



Seminar Nasional Ilmu Teknik dan Aplikasi Industri (SINTA)

Homepage: sinta.eng.unila.ac.id



Studi Potensi Mikroalga Termodifikasi Sebagai Biosorben Ramah Lingkungan Untuk Bioremediasi Logam Berat

Nina Juliana Roberta Turnip^{1*}, Shinta Mariboto Silvia Sinaga², Lestari³, Fernando Aratua Sinaga⁴

^{*1,2,3,4}Program Studi Teknik Kimia, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sumatera, Lampung Selatan, Lampung, Indonesia

INFORMASI ARTIKEL

Riwayat artikel:

Diterima 29/10/2025

Direvisi 10/11/2025

Kata kunci:

Bioremediasi

Biosorpsi

Logam Berat

Mikroalga Termodifikasi

Modifikasi Kimia

ABSTRAK

Pencemaran logam berat seperti timbal (Pb), kadmium (Cd), dan merkuri (Hg) dari limbah industri tekstil, pertambangan, dan oleokimia menjadi ancaman serius bagi kesehatan dan lingkungan. Mikroalga berpotensi besar sebagai biosorben alami untuk bioremediasi, namun efisiensinya terbatas akibat rendahnya jumlah gugus aktif pada dinding sel. Kajian ini meninjau potensi mikroalga termodifikasi melalui studi pustaka dari berbagai penelitian nasional dan internasional. Modifikasi kimia seperti aktivasi asam, basa, dan esterifikasi terbukti meningkatkan densitas gugus fungsional (karboksil, hidroksil, amina, dan sulfat), sehingga memperkuat interaksi dengan ion logam. *Chlorella vulgaris* menunjukkan efisiensi penyerapan Pb(II) lebih dari 90% pada pH netral, sedangkan *Spirulina platensis* hasil esterifikasi mampu meningkatkan kapasitas adsorpsi Cr(VI) hingga 40%. Teknik imobilisasi dan komposit magnetik juga terbukti memperpanjang umur pakai biosorben hingga lima siklus regenerasi tanpa penurunan signifikan. Meskipun masih menghadapi tantangan teknis dan ekonomis, hasil studi menunjukkan bahwa mikroalga termodifikasi berpotensi sebagai solusi bioremediasi yang efisien, murah, dan berkelanjutan untuk pengelolaan limbah logam berat di Indonesia.

1. Pendahuluan

Aktivitas industri pada sektor tekstil, pertambangan, dan oleokimia telah menyebabkan peningkatan pencemaran logam berat, terutama timbal (Pb), kadmium (Cd), dan merkuri (Hg) pada tanah dan perairan. Logam-logam tersebut bersifat toksik meskipun pada konsentrasi rendah, sehingga dapat mengganggu kesehatan manusia serta keseimbangan ekosistem (Wang et al., 2023). Kasus pencemaran Sungai Citarum di Jawa Barat menjadi bukti nyata, di mana konsentrasi timbal tercatat melebihi ambang batas aman hingga tiga kali lipat (*Deadly Waters. Citarum: Indonesian River Keeps Textile Industry's Dirty Secrets*, 2020). Kondisi ini menegaskan perlunya pengembangan

metode pengolahan limbah yang tidak hanya efektif, tetapi juga ekonomis dan ramah lingkungan.

Metode konvensional seperti presipitasi kimia, filtrasi membran, serta pertukaran ion telah banyak diterapkan untuk menurunkan kadar logam berat. Namun, pendekatan tersebut umumnya memerlukan biaya operasional tinggi, konsumsi energi besar, dan berpotensi menghasilkan residu sekunder yang turut mencemari lingkungan. Oleh karena itu, dibutuhkan strategi alternatif yang efisien, berkelanjutan, dan tidak menimbulkan dampak lingkungan tambahan.

Bioremediasi dengan memanfaatkan mikroorganisme menjadi salah satu pendekatan yang menjanjikan untuk mengatasi permasalahan ini. Mikroalga sebagai organisme fotosintetik mikroskopis,

* Penulis korespondensi.

E-mail: nina.turnip@tk.itera.ac.id

memiliki keunggulan berupa kemampuan tumbuh cepat, biaya kultivasi rendah, serta dinding sel yang mengandung berbagai gugus fungsi aktif seperti karboksil, hidroksil, dan amina (Irianto et al., 2022). Gugus-gugus tersebut berperan penting dalam mengikat ion logam melalui mekanisme biosorpsi, sehingga dapat menurunkan konsentrasi logam berat secara signifikan (Ratnawati et al., 2010). Dengan karakteristik tersebut, mikroalga dinilai memiliki potensi tinggi sebagai biosorben alami dalam upaya bioremediasi.

Namun, efisiensi biosorpsi mikroalga alami masih terbatas karena kapasitas penyerapan yang cepat jenuh serta kestabilan yang sensitif terhadap kondisi lingkungan. Untuk mengatasi hal ini, berbagai penelitian mengusulkan modifikasi mikroalga melalui perlakuan kimia atau fisik guna meningkatkan jumlah dan kerapatan gugus aktif serta memperluas luas permukaan dinding sel. Upaya ini diharapkan dapat meningkatkan kemampuan mikroalga sebagai biosorben yang lebih efektif dan berkelanjutan dalam bioremediasi logam berat.

Penelitian ini bertujuan untuk meninjau potensi mikroalga termodifikasi sebagai biosorben ramah lingkungan dalam proses bioremediasi logam berat. Kajian dilakukan melalui analisis literatur terhadap berbagai metode modifikasi kimia yang dapat meningkatkan efisiensi dan stabilitas biosorpsi mikroalga. Hasil kajian diharapkan dapat memberikan dasar ilmiah bagi pengembangan teknologi pengolahan limbah logam berat yang efisien, ekonomis, dan mendukung upaya pelestarian lingkungan.

2. Metodologi

2.1. Pengumpulan Data dan Informasi

Pengambilan data dilakukan melalui studi literatur dengan menelaah jurnal ilmiah nasional dan internasional bereputasi, *prosiding*, serta buku teks relevan yang diterbitkan dalam lima tahun terakhir agar kajian tetap mutakhir. Pencarian literatur menggunakan *database* seperti *ScienceDirect*, *Springer*, *Wiley*, *MDPI*, dan *PubMed* dengan kata kunci *microalgae*, *biosorption*, *modified microalgae*, *heavy metals removal*, dan *bioremediation*. Prosesnya meliputi penentuan topik dan ruang lingkup, penyusunan kata kunci, pencarian dan seleksi artikel sesuai kriteria tahun terbit, kemudian ekstraksi informasi terkait jenis mikroalga, metode modifikasi, kapasitas adsorpsi, kondisi operasi, serta kelebihan dan kelemahan tiap pendekatan. Data yang diperoleh dianalisis secara komparatif untuk mengidentifikasi pola, tren penelitian, efektivitas mikroalga termodifikasi dibandingkan biomassa alami, serta potensi pengembangannya sebagai biosorben ramah lingkungan. Hasil analisis

disusun secara sistematis untuk menghasilkan tinjauan yang jelas, tepat, dan komprehensif.

2.2. Pengolahan Data dan Informasi

Berikut merupakan hasil pengolahan data dan informasi yang diperoleh dari berbagai jurnal ilmiah nasional maupun internasional terkait potensi mikroalga termodifikasi sebagai biosorben ramah lingkungan untuk bioremediasi logam berat. Kajian ini merangkum perkembangan penelitian terkini, meliputi jenis mikroalga yang digunakan, metode modifikasi yang diterapkan, kapasitas biosorpsi terhadap berbagai logam berat, serta kondisi operasi optimum yang dilaporkan. Informasi tersebut diolah untuk menggambarkan tren, efektivitas, dan keunggulan pendekatan modifikasi dibandingkan biomassa alami dalam meningkatkan kinerja biosorpsi. Rangkuman hasil analisis dan perbandingan dari berbagai sumber tersebut disajikan secara sistematis pada **Tabel 1** sebagai bentuk *state of the art* penelitian di bidang ini.

Tabel 1. Spesies Mikroalga dan Hasil Utama

Spesies Mikroalga	Jenis Modifikasi	Logam Target	Hasil atau Kapasitas Utama	Ref.
<i>Chlorella vulgaris</i>	Immobilisasi dalam alginat	Pb ²⁺ , Cd ²⁺ , Hg ²⁺	Peningkatan stabilitas kemudahan pemisahan, kapasitas dan sorpsi meningkat signifikan.	(Hazmi et al., 2025)
<i>Chlorella vulgaris</i>	Nanokomposit magnetik (Fe ₃ O ₄)	Cr(VI), Cu ²⁺	Sorpsi tinggi dan mudah dipisahkan dengan magnet; efisiensi >90%.	(Mulovhe et al., 2025)
<i>Chlorella pyrenoidosa</i>	Karbonisasi ringan (biochar)	Pb ²⁺	Kapasitas sorpsi meningkat akibat luas permukaan dan porositas lebih besar.	(Cui et al., 2019)
<i>Chlorella sp.</i>	Modifikasi kimia dengan polietilenim (PEI)	Cu ²⁺ , Zn ²⁺	Afinitas tinggi terhadap kation, kapasitas sorpsi meningkat	(Cui et al., n.d.)

<i>Chlorella vulgaris</i>	Nanohibrid Graphene oxide	Pb ²⁺ , Cd ²⁺	2-3 kali lipat. Kapasitas sorpsi meningkat signifikan dan GO memberi tambahan gugus aktif.	(Xin et al., 2018)
<i>Scenedesmus</i>	Immobilisasi kitosan dan beads polimer	Ni ²⁺ , Pb ²⁺	Efisiensi penyisihan meningkat, mudah diaplikasikan dalam kolom berkelanjutan.	(Kartika et al., 2023)

2.3. Analisis

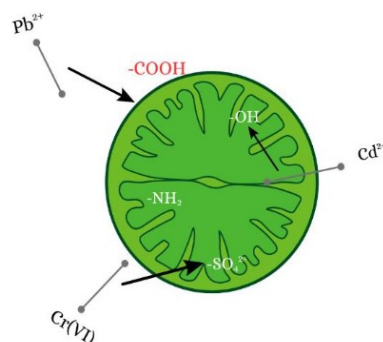
Analisis ini mencakup karakteristik penelitian seperti jenis mikroalga yang digunakan (misalnya *Chlorella*, *Scenedesmus*, *Spirulina*), metode modifikasi (aktivasi kimia, perlakuan fisik, imobilisasi, atau pembuatan nanokomposit), serta jenis logam berat yang menjadi target biosorpsi (Pb, Cd, Cu, Cr, Zn, Hg). Data juga dianalisis untuk menentukan kondisi operasi optimum, seperti pH, waktu kontak, dosis biosorben, dan kapasitas adsorpsi. Analisis ini menyoroti keunggulan biosorben berbasis mikroalga yang ramah lingkungan, melimpah, dan berbiaya rendah, serta kelemahannya seperti keterbatasan regenerasi, kestabilan mekanik, dan efisiensi pada limbah aktual. Melalui analisis ini, teridentifikasi tren penelitian terkini seperti penerapan nanoteknologi dan material komposit untuk meningkatkan performa biosorpsi serta peluang pengembangannya menuju aplikasi skala industri berkelanjutan.

3. Hasil dan pembahasan

3.1 Mekanisme Modifikasi Kimia pada Mikroalga

Dinding sel mikroalga secara alami mengandung gugus fungsional seperti karboksil (-COOH), hidroksil (-OH), amina (-NH₂), dan sulfat (-SO₄²⁻) yang berperan dalam pengikatan ion logam melalui mekanisme pertukaran ion, kompleksasi, interaksi elektrostatik, dan pertukaran ligan (Lin et al., 2020). Namun, keterbatasan jumlah dan aksesibilitas gugus aktif pada biomassa tanpa modifikasi menyebabkan kapasitas biosorpsi rendah pada limbah cair kompleks. Untuk itu, dilakukan modifikasi kimia guna membuka situs aktif dan menambah densitas gugus fungsional.

untuk sistem kolom, sedangkan *Chlorella* untuk sistem batch (Rehman et al., 2019).



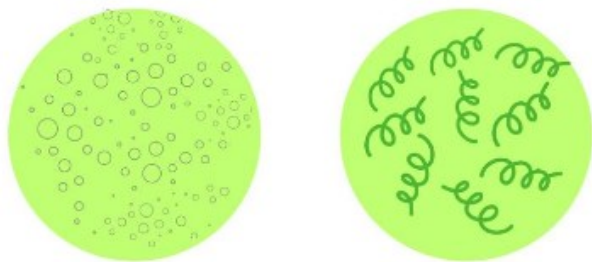
Gambar 1. Skema Mekanisme Biosorpsi Mikroalga (Lin et al., 2020)

Tiga metode umum modifikasi kimia meliputi aktivasi basa, aktivasi asam, dan esterifikasi (Leong & Chang, 2020; Lin et al., 2020; Nithya et al., 2019). Aktivasi basa dengan NaOH atau KOH menyebabkan hidrolisis parsial dinding sel sehingga gugus karboksil dan hidroksil lebih terekspos dan meningkatkan kemampuan mengikat Pb²⁺ dan Cd (Leong & Chang, 2020). Aktivasi asam (HCl atau H₂SO₄) menghilangkan ion pengganggu seperti Ca²⁺ dan Mg²⁺ serta meningkatkan polaritas permukaan, memperkuat interaksi dengan logam bermuatan positif (Ordóñez et al., 2023). Sementara itu, esterifikasi menambahkan gugus karbonil (C=O) yang meningkatkan kapasitas adsorpsi logam berat seperti Cr(VI) hingga 30–40%, sebagaimana dilaporkan pada *Spirulina platensis* (Nithya et al., 2019). Dengan demikian, modifikasi kimia efektif meningkatkan densitas dan selektivitas gugus aktif mikroalga terhadap ion logam (Leong & Chang, 2020; Lin et al., 2020; Nithya et al., 2019; Ordóñez et al., 2023).

3.2 Efisiensi Biosorpsi Setelah Modifikasi

Efisiensi biosorpsi mikroalga dipengaruhi oleh jenis mikroalga dan perlakuan modifikasi. *Chlorella vulgaris* mampu mengadsorpsi Pb(II) dengan efisiensi >90% pada pH netral tanpa modifikasi (Torres, 2020), sedangkan *Spirulina platensis* yang dimodifikasi melalui esterifikasi menunjukkan peningkatan kapasitas adsorpsi Cr(VI) hingga 30–40% (Nithya et al., 2019). Ini membuktikan bahwa modifikasi kimia dapat meningkatkan kinerja biosorben terhadap logam yang sulit terikat secara alami.

Perbedaan efisiensi berkaitan dengan struktur dan morfologi sel. *Chlorella* berdinding tebal kaya gugus karboksil dan hidroksil, efektif mengikat logam kationik seperti Pb²⁺ dan Cd²⁺ (Mahlangu et al., 2024), sedangkan *Spirulina* berbentuk filamen spiral dengan gugus amina dan sulfat yang lebih afinitas terhadap logam anionik seperti Cr(VI) (Lin et al., 2020). *Spirulina* lebih cocok



a. Morfologi *Chlorella vulgaris* b. Morfologi *Spirulina platensis*

Gambar 2. Morfologi Mikroalga (Rehman et al., 2019)

Pemilihan mikroalga perlu mempertimbangkan gugus fungsional, morfologi, dan sistem operasional. Imobilisasi dalam polimer seperti alginat atau kitosan juga meningkatkan stabilitas dan umur pakai hingga lima kali siklus tanpa kehilangan kapasitas signifikan (Pradana et al., 2023). Dengan demikian, kombinasi pemilihan jenis, modifikasi kimia, dan imobilisasi menjadikan mikroalga sebagai biosorben efisien dan berpotensi diterapkan secara berkelanjutan di industri.

3.3 Hasil Akhir dan *Reusability* Biosorben Mikroalga

Daya guna jangka panjang menjadi faktor penting dalam menilai kelayakan biosorben mikroalga. Biomassa tanpa perlakuan umumnya hanya efektif sekali pakai karena gugus aktif cepat jenuh, sehingga kapasitas adsorpsi menurun drastis dan menimbulkan limbah baru (Lu et al., 2021). Oleh sebab itu, regenerasi dan penggunaan ulang menjadi aspek penting.

Biosorben mikroalga yang dimodifikasi atau diimobilisasi dapat digunakan kembali 3–5 kali setelah regenerasi dengan larutan HCl atau NaOH. *Chlorella vulgaris* mampu mempertahankan >80% kapasitas hingga siklus keempat (Ordóñez et al., 2023), sedangkan *Spirulina platensis* termodifikasi hanya kehilangan 10–15% kapasitas Cr(VI) setelah lima kali pemakaian (Nithya et al., 2019). Komposit magnetik berbasis Fe₃O₄ juga memungkinkan pemisahan cepat menggunakan medan magnet dan menjaga kapasitas hampir setara kondisi awal hingga lima siklus (Lin et al., 2020).

Pendekatan ekonomi sirkular turut diterapkan dengan memanfaatkan residu biomassa, seperti *Chlorella* pasca-ekstraksi lipid yang masih efektif sebagai biosorben logam berat (Ubando et al., 2021). Dengan demikian, keberhasilan biosorpsi mikroalga ditentukan tidak hanya oleh kapasitas serapan, tetapi juga oleh kemampuan regenerasi, reusabilitas, dan pemanfaatan residu, menjadikannya teknologi bioremediasi yang efisien dan berkelanjutan.

3.4 Arah Teknologi Bioremediasi Menggunakan Biosorben Mikroalga

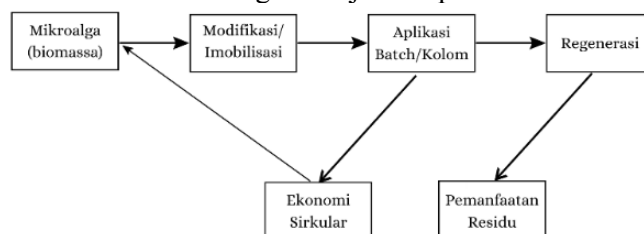
Mikroalga termodifikasi memiliki keunggulan besar untuk bioremediasi logam berat karena bersifat murah,

dapat diperbarui, ramah lingkungan, dan tumbuh cepat. Residu biomassa pasca-ekstraksi lipid juga dapat dimanfaatkan kembali sebagai biosorben, mendukung konsep ekonomi sirkular dengan mengurangi limbah dan biaya operasional dibandingkan metode fisikokimia (Mahlungu et al., 2024; Ubando et al., 2021).

Berbagai strategi rekayasa, seperti *pre-treatment* kimia/fisik, imobilisasi dalam polimer (alginat, kitosan), serta pembuatan komposit bermagnet, terbukti meningkatkan kapasitas adsorpsi, selektivitas logam, serta kemudahan pemanenan dan regenerasi biosorben. Pendekatan ini berpotensi diterapkan pada sistem *batch* maupun kolom berskala besar (Leong & Chang, 2020; Lin et al., 2020; Ordóñez et al., 2023).

Namun, penerapan skala industri masih menghadapi tantangan. Efisiensi biosorpsi bervariasi antar spesies mikroalga dan dapat menurun akibat kondisi limbah kompleks seperti keberadaan ion pesaing, DOM, atau fluktuasi pH (Lu et al., 2021; Mahlungu et al., 2024). Selain itu, dibutuhkan metode regenerasi yang efektif tanpa menghasilkan residu berbahaya, serta perhatian pada kestabilan biosorben, keamanan mikroalga hasil rekayasa genetik, dan desain reaktor yang sesuai (Ubando et al., 2021).

Dengan demikian, meskipun hasil laboratorium menunjukkan potensi tinggi, penerapan bioremediasi mikroalga pada skala industri masih memerlukan optimasi teknis, ekonomis, dan regulasi agar dapat diimplementasikan secara berkelanjutan (Leong & Chang, 2020; Lin et al., 2020). Skema arah teknologi bioremediasi mikroalga ditunjukkan pada **Gambar 3**.



Gambar 3. Skema Arah Teknologi Bioremediasi Mikroalga (Ordóñez et al., 2023)

4. Kesimpulan

Mikroalga berpotensi besar sebagai biosorben ramah lingkungan untuk bioremediasi logam berat karena dinding selnya mengandung gugus fungsional seperti karboksil, hidroksil, amina, dan sulfat yang mampu mengikat ion logam. Namun, biomassa alami memiliki keterbatasan dalam efisiensi dan kestabilan penggunaan berulang. Modifikasi kimia, seperti aktivasi basa, asam, atau esterifikasi, dapat meningkatkan kapasitas biosorpsi dengan menambah jumlah gugus aktif pada permukaan sel. Selain itu, teknik imobilisasi menggunakan polimer atau komposit magnetik mempermudah pemisahan dan memungkinkan penggunaan berulang. Berbagai penelitian

menunjukkan bahwa mikroalga termodifikasi mampu mencapai efisiensi penyerapan logam lebih dari 90% dan dapat digunakan hingga lima kali dapat menjadikannya alternatif biosorben yang efektif, ekonomis, dan berkelanjutan.

Daftar Pustaka

- Cui, Y., He, H., & Atkinson, J. D. (n.d.). *Electronic Supplementary Information (ESI) Iron/Carbon Composites for Cr(VI) Removal Prepared from Harmful Algal Bloom Biomass via Metal Bioaccumulation or Biosorption*.
- Cui, Y., He, H., & Atkinson, J. D. (2019). Iron/Carbon Composites for Cr(VI) Removal Prepared from Harmful Algal Bloom Biomass via Metal Bioaccumulation or Biosorption. *ACS Sustainable Chemistry and Engineering*, 7(1), 1229–1288. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.8b04921>
- Deadly Waters. Citarum: Indonesian river keeps textile industry's dirty secrets*. (2020, February 2). Water-Alternatives. <https://www.water-alternatives.org/index.php/cwd/item/103-citarum2#:~:text=that%20the%20textile%20industry%20uses,Despite%20their%20determination%2C%20th>
- Hazmi, N. F., Hariani, N., & Arif, M. F. (2025). Evaluation of the Capability of Immobilized *Chlorella vulgaris* (Beijerinck, 1890) in Alginate Bead Matrix as a Bioadsorbent for Heavy Metal Zinc (Zn). *BioLink: Jurnal Biologi Lingkungan, Industri, Kesehatan*, 12(1), 46–54. <https://doi.org/10.31289/biolink.v12i1.14615>
- Irianto, C. N. D., Yulianti, L. I. M., & Sidharta, B. B. R. (2022). Mikroalga *Chlorella* sp. Sebagai Bioremediator Logam Berat. *Bioeksperimen*, 8 No.1.
- Kartika, R., Ritonga, A. H., Sulastri, L., Nurnila, S., Irawan, D., & Simanjuntak, P. (2023). Biosorption of Hexavalent Chromium Cr(VI) using Microalgae *Scenedesmus* sp as Environmental Bioindicator. *International Journal of Technology*, 14(4), 791–799. <https://doi.org/10.14716/ijtech.v14i4.5188>
- Leong, Y. K., & Chang, J. S. (2020). Bioremediation of heavy metals using microalgae: Recent advances and mechanisms. In *Bioresource Technology* (Vol. 303). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.122886>
- Lin, Z., Li, J., Luan, Y., & Dai, W. (2020). Application of algae for heavy metal adsorption: A 20-year meta-analysis. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 190. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2019.110089>
- Lu, W., Xu, Y., Liang, C., Musah, B. I., & Peng, L. (2021). Simultaneous biosorption of arsenic and cadmium onto chemically modified *Chlorella vulgaris* and *Spirulina platensis*. *Water (Switzerland)*, 13(18). <https://doi.org/10.3390/w13182498>
- Mahlangu, D., Mphahlele, K., De Paola, F., & Mthombeni, N. H. (2024). Microalgae-Mediated Biosorption for Effective Heavy Metals Removal from Wastewater: A Review. In *Water (Switzerland)* (Vol. 16, Issue 5). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). <https://doi.org/10.3390/w16050718>
- Mulovhedzi, R., Yokwana, K., Ajiboye, T. O., Ogunlaja, A. S., & Mhlanga, S. D. (2025). A novel structured graphene oxide@microalgae nanohybrids as adsorbents for removal of Cr(VI) ions in aqueous solutions. *Adsorption*, 31(4). <https://doi.org/10.1007/s10450-025-00614-7>
- Nithya, K., Sathish, A., Pradeep, K., & Kiran Baalaji, S. (2019). Algal biomass waste residues of *Spirulina platensis* for chromium adsorption and modeling studies. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 7(5). <https://doi.org/10.1016/j.jece.2019.103273>
- Ordóñez, J. I., Cortés, S., Maluenda, P., & Soto, I. (2023). Biosorption of Heavy Metals with Algae: Critical Review of Its Application in Real Effluents. In *Sustainability (Switzerland)* (Vol. 15, Issue 6). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). <https://doi.org/10.3390/su15065521>
- Pradana, A. B., Buchori, L., Pratama, W. D., Pratiwi, W. Z., & Hadiyanto. (2023). Immobilized algae for heavy metals remediation in textile wastewater. *Journal of Emerging Science and Engineering*, 1(2), 51–56. <https://doi.org/10.61435/jese.2023.10>
- Ratnawati, E., Ermawati dan Siti Naimah Balai Besar Kimia dan Kemasan, R., Perindustrian Jl Balai Kimia No, D. R., Rebo, P., & Timur, J. (2010). TEKNOLOGI BIOSORPSI OLEH MIKROORGANISME, SOLUSI ALTERNATIF UNTUK MENGURANGI PENCEMARAN LOGAM BERAT (BIOSORPTION TECHNOLOGY BY MICROORGANISMS, AN ALTERNATIVE SOLUTION FOR DECREASE HEAVY METAL POLLUTION). In *Jurnal Kimia dan Kemasan* (Vol. 32, Issue 1).
- Rehman, A., Park, M., & Park, S. J. (2019). Current progress on the surface chemical modification of carbonaceous materials. In *Coatings* (Vol. 9, Issue 2). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/COATINGS9020103>
- Torres, E. (2020). Biosorption: A review of the latest advances. In *Processes* (Vol. 8, Issue 12, pp. 1–23). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/pr8121584>
- Ubando, A. T., Africa, A. D. M., Maniquiz-Redillas, M. C., Culaba, A. B., Chen, W. H., & Chang, J. S. (2021). Microalgal biosorption of heavy metals: A comprehensive bibliometric review. *Journal of Hazardous Materials*, 402. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.123431>
- Wang, B., Lan, J., Bo, C., Gong, B., & Ou, J. (2023). Adsorption of heavy metal onto biomass-derived activated carbon: review. In *RSC Advances* (Vol. 13, Issue 7, pp. 4275–4302). Royal Society of Chemistry. <https://doi.org/10.1039/d2ra07911a>
- Xin, H., Tang, Y., Liu, S., Yang, X., Xia, S., Yin, D., & Yu, S. (2018). Impact of Graphene Oxide on Algal Organic Matter of *Microcystis aeruginosa*. *ACS Omega*, 3(12), 16969–16975. <https://doi.org/10.1021/acsomega.8b01948>