

Review: Biomassa Sebagai Adsorbent untuk Pengolahan Logam Berat Pada Air Limbah Industri

Veranica¹, Aster Rahayu^{1*}, dan Maryudi¹

¹Program Studi Megister Teknik Kimia, FTI, Universitas Ahmad Dahlan Yogyakarta Jl. Ringroad Selatan, Tamanan, Bantul, Yogyakarta, 55166

*E-mail: aster.rahayu@che.uad.ac.id

Abstract

Industrial wastewater generally contains heavy metals such as lead, cadmium, arsenic, nickel, chromium and mercury. Contamination of water with these elements is very dangerous and will pollute the environment, so a suitable waste water treatment is required. This review aims to find out the efficient methods of handling industrial wastewater and the benefits of biomass. Many scientific methods are used in this regard, including adsorption, chemical precipitation, ion exchange, electrochemical treatment, membrane filtration, coagulation and flocculation. However, some of these techniques have drawbacks such as will produce a large amount of metal sludge, making it difficult to recycle metal, and the formation of toxic sludge or other wastes. Of all these techniques, adsorption with adsorbent biomass has been widely known because it is an economical, effective and environmentally friendly processing technique, so this method is suitable for treating industrial wastewater. The use of biomass as an adsorbent is intended to help reduce dependence on fossil raw materials and greenhouse gas emissions that contribute to climate change.

Keywords: heavy metal; adsorption; adsorbent; biomass

Pendahuluan

Kontaminasi non-biodegradable merupakan pencemaran lingkungan yang menjadi salah satu masalah lingkungan dan menjadi prioritas utama yang harus dihilangkan dari limbah untuk melindungi lingkungan dan manusia (Da'na, 2017; Fu, 2011). Dengan meningkatnya pertumbuhan industri maka akan semakin tinggi emisi air limbah logam berat (Pampanin, 2013). Berdasarkan referensi, (Al-Majed, 2012; Sabir, 2015; Zamparas, 2020) pembuangan air limbah industri menyumbang sekitar 10% dari total pembuangan air limbah. Polutan umum dalam pembuangan industri, konsentrasinya mencapai 10 mg/L hingga 50.000 mg/L di berbagai sumber industri. Apabila limbah cair industri tidak diolah maka akan menyebabkan dampak negatif dari beberapa logam yang terkandung dalam limbah industri dapat dilihat pada Tabel 1 (Da'na, 2017; El-Gaayda, 2021 ; Raouf, 2016)

Tabel 1. Sumber, rute masuk dan efek toksisitas dari beberapa logam berat

Jenis logam	Batas toleransi (mg/L)	Sumber industri	Rute masuk	Efek toksisitas
Kromium (Cr) (Maryudi, 2021)	0,05	cat, electro plating	Menelan, penyerapan melalui kulit, inhalasi	Kerusakan paru-paru atau iritasi sistem pernapasan
Arsenik (As) (Kwon, 2010)	0,020	Fungisida, pestisida dan peleburan logam	Konsumsi, inhalasi	Kerusakan hati, ginjal, iritasi sistem pernapasan, kehilangan nafsu makan
Merkuri (Hg) (Babel, 2003)	0,01 (uap)	Industri kertas, petisida, baterai	Konsumsi, penyerapan melalui kulit, inhalasi	Kerusakan ginjal, hati, paru-paru, iritasi sistem pernapasan kehilangan pendengaran, serta system syaraf
Nikel (Ni) (Gunatilake, 2015)	0,20	Industry elektrokimia	Inhalasi	Kerusakan hati, ginjal dan paru-paru

Timbal (Pb) (Salamah, 2023)	0,15	Pertambangan,pestisida, industri cat	Konsumsi, inhalasi	Kehilangan nafsu makan, kerusakan hati dan paru-paru
Kadmium (Cd) (Rahayu, 2021)	0,05	Pengelasan, baterai CD-Ni , pestisida	Inhalasi dan konsumsi	Kerusakan hati, ginjal, iritasi sistem pernapasan

Tabel 1 menunjukkan kandungan senyawa berbahaya terutama logam yang banyak terdapat pada limbah cair industri seperti kromium (Cr) , aesenik (As), timbal (Pb), nikel (Ni), cadmium (Cd) dan merkuri (Hg). Kontaminasi ion logam berat, dan polutan organik dalam air tidak hanya menimbulkan pencemaran air, tetapi juga mengancam ekosistem dan kesehatan manusia (Chi, 2021), karena didalamnya mengandung beberapa senyawa beracun dan karsinogenik (Maleki, 2021) . Logam berat banyak ditemukan di perairan, organisme yang terkontaminasi digunakan untuk makanan sehingga dapat menyebabkan keracunan, memicu kanker, anemia atau gangguan pada system hematopoietic, gangguan pada system saraf pusat serta disabilitas intelektual bila ditemukan di atas tingkat toleransi (Maryudi, 2021 ; Trüby, 2003).

Metode Konvensional Pengurangan Logam Berat Pada Air Limbah

Beberapa metode remediasi logam berat diantaranya seperti filtrasi membran, pertukaran ion, elektrokimia treatment, adsorpsi, pengendapan atau presipitasi kimia, koagulasi dan flokulasi (Da'na, 2017; Fu, 2011) Adapun keuntungan dan kerugian dari beberapa metode untuk menghilangkan logam berat dalam air limbah tercantum dalam Tabel 2

Tabel 2. Keuntungan dan kerugian metode pengurangan logam berat dalam air limbah

Metode	Keuntungan	Kerugian	Referensi
Filtrasi membran	Menghilangkan senyawa logam berat, senyawa organik, padatan tersuspensi dan efisiensi yang tinggi, hemat ruang	Biaya yang relatif tinggi, laju aliran rendah, sensitif dengan pH	(Fu, 2011; Gunatilake, 2015)
Pertukaran ion	Efisiensi penghilangan logam tinggi, kinetika cepat dan pengoprasian yang mudah	Biaya perawatan tinggi, laju aliran rendah dan sensitif dengan pH	(Gunatilake, 2015 ; Wang, 2018;)
Presipitasi kimia	Relatif sederhana, biaya murah dan nonlogam selektif	Pengendapan logam yang lambat, dan produksi lumpur yang besar	(Chen, 2009)
Elektrokimia treatment	Pengoprasian yang mudah, dan tidak perlu menggunakan bahan kimia	Produksi lumpur yang besar, pengendapan logam yang lambat, pengendapan yang buruk, agregasi endapan logam, dan dampak lingkungan jangka panjang dari pembuangan lumpur	(Mollah, 2001)
Koagulasi dan flokulasi	Menghilangkan limbah dalam bentuk koloid, efektif dan efisien, lebih cepat	Produksi lumpur yang besar, transfer senyawa beracun ke fase padat	(Maldonado, 2014)
Adsorpsi dengan biomassa	Efektif, ekonomis, ramah lingkungan, dan mudah didapat	ion-ion yang telah teradsorpsi dapat terdesorpsi, jika adsorben tidak ditangani lebih lanjut	(Delarozza, 2018)

Dapat ditinjau dari berbagai metode untuk menghilangkan logam berat seperti presipitasi kimia, pertukaran ion, elektrokimia treatment, filtrasi membran, koagulasi, flokulasi, dll. Secara umum, proses ini efektif dalam menghilangkan sebagian besar logam dari limbah konsentrasi tinggi hingga sedang. Akan tetapi, proses kimia ini akan menghasilkan lumpur logam dalam jumlah besar, sehingga sulit untuk mendaur ulang logam tersebut, lumpur juga perlu diproses lebih lanjut. Selain itu, efluen setelah pengolahan biasanya memiliki kandungan padatan yang terlarut sangat tinggi. Saat mengencerkan konsentrasi ion logam yang lebih rendah, proses ini tidak efektif dan memerlukan keahlian tingkat tinggi. Oleh karena itu, banyak pengguna tidak menggunakan metode ini (Da'na, 2017; Fu, 2011; Maryudi, 2021). Adsorpsi telah dikenal luas yang merupakan salah satu metode dekontaminasi air yang ramah lingkungan, efektif dan ekonomis. Pada proses ini akan terjadi penyerapan logam berat melalui biomaterial adsorben, sehingga dapat disimpulkan metode adsorpsi ini layak digunakan dalam proses pengolahan atau pengurangan logam berat pada air limbah industri, jika dilihat dari aspek efektifitas dan nilai ekonomi (Rahayu, 2021; Sokker, 2011; Xavier, 2018).

Pengurangan Logam Berat dengan Metode Adsorpsi

Review ini bertujuan untuk mengetahui cara menghilangkan logam berat menggunakan metode adsorpsi dengan biomaterial yang telah dikenal luas. Pada dasarnya adsorpsi merupakan proses perpindahan massa dimana ion logam dipindahkan dari larutan ke permukaan sorben, dan menjadi terikat oleh interaksi fisik atau kimia (Babel, 2003; Gupta, 2012). Proses ini terjadi ketika zat terlarut gas atau cair terakumulasi pada permukaan padat atau cair (adsorben), sehingga membentuk film molekul atau atom (adsorbat). Keuntungan dari proses adsorpsi dapat menghilangkan atau meminimalkan logam berat dalam konsentrasi rendah (Tofan, 2022), sederhana dan efektif (Kwon, 2010). Metode ini biasa digunakan untuk menghilangkan ion logam dari berbagai limbah industri (Gottipati, 2012; Sokker, 2011; Xavier, 2018). Secara umum, mekanisme adsorpsi air limbah dengan adsorben padat yaitu dengan cara sebagai berikut:

- Transfer ion logam dari air limbah ke permukaan adsorben
- Pemindahan massa solute dari permukaan adsorben menuju ke pori-pori adsorben
- Adsorpsi adsorbat ke situs aktif pori-pori adsorpsi
- Laju adsorpsi secara keseluruhan dikendalikan oleh pembentukan difusi atau film intrapartikel

Adsorben Limbah Pertanian

Beberapa bahan alam yang tersedia dapat digunakan untuk menghilangkan logam berat. Adsorben murah seperti bahan alami, limbah pertanian, biopolimer termodifikasi atau limbah industri telah ditemukan lebih berguna untuk menghilangkan logam berat dalam beberapa aspek, yaitu lebih ekonomis, tidak membentuk lumpur beracun, dan efisien (Abas, 2013 ; Fu, 2011; Trüby, 2003). Selain itu, biopolimer memiliki beberapa gugus fungsi yang berbeda, seperti hidroksil dan amina, yang dapat meningkatkan efisiensi adsorpsi ion logam. Berikut ini beberapa biosorben yang mudah diperoleh dari tiga sumber yaitu: Biomassa hidup seperti cangkang, lignin, udang, krill, cumi-cumi, dan cangkang kepiting, biomassa alga, biomassa mikroba, mis. bakteri, jamur dan ragi dan produk pertanian (Bose, 2002; Trüby, 2003)

Pemilihan adsorben hemat biaya, tidak berbahaya dan menghasilkan adsorpsi yang baik, harus memiliki kandungan karbon atau oksigen yang tinggi. Sifat fisik yang dibutuhkan antara lain : ketahanan abrasi yang tinggi dan stabilitas termal yang tinggi (Sabir, 2015). Sumber biomassa yang berpotensi menyerap logam adalah bahan limbah pertanian lingoselulosa. Bahan-bahan ini bisa menjadi alternatif dengan hemat biaya untuk pengolahan logam berat dalam air limbah (Sud, 2008). Bahan limbah pertanian biasanya tersusun atas lignin dan selulosa sebagai penyusun utamanya. Komponen lainnya adalah hemiselulosa, ekstraktif, lipid, protein, gula sederhana, pati, air, hidrokarbon, Selulosa merupakan biopolimer berlimpah generasi pertama di bumi, yang dapat diperoleh dari sumber yang berbeda seperti batang kapas, bambu, Jerami gandum dan sebagainya (Raouf, 2016). Modifikasi kimia selulosa telah menghasilkan banyak sekali turunan selulosa. Dalam hal ini, Polisakarida dari pati yang berasal dari selulosa, larut, jagung dan jagung dengan kandungan amilosa/amilopektin variabel dihubungkan silang dengan epiklorohidrin untuk membentuk adsorben polimer (Crini, 2005). Tabel 3 menunjukkan biosorben atau adsorben berbahan dasar limbah pertanian.

Tabel 3. Beberapa sumber adsorben biomassa limbah pertanian

Kandungan logam yang ingin disingkirkan	Biosorben	Referensi
CD (II)	Sekam padi	(Cay, 2004)
Zn (II), Pb (II), dan Cd (II)	kulit jagung	(C, 2005)
Cu (II)	Kulit kentang	(Aman, 2008)
Kr(II)	Batang tembakau	(Sheth, 2005)
Cu (II)	Tangkai gandum	(Özer, 2004)
Ni (II), Cu (II), Cd (II), dan Kr (VI)	Limbah industry teh	(Cay, 2004)
Cu (II) dan Ni (II)	Limbah batang anggur	(Villaescusa, 2004)

Turunan selulosa dapat digunakan dalam pemurnian air dan produksi hidrogel yang berfungsi sebagai menghilangkan logam berat. Hidroksietil selulosa yang dicangkok dengan asam akrilat, dan campuran akrilamida dan asam akrilat dengan komposisi rasio yang berbeda akan menghasilkan kopolimer I, kopolimer II dan kopolimer III, menggunakan kalium persulfat/natrium bisulfat sebagai sistem inisiasi redoks (Samaha, 2015). Dalam kondisi optimal kopolimer tersebut dapat berguna untuk menghilangkan Ni dari limbah cair dengan memvariasikan pH, konsentrasi ion logam dan waktu pengadukan.

Pati merupakan karbohidrat polimerik yang terdiri dari sejumlah besar unit glukosa. Sebagian besar tumbuhan hijau menghasilkan polisakarida yang berguna untuk menyimpan energi. Pati adalah karbohidrat kedua setelah selulosa yang ditemukan dalam jumlah yang besar, seperti jagung, gandum, kentang, singkong dan beras. pati biasanya mengandung 20-25% amilosa dan 75-80% amilopektin (Raouf, 2016). Dalam hal ini, polimer cangkok dari pati singkong dan akrilonitril disintesis dalam larutan berair menggunakan ion amonium sebagai inisiator. Untuk menghilangkan logam berat dari limbah cair, hidrogel dapat digunakan sebagai adsorben. Kapasitas adsorpsi



dievaluasi dengan mengukur tingkat adsorpsi nikel, tembaga dan ion logam timbal dalam kondisi kesetimbangan (Ekebafé, 2012)

Kesimpulan

Biomaterial limbah pertanian dapat digunakan sebagai adsorben untuk mengurangi kandungan logam berat pada air limbah industri. Biosorben sekam padi, kulit jagung, kulit kentang, limbah industri teh atau biomaterial yang mengandung selulosa, lignin, pati, dan hidrokarbon mampu menyerap logam berat seperti : Cd (II), Zn (II), Pb (II), Cu (II), Ni (II), Kr (II) dan (IV).

Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan Terimakasih kepada Program Studi Magister Teknik Kimia, atas bantuan dana penulisan artikel review ini.

Daftar Pustaka

- Abas, S. N. A., Ismail, M. H. S., Kamal, M. L., & Izhar, S. (2013). Adsorption process of heavy metals by low-cost adsorbent: A review. *World Applied Sciences Journal*, 28(11), 1518–1530. <https://doi.org/10.5829/idosi.wasj.2013.28.11.1874>
- Al-Majed, A. A., Adebayo, A. R., & Hossain, M. E. (2012). A sustainable approach to controlling oil spills. *Journal of Environmental Management*, 113(November 2020), 213–227. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2012.07.034>
- Aman, T., Kazi, A. A., Sabri, M. U., & Bano, Q. (2008). Potato peels as solid waste for the removal of heavy metal copper(II) from waste water/industrial effluent. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 63(1), 116–121. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2007.11.013>
- Babel, S., & Omega, A. (2003). Various treatment technologies to remove arsenic and mercury from contaminated groundwater: An overview. *Proceedings of the First International Symposium on Southeast Asian Water Environment*, 433–440.
- Bose, P., Aparna Bose, M., & Kumar, S. (2002). Critical evaluation of treatment strategies involving adsorption and chelation for wastewater containing copper, zinc and cyanide. *Advances in Environmental Research*, 7(1), 179–195. [https://doi.org/10.1016/S1093-0191\(01\)00125-3](https://doi.org/10.1016/S1093-0191(01)00125-3)
- C, I. J., N, O. D., & A, A. A. (2005). Competitive adsorption of Zn (II), Cd (II) AND Pb (II) ions from aqueous and non-aqueous solution by maize cob and husk. *African Journal of Biotechnology*, 4(10), 1113–1116. <http://www.academicjournals.org/AJB>
- Cay, S., Uyanık, A., & Özaşık, A. (2004). Single and Binary Component Adsorption on Copper(II) and Cadmium(II) from Aqueous Solution Using Tea Industry Waste. *Separation and Purification Technology*, 38, 273–280. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2003.12.003>
- Chen, Q., Luo, S., Hills, C., Xue, G., & Tyrer, M. (2009). Precipitation of heavy metals from wastewater using simulated flue gas: Sequent additions of fly ash, lime and carbon dioxide. *Water Research*, 43(10), 2605–2614. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2009.03.007>
- Chi, H., Wang, S., Li, T., & Li, Z. (2021). Recent progress in using hybrid silicon polymer composites for wastewater treatment. *Chemosphere*, 263, 128380. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.128380>
- Crini, G. (2005). Recent developments in polysaccharide-based materials used as adsorbents in wastewater treatment. *Progress in Polymer Science (Oxford)*, 30(1), 38–70. <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2004.11.002>
- Da'na, E. (2017). Adsorption of heavy metals on functionalized-mesoporous silica: A review. *Microporous and Mesoporous Materials*, 247(1), 145–157. <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2017.03.050>
- Delarozza, R. (2018). *Adsorpsi logam berat menggunakan adsorben alami pada air limbah industri*. 5.
- El-Gaayda, J., Titchou, F. E., Oukhrib, R., Yap, P. S., Liu, T., Hamdani, M., & Ait Akbour, R. (2021). Natural flocculants for the treatment of wastewaters containing dyes or heavy metals: A state-of-the-art review. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9(5), 106060. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.106060>
- Fu, F., & Wang, Q. (2011). Removal of heavy metal ions from wastewaters: A review. *Journal of Environmental Management*, 92(3), 407–418. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2010.11.011>
- Gottipati, R., Susmita, M., & Ramakrishna, G. (2012). Application of response surface methodology for optimization of Cr(III) and Cr(VI) adsorption on commercial activated carbons. *Research Journal of Chemical Sciences*, 2(2), 40–48. <https://www.researchgate.net/publication/225076280>
- Gunatilake, S. K. (2015). Methods of Removing Heavy Metals from. *Journal of Multidisciplinary Engineering Science Studies Industrial Wastewater*, 1(1), 13–18. https://www.researchgate.net/profile/Maurice-Ekpenyong/post/removal_of_copper_metal_from_liquids/attachment/5c4891f83843b0544e61f4d3/AS%3A718267689758722%401548259770428/download/Metal+biosorption.pdf%0Awww.jmess.org
- Gupta, V. K., & Nayak, A. (2012). Cadmium removal and recovery from aqueous solutions by novel adsorbents



- prepared from orange peel and Fe₂O₃ nanoparticles. *Chemical Engineering Journal*, 180, 81–90. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2011.11.006>
- Kimia, J., Chemistry, J. O. F., Amina, D., Demand, B. O., Demand, C. O., Cu, K., Bod, L., Bod, L., & Mapping, S.-E. D. X. (2023). MODIFIKASI pH SILIKA MESOPORI DARI PASIR PANTAI SEBAGAI ADSORBEN TIMBAL (Pb) DAN TEMBAGA (Cu) DALAM LIMBAH PERCETAKAN S. Salamah * dan A. Rahayu *Chemical Engineering*, Universitas Ahmad Dahlan, Yogyakarta 55191, Indonesia PENDAHULUAN Semakin menin. 17(1), 49–56.
- Kwon, J. S., Yun, S. T., Lee, J. H., Kim, S. O., & Jo, H. Y. (2010). Removal of divalent heavy metals (Cd, Cu, Pb, and Zn) and arsenic(III) from aqueous solutions using scoria: Kinetics and equilibria of sorption. *Journal of Hazardous Materials*, 174(1–3), 307–313. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.09.052>
- L. O. Ekebafé. (2012). Removal of heavy metals from aqueous media using native cassava starch hydrogel. *African Journal of Environmental Science and Technology*, 6(7), 275–282. <https://doi.org/10.5897/ajest12.011>
- López-Maldonado, E. A., Oropeza-Guzman, M. T., Jurado-Baizaval, J. L., & Ochoa-Terán, A. (2014). Coagulation-flocculation mechanisms in wastewater treatment plants through zeta potential measurements. *Journal of Hazardous Materials*, 279, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2014.06.025>
- M., D., & O., M. (2013). Polycyclic Aromatic Hydrocarbons a Constituent of Petroleum: Presence and Influence in the Aquatic Environment. *Hydrocarbon*. <https://doi.org/10.5772/48176>
- Maleki, F., Gholami, M., Torkaman, R., Torab-Mostaedi, M., & Asadollahzadeh, M. (2021). Cobalt(II) removal from aqueous solution by modified polymeric adsorbents prepared with induced-graft polymerization: Batch and continuous column study with analysis of breakthrough behaviors. *Environmental Technology and Innovation*, 24, 102054. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2021.102054>
- Maryudi, M., Rahayu, A., Syauqi, R., & Islami, M. K. (2021). Teknologi Pengolahan Kandungan Kromium dalam Limbah Penyamakan Kulit Menggunakan Proses Adsorpsi: Review. *Jurnal Teknik Kimia Dan Lingkungan*, 5(1), 90. <https://doi.org/10.33795/jtkl.v5i1.207>
- Mollah, M. Y., Schennach, R., Parga, J. R., & Cocke, D. L. (2001). Electrocoagulation (EC)--science and applications. *Journal of Hazardous Materials*, 84(1), 29–41. [https://doi.org/10.1016/s0304-3894\(01\)00176-5](https://doi.org/10.1016/s0304-3894(01)00176-5)
- Özer, A., Özer, D., & Özer, A. (2004). The adsorption of copper(II) ions on to dehydrated wheat bran (DWB): Determination of the equilibrium and thermodynamic parameters. *Process Biochemistry*, 39(12), 2183–2191. <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2003.11.008>
- Rahayu, A., Fadhillah Hanum, F., Aldilla Fajri, J., Dwi Angraini, W., & Khasanah, U. (2021). Review: Pengolahan Limbah cair Industri dengan Menggunakan Silika A Review: Industrial Liquid Waste Treatment Using Silica. *Open Science and Technology*, 02(01), 2776–169. <https://opscitech.com/journal>
- Raouf MS, A., & Raheim ARM, A. (2016). Removal of Heavy Metals from Industrial Waste Water by Biomass-Based Materials: A Review. *Journal of Pollution Effects & Control*, 05(01), 1–13. <https://doi.org/10.4172/2375-4397.1000180>
- Sabir, S. (2015). Approach of cost-effective adsorbents for oil removal from oily water. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 45(17), 1916–1945. <https://doi.org/10.1080/10643389.2014.1001143>
- Samaha, S. H., Essa, D. M., Osman, E. M., & Ibrahim, S. F. (2015). Synthesis and characterization of hydroxyethyl cellulose grafted copolymers and its application for removal of nickel ions from aqueous solutions. *International Journal of Engineering Innovation & Research*, 4(4), 645–653.
- Sheth, K. N., & Soni, V. M. (2005). Comparative study of removal of Cr(VI) with PAC, GAC and adsorbent prepared from tobacco roots. *Journal of Environmental Science & Engineering*, 47(3), 218–221.
- Sokker, H. H., El-Sawy, N. M., Hassan, M. A., & El-Anadoul, B. E. (2011). Adsorption of crude oil from aqueous solution by hydrogel of chitosan based polyacrylamide prepared by radiation induced graft polymerization. *Journal of Hazardous Materials*, 190(1–3), 359–365. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2011.03.055>
- Sud, D., Mahajan, G., & Kaur, M. P. (2008). Agricultural waste material as potential adsorbent for sequestering heavy metal ions from aqueous solutions - A review. *Bioresource Technology*, 99(14), 6017–6027. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2007.11.064>
- Tofan, L. (2022). Polymeric Biomass Derived Adsorbents for Co(II) Remediation, Recycling and Analysis. *Polymers*, 14(9). <https://doi.org/10.3390/polym14091647>
- Trüby, P. (2003). *Impact of Heavy Metals on Forest Trees from Mining Areas*.
- Villaescusa, I., Fiol, N., Martínez, M., Miralles, N., Poch, J., & Serarols, J. (2004). Removal of copper and nickel ions from aqueous solutions by grape stalks wastes. *Water Research*, 38(4), 992–1002. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2003.10.040>
- Wang, Q., Sen, B., Liu, X., He, Y., Xie, Y., & Wang, G. (2018). Enhanced saturated fatty acids accumulation in cultures of newly-isolated strains of Schizochytrium sp. and Thraustochytriidae sp. for large-scale biodiesel production. *Science of the Total Environment*, 631–632, 994–1004. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.03.078>
- Xavier, A. L. P., Adarme, O. F. H., Furtado, L. M., Ferreira, G. M. D., da Silva, L. H. M., Gil, L. F., & Gurgel, L. V.



- A. (2018). Modeling adsorption of copper(II), cobalt(II) and nickel(II) metal ions from aqueous solution onto a new carboxylated sugarcane bagasse. Part II: Optimization of monocomponent fixed-bed column adsorption. *Journal of Colloid and Interface Science*, 516, 431–445. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2018.01.068>
- Zamparas, M., Tzivras, D., Dracopoulos, V., & Ioannides, T. (2020). Application of sorbents for oil spill cleanup focusing on natural-based modified materials: A review. *Molecules*, 25(19), 1–22. <https://doi.org/10.3390/molecules25194522>