Sanitation*) dan SDGs 12 (*Responsible Consumption and Production*).

Dengan demikian, Rekayasa Ide Kimia Logam ini diharapkan dapat menjadi dasar pengembangan penelitian lanjutan dalam pembuatan prototipe filter

logam berat berbasis bahan alam dan limbah industri yang ekonomis, efisien, dan ramah lingkungan.

#### DAFTAR PUSTAKA

- Aryani, A. D., Rahmiati, R., Handarini, K., & Hariyani, N. (2025). Analisis Kadar Logam Berat Timbal (Pb) dan Cadmium (Cd) Pada Ikan Demersal Di Tempat Pelelangan Ikan Kabupaten Lamongan. *Jurnal Agrosains*, 10(1), 1–18.
- Dwi Hariyoto, F. (2021). AKUMULASI LOGAM BERAT TIMBAL (Pb), KADMIUM (Cd), SENG (Zn) DAN MERKURI (Hg) DI PERAIRAN BESERTA DAMPAKNYA BAGI PRODUK PERIKANAN DAN KESEHATAN MANUSIA. *POJOK ILMIAH*, 18(2), 39–46.
- Guo, X., Fu, H., Gao, X., Zhao, Z., & Hu, Z. (2024). Study on the adsorption of Zn(II) and Cu(II) in acid mine drainage by fly ash loaded nano-FeS. *Scientific Reports*, 14(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-024-58815-z>
- Maliki, S., Wardana, S. K., Sulastriani, S., Alamsyah, M., Shafira, N., & Lestari, S. D. (2023). PENGURANGAN KANDUNGAN LIMBAH Zn MENGGUNAKAN METODE ADSORPSI DENGAN MENGGUNAKAN FLY ASH. *Jurnal Teknologi Kimia Unimal*, 12(2), 263–273.
- <https://doi.org/10.29103/jtku.v12i2.13573>
- Nugraha, M. A., Akhrianti, I., Pratiwi, F. D., & Priyambada, A. (2023). Geokimia dan Asesmen Pencemaran Logam Berat Cd, Cu dan Zn pada Sedimen Permukaan Estuari Baturusa, Bangka. *Jurnal Kelautan Tropis*, 26(1), 35–48. <https://doi.org/10.14710/jkt.v26i1.16467>
- RAHMADANI, T. B. C., & DINIARIWISAN, D. (2023). PENCEMARAN LOGAM BERAT JENIS KADMIUM (Cd) DI PERAIRAN DAN DAMPAK TERHADAP IKAN (REVIEW). *Jurnal Ganec Swara*, 17(2), 440–445. <http://journal.unmasmataram.ac.id/index.php/GARA>
- Sulistiyawati, E., Citra, S., Firdaus, R., Safitri, M., Sri, D., & Murni, W. (2024). Kinetika Adsorpsi Ion Zn Menggunakan Serbuk Gergaji Kayu Jati (*Tectona grandis*) Teraktivasi EDTA dalam Air Limbah Batik Kayu. *Jurnal Ilmiah Teknik Kimia*, 21(2), 2460–8203.
- Wibisono, A. C., Pembimbing, G., Fatmi, :, Hastani, S., Pd, S., Alina, A., & Si, M. (2023). POTENSI SCOBY SEBAGAI ALTERNATIF BIO-ADSORBEN LOGAM BERAT KADMIUM PADA LIMBAH CAIR DALAM MEWUJUDKAN SDGs 2045. *Journal For Energetic Youngsters*, 1(2), 21–31.