



Green Nanotechnology: Sintesis Nanopartikel (NP) Dari Tanaman Untuk Bioremediasi Logam Berat Hg, Cr, Dan Pb: Kajian Literatur

Green Nanotechnology: Synthesis of Nanoparticles (NPs) from Plants for Bioremediation of Heavy Metals Hg, Cr, and Pb: A Literature Review

Hasna Labib Lathifah¹, Adilla Syahsiyatun Najah¹, Marsya Naranissa Puteri Santoso^{1*}

¹ Departemen Bioteknologi, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Muhammadiyah Bandung

*Corresponding author: Jalan Soekarno-Hatta No. 752 Kota Bandung, Provinsi Jawa Barat, 40614, Indonesia.

E-mail addresses: marsya.naranissa@gmail.com

2025 BIODIVERSE: Jurnal Biodiversitas dan Bioteknologi

Abstract

Heavy metals are toxic pollutants that cause environmental pollution. Heavy metals that enter the environment cannot be degraded either biologically or chemically and can remain in the environment for a long time. Bioremediation is a technique to protect the environment from contaminants using biological agents. One of the Green Nanotechnology technologies can contribute to bioremediation. Therefore, the purpose of this literature review is to find out the concept of green nanotechnology bioremediation by synthesizing nanoparticles from plants for bioremediation of heavy waste hg, cr, Pb. the literature review method used is an online-based literature review with sources derived from Google Scholar, Pubmed and Sciencedirect. Plant extracts were obtained in both aqueous and non-aqueous media using hot solvents or cold extraction methods. The plant extracts were then filtered and a solution suitable for the nanoparticles to be synthesized was added. Nanotechnology bioremediation has high potential to be used in surface water, groundwater, and wastewater treatment technologies to filter on a nanoscale so that water is able to pass but large materials such as bacteria and viruses and their products (toxins) will be filtered out on nanoparticles. In addition, catalysts and filters can be designed to produce high adsorption strength so that they can absorb heavy metal ions.

Article info

Article history:

Received : 04 February 2025

Revised : 27 April 2025

Accepted : 29 December 2025

Available online : 31 December 2025

Keywords:

bioremediation
green nanotechnology
heavy metal

1. PENDAHULUAN

Logam berat merupakan salah satu polutan beracun yang dapat menyebabkan pencemaran pada lingkungan [1]. Logam berat pada lingkungan dapat membahayakan lingkungan karena bahkan logam berat dalam konsentrasi rendah tidak dapat terurai secara hayati dan dapat berakumulasi dalam rantai makanan. Logam berat di suatu lahan secara umum dapat berasal dari proses alam atau akibat dari manusia. Beberapa Kegiatan manusia seperti pertambangan (minyak,

emas, batubara, dan lainnya) atau kegiatan industri lainnya dapat mengakibatkan masuknya logam berat ke lingkungan [2].

Logam berat yang sudah masuk ke dalam lingkungan maka logam berat tidak dapat di degradasi baik secara biologis maupun kimiawi dan dapat bertahan di lingkungan tersebut dalam jangka waktu yang lama, sehingga menyebabkan pencemaran lingkungan yang serius dan menimbulkan efek berbahaya bagi organisme sekitarnya. Semua teknik yang dilakukan untuk melindungi lingkungan dari kontaminan menggunakan agen biologis disebut bioremediasi [3].

Bioremediasi memberikan strategi pemulihan yang sangat baik dan fleksibel untuk berbagai polutan, namun kurang efektif ketika berhadapan dengan konsentrasi polutan dan xenobiotik atau senyawa refraktori yang tinggi, sehingga menyebabkan efisiensi pengolahan dan waktu pemulihan yang tidak berkelanjutan. Salah satu teknologi bernama Green Nanotechnology dapat memberikan kontribusi dalam bioremediasi [4].

Green Nanotechnology merupakan cabang teknologi hijau yang memanfaatkan konsep green chemistry dan green engineering yang dimana kata “green” atau hijau ini mengacu pada penggunaan produk tanaman. Gabungan antara nanoteknologi dengan bioremediasi ini dapat mencakup rentang aplikasi potensial yang lebih luas dengan biaya yang lebih rendah dan dampak negatif minimum terhadap lingkungan untuk menangani polutan [5].

Selain efek positifnya dalam menghilangkan kontaminan, nanopartikel dapat berinteraksi dengan elemen biotik dan abiotik, baik secara positif maupun negatif; inilah sebabnya banyak upaya telah dilakukan untuk mengevaluasi efek dari penggunaan gabungan nanopartikel dan praktik bioremediasi secara fisik, kimia dan biologis di dalam lingkungan [6]. Tujuan dari kajian literatur ini, untuk mengetahui konsep bioremediasi menggunakan nanopartikel berbasis green nanotechnology dengan metode sintesis dari tanaman untuk bioremediasi limbah logam berat Hg, Cr, Pb serta mekanisme dari green nanotechnology.

2. METODE

Penulisan kajian literatur ini menggunakan penelusuran literatur berbasis online dengan sumber berasal dari Google Scholar, Pubmed dan Scienccdirect. Metode ini digunakan untuk menganalisis berbagai sumber Pustaka dengan topik kajian literatur, sehingga pemilihan sumber pustaka yang digunakan berdasarkan relevansi dengan topik. Kajian literatur atau literature review merupakan suatu kajian ilmiah yang berfokus pada suatu topik tertentu dan akan memberikan gambaran pada topik tersebut [7]. Batasan dalam penulisan kajian literatur ini meliputi; analisis potensi bioremediasi menggunakan green nanotechnology & menganalisis dampak, manfaat & kekurangan pada bioremediasi menggunakan nanoteknologi.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Nanopartikel berbasis *green nanotechnology*

Menurut penelitian, memproduksi nanopartikel melalui *green nanotechnology* merupakan proses yang murah dan ramah lingkungan. Hingga saat ini, agen biologis termasuk bakteri, jamur, ragi, aktinomiset, dan tanaman telah digunakan untuk produksi nanopartikel [8]. *Green Nanotechnology* yang berasal dari nanopartikel sumber alami yaitu tanaman, telah mendapatkan perhatian signifikan di berbagai bidang karena sifat dan keunggulannya yang unik dibandingkan nanopartikel berbasis kimia [9].

Nanopartikel berbasis *green nanotechnology* menawarkan alternatif yang berkelanjutan karena berasal dari sumber daya terbarukan. Hal ini mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil dan meminimalkan dampak lingkungan yang terkait dengan produksi dan pembuangan nanopartikel berbasis kimia. Nanopartikel berbasis *green nanotechnology* seringkali biokompatibel, yang berarti lebih kecil kemungkinannya untuk menyebabkan efek samping ketika digunakan dalam sistem biologis [10].

Nanopartikel berbasis *green nanotechnology* menunjukkan berbagai macam sifat yang dapat disesuaikan untuk aplikasi tertentu. Nanopartikel tersebut dapat dimodifikasi melalui fungsionalisasi permukaan atau teknik enkapsulasi untuk meningkatkan stabilitas, kelarutan, atau kemampuan penargetannya [11]. Produksi nanopartikel berbasis *green nanotechnology* ini juga dapat menghemat biaya dibandingkan dengan nanopartikel berbasis kimia karena bahan baku yang digunakan seringkali tersedia dan relatif murah. Nanopartikel berbasis *green nanotechnology* memiliki fungsi yang dapat dimanfaatkan untuk berbagai aplikasi.

3.2 *Green Nanotechnology* Untuk Remediasi Limbah logam Berat Hg, Cr, Pb

Green nanotechnology yang memanfaatkan prinsip kimia hijau dan teknologi hijau untuk memproduksi material berupa nano tanpa bahan beracun dengan menggunakan energi yang lebih sedikit, memanfaatkan sumber daya yang dapat diperbarui jika memungkinkan, serta menggunakan pola siklus produksi-pakai-daur ulang dalam segala tahapan produksi serta teknik untuk mengurangi limbah [12]. Teknologi nano ini memiliki potensi tinggi untuk digunakan dalam teknologi menghilangkan bahan tercemar pada permukaan air, air tanah, hingga air limbah. Hal tersebut dikarenakan produk nano di desain mampu untuk menyaring molekul penyebab pencemaran dalam skala nano sehingga air mampu melewati penyaring tersebut namun molekul berukuran besar seperti bakteri dan virus serta produknya yang mengandung toksik dapat tersaring pada partikel nano. Selain itu, kekuatan adsorpsi yang tinggi di desain pada katalis dan penyaring sehingga mampu menyerap ion logam berat [13].

Limbah logam berat merupakan limbah padat dengan kandungan logam berat dan dikategorikan limbah B3 yang bersifat tidak terdegradasi dan karsinogenik (berpotensi menyebabkan kanker) [14]. Limbah logam berat yaitu unsur logam yang memiliki berat jenis $5,0 \text{ gr/cm}^3$, dengan pembuangan limbah logam berat pada lingkungan pada jumlah tertentu mengakibatkan racun terhadap lingkungan [15]. Terdapat beberapa jenis limbah berat yaitu jenis limbah logam berbahaya seperti Cd, Pb dan Hg [16].

Timbal (Pb) merupakan logam berat yang tergolong sangat beracun, dan keracunan dengannya dapat mengakibatkan anemia, kerusakan ginjal dan bahkan kematian. Paparan Pb yang berlebihan juga berpotensi mematikan, pencemaran Pb dalam sumber daya air umumnya disebabkan oleh pembuangan limbah elektronik dan pewarna ke air [17]. Menurut penelitian Lagashetty dengan judul "*Microwave-assisted green synthesis, characterization and adsorption studies on metal oxide nanoparticles synthesized using: Ficus Benghalensis plant leaf extracts*" didapatkan hasil penelitian bahwa oksida logam, seperti FeO, CeO, dan ZnO, yang disintesis dengan menggunakan ekstrak daun tanaman *Ficus benghalensis* dilaporkan memiliki potensi untuk menghilangkan Pb dari lingkungan [18]. Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Arshadi mengenai "*Nano modification of NZVI with an aquatic plant Azolla filiculoides to remove Pb(II) and Hg(II) from water: Aging time and mechanism study*" terbukti bahwa Nano Zero Valent I (nZVI) yang disintesis dengan menggunakan tanaman air *Azolla filiculoides* dapat menyerap limbah logam Pb [19].

Kromium (Cr) juga merupakan logam berat yang menyebabkan toksisitas multiorgan pada manusia, termasuk disfungsi ginjal, alergi, asma, dan kanker saluran pernapasan [20]. Menurut penelitian Xiao yang membahas "*Plant-mediated synthesis of highly active iron nanoparticles for Cr (VI) removal: Investigation of the leading biomolecules*". Nano partikel (NP) Fe yang disintesis dengan menggunakan ekstrak tanaman Alston [21] dan nano partikel (Np) yang dimediasi silika yang disiapkan dengan menggunakan *Cynodon dactylon* adalah beberapa nano partikel yang dimediasi tanaman yang dilaporkan dalam literatur untuk menghilangkan Cr dari lingkungan [22].

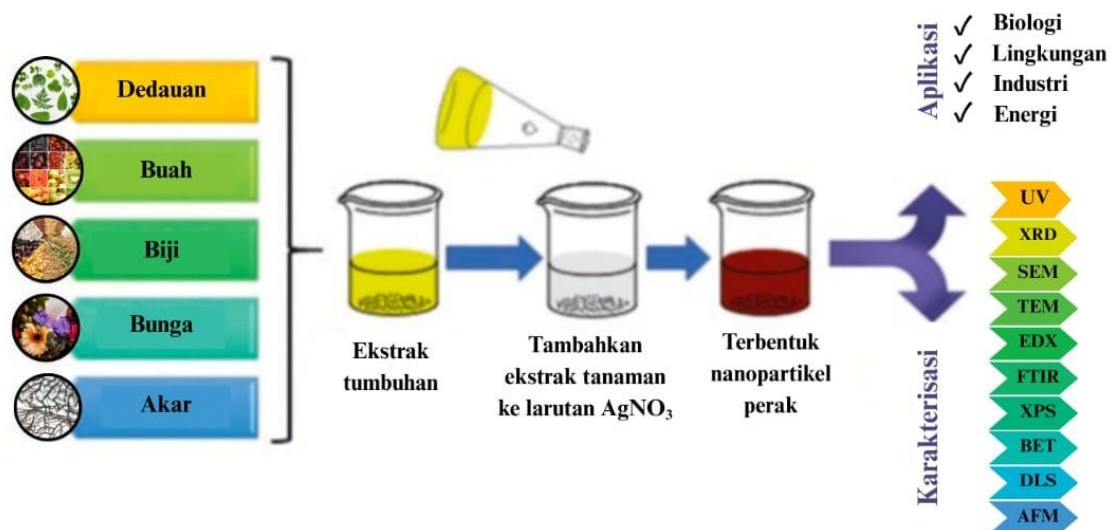
Merkuri (Hg) merupakan limbah berat paling beracun di lingkungan dan umumnya terdapat dalam tiga bentuk: logam unsur, garam organik, dan senyawa anorganik, masing-masing dengan tingkat bioavailabilitas dan toksisitas yang berbeda-beda. Merkuri dan garam merkuri merusak lapisan usus dan ginjal, dan dibuang ke lingkungan melalui pembakaran batu bara, penambangan, konsumsi ikan yang terkontaminasi, dan paparan pekerjaan [23]. Ekstrak *Cinnamomum tamala* (Kayu Manis) yang dimediasi emas (Au) nano partikel yang disintesis dan ekstrak *Azolla filiculoides* yang disintesis nZVI menunjukkan kemampuan potensial untuk menghilangkan Hg dalam penelitian yang dilakukan oleh ElMitwalli yang berjudul "*Green synthesis of gold nanoparticles using cinnamon bark extract, characterization, and fluorescence activity in Au/eosin Y assemblies*" [24]. Berikut beberapa hasil penelitian yang berhasil mensintesis nano partikel dari tanaman.

Tabel 1. Sintesis Nanopartikel Dari Tanaman Untuk Remediasi Logam Berat

Logam Berat	Nano Partikel (NP)	Extract Tanaman	Ukuran NP (nm)	Referensi
Merkuri (Hg)	nZVI	<i>Azolla filiculoides</i> (Tanaman Utuh)	20	[18]
Merkuri (Hg)	Fe ₃ O ₄	<i>Thymus schimperi</i> (daun)	8,7	[23]
Kromium (Cr)	Fe	<i>Syzygium caryophyllatum</i> (daun)	5	[20]
Kromium (Cr)	ZnO-ZnFe ₂ O ₄	<i>Psidium guajava</i> (daun)	10-20	[24]
Timbal (Pb)	Fe	<i>Eucalyptus globulus</i> (daun)	20-40	[19]
Timbal (Pb)	Si	<i>Oryza sativa</i> (biji)	39,47	[25]

3.3 Metode Sintesis Nanopartikel Dari Tanaman

Berbagai bagian tanaman, seperti akar, buah, batang, biji, dan daun, dimanfaatkan sebagai sumber daya dalam sintesis NP, kemudian bagian tanaman tersebut di ekstrak dan hasil ekstrak di tambahkan larutan AgNO₃. Lalu akan terbentuk nanopartikel perak yang dapat digunakan untuk pengaplikasian berbagai bidang dan untuk karakterisasi [25].



Gambar 1. Ekstraksi tanaman sebagai sumber daya dalam sintesis NP [26]

Ekstrak tanaman diperoleh baik dalam media berair maupun media non-air (terutama etanol sebagai pelarut) dengan menggunakan pelarut panas atau metode ekstraksi dingin. Banyaknya biomolekul yang ada dalam tanaman, seperti asam organik, vitamin, protein, dan metabolit sekunder (misalnya alkaloid, flavonoid, terpenoid, polisakarida, dan senyawa heterosiklik), bertanggung jawab atas persiapan berbagai jenis NP, dengan potensi luar biasa untuk mereduksi garam logam menjadi NP [26].

Selain itu, metabolit tanaman memainkan peran penting sebagai agen penstabil dan pelapis selama proses sintesis. Selain itu, biopolimer, seperti gum, pati, selulosa, dan lainnya, digunakan sebagai fase matriks dalam sintesis NP. Karena karakteristiknya, yaitu kepadatan minimal, tidak bersifat abrasif, mudah terbakar, tidak beracun, biaya rendah, dan biodegradabilitas, NP polimer yang diperkuat serat selulosa telah mendapat perhatian besar di era ini [27].

Ekstrak tanaman dapat digunakan untuk menghasilkan nanopartikel, yang memiliki keunggulan dibandingkan proses biologis lainnya seperti sintesis mikroorganisme [28]. Sintesis nanopartikel dari tanaman memiliki keunggulan karena kinetika jauh lebih besar daripada metode biosintesis lainnya yang sebanding dengan pembuatan nanopartikel kimiawi. Karena kandungan fitokimia yang dimiliki oleh berbagai bagian tanaman seperti buah, daun, batang, dan akar telah dimanfaatkan secara luas untuk produksi nanopartikel ramah lingkungan. Bagian tanaman yang harus digunakan dalam pembuatan nanopartikel dapat dibersihkan dan dipanaskan dalam air suling. Lalu ekstrak tanaman disaring [29].

Setelah menyaring, dan menambahkan larutan yang sesuai untuk nanopartikel yang ingin disintesis, warna larutan mulai berubah, produksi nanopartikel dapat dipisahkan dengan sentrifugasi [30]. Yang paling mudah dibuat adalah nanopartikel perak (AgNP) yang berasal dari

tanaman. Agen biologis pereduksi dan larutan ion logam perak diperlukan untuk produksi nanopartikel perak yang ramah lingkungan. Mereduksi dan menstabilkan ion Ag dengan berbagai biomolekul, seperti aspolisakarida, vitamin, asam amino, protein, fenolat, saponin, alkaloid, dan / atau terpen, adalah cara termudah dan paling murah untuk membuat AgNP. Kemampuan untuk membuat AgNP dapat digunakan dengan hampir semua tanaman [31].

Menurut Al Saqr *et al.* (2021) [32]. Semua partikel-partikel nano harus di deteksi atau karakterisasi terlebih dahulu dengan metode-metode seperti:

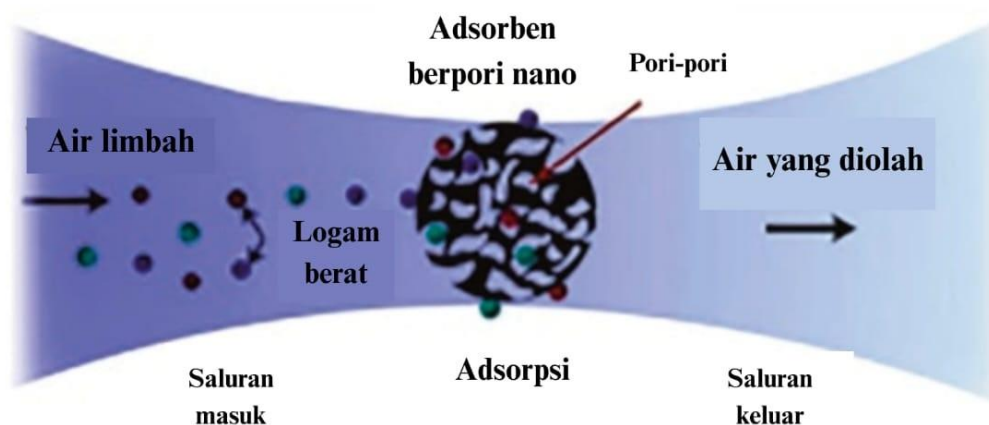
1. Mikroskopi Elektron (SEM, TEM): Mengamati struktur dan morfologi nanopartikel.
2. Spektroskopi (FTIR, UV-Vis): Menganalisis komposisi kimia dan struktur nanopartikel.
3. Analisis Ukuran Partikel (DLS): Mengukur ukuran dan distribusi nanopartikel.
4. X-Ray Diffraksi (XRD): Menganalisis struktur kristal nanopartikel dan lainnya.

3.4 Mekanisme *Green nanotechnology*

Nano partikel digunakan untuk mendegradasi atau menyerap logam berat dari lingkungan yang tercemar karena proses ini mendegradasi dan mengubah senyawa beracun menjadi zat tidak beracun seperti CO₂ dan H₂O. Proses ini difasilitasi dengan menggunakan bioagen di lokasi yang terkontaminasi (bioremediasi *in situ*) atau di bioreaktor (bioremediasi *ex situ*) untuk mendetoksifikasi senyawa beracun secara menyeluruh [33].

Di antara metode remediasi yang paling efektif dan umum, adsorpsi merupakan metode yang paling signifikan saat ini. Teknik yang digunakan dalam proses transisi fase massal ini adalah konsep penyerapan gas atau zat terlarut oleh permukaan cair atau padat. Bahan adsorpsi biasanya harus memiliki luas permukaan maksimum dan volume minimum [34]. Dalam proses adsorpsi, berbagai bahan dapat digunakan; namun, sifat fisik dan kimia zat terlarut dan juga permukaan padat memengaruhi efisiensi proses adsorpsi. Adsorpsi juga merupakan opsi yang menarik untuk mengurangi jumlah logam berat di lingkungan, yang dapat dengan mudah dicapai karena ketersediaan adsorben, biaya rendah, ramah lingkungan, dan efisiensi tinggi. Lebih jauh, kombinasi nanoteknologi dan adsorben telah dikembangkan selama beberapa dekade terakhir sebagai cabang penelitian baru [35].

Nanoadsorben adalah partikel anorganik atau organik berskala nano yang menyerap material lain karena sifatnya yang unik, seperti ukurannya yang kecil, luas permukaan yang besar, dan spesifisitas zat yang tinggi. Dibandingkan dengan adsorben tradisional, nanoadsorben telah dikembangkan untuk meningkatkan banyak karakteristik yang diinginkan, seperti selektivitas, kapasitas adsorpsi, dan daya tahan, untuk penggunaan skala besar. Adsorben yang memiliki pori-pori berukuran nano ketika dialiri oleh air limbah yang mengandung logam berat mengakibatkan logam berat akan menempel dan terperangkap pada pori-pori adsorben. Setelah melewati adsorben maka air yang keluar menjadi air yang bersih dari limbah logam berat [36].



Gambar 3. Penyerapan logam berat ke permukaan nano-sorben [37]

Ion logam berat hg, Cr, dan Pb beracun dari air yang terkontaminasi dapat diserap ke permukaan nano-sorben seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3. *Green Nanotechnology* memiliki keunggulan karena menggunakan bahan-bahan yang ramah lingkungan sehingga dapat mengurangi dampak-dampak negatif seperti: mengurangi limbah, mengurangi risiko kesehatan akibat senyawa beracun, mengurangi penggunaan bahan kimia berbahaya, dan mengurangi dampak-dampak negatif lainnya. Sehingga *Green Nanotechnology* dapat dijadikan alternatif berkelanjutan [37].

4. KESIMPULAN

Salah satu teknologi bioremediasi *Green Nanotechnology* merupakan teknologi berbasis nanopartikel yang terbuat di sintesis dari agen biologis seperti tanaman. *Green Nanotechnology* ini dapat menjadi alternatif bioremediasi bersumber daya hayati dimana hal ini menggunakan bahan ramah lingkungan, mengurangi limbah dan mengurangi bahan kimia berbahaya. Pada beberapa penelitian menunjukkan bahwa beberapa tanaman dapat di sintesis menjadi macam-macam nanopartikel untuk remediasi logam berat seperti Hg, Cr, dan Pb. Ukuran dari nanopartikel tersebut juga berbeda-beda sekitar 5 hingga 40 nm. Nanopartikel tersebut akan menyerap senyawa-senyawa toksik logam berat untuk mengurangi kontaminasi pada lingkungan yang tercemar. Bioremediasi berteknologi nano memiliki potensi yang tinggi untuk digunakan dalam teknologi pengolahan pencemaran pada permukaan air, air tanah, hingga air limbah. Hal tersebut dikarenakan produk nano yang di desain untuk menyaring dalam skala nano sehingga air mampu melewati saringan pada partikel nano namun molekul berukuran besar seperti bakteri dan virus serta produknya (toksin) akan tersaring pada partikel nano. Selain itu, kekuatan adsorpsi yang tinggi sehingga mampu menyerap ion logam berat di desain pada katalis dan penyaring.

5. DAFTAR REFERENSI

- [1] D. Y. Pratiwi, "Dampak Pencemaran Logam Berat (Timbal, Tembaga, Merkuri, Kadmium, Krom) Terhadap Organisme Perairan Dan Kesehatan Manusia," 2020. Accessed: Apr. 26, 2025. [Online]. Available: <https://jurnal.unpad.ac.id/akuatek/article/download/28135/13485>
- [2] M. Brodin, M. Vallejos, M. Opedal, M. C. Area, and G. Chinga Carrasco, "Lignocellulosics as sustainable resources for production of bioplastics - A review," *J Clean Prod*, vol. 162, Jun. 2017, doi: 10.1016/j.jclepro.2017.05.209.
- [3] Y. Yolanda, N. Amri Komarudin, A. Mawardin, and N. Andawesrari, "Formulasi pengelolaan pencemaran logam berat di perairan Pelabuhan Belawan," *Jurnal Ilmu Alam dan Lingkungan*, vol. 13, no. 2 (2022), Sep. 2022, Accessed: Apr. 25, 2025. [Online]. Available: <https://journal.unhas.ac.id/index.php/jai2/article/view/22402>
- [4] F. Mapelli et al., "Biotechnologies for Marine Oil Spill Cleanup: Indissoluble Ties with Microorganisms," *Trends Biotechnol*, vol. 35, May 2017, doi: 10.1016/j.tibtech.2017.04.003.
- [5] Md. Rizwan, M. Singh, C. K. Mitra, and R. K. Morve, "Ecofriendly Application of Nanomaterials: Nanobioremediation," *Journal of Nanoparticles*, vol. 2014, pp. 1-7, Jun. 2014, doi: 10.1155/2014/431787.
- [6] I. Cecchin, K. Reddy, A. Thom  , E. Tessaro, and F. Schnaid, "Nanobioremediation: Integration of nanoparticles and bioremediation for sustainable remediation of chlorinated organic contaminants in soils," *Int Biodeterior Biodegradation*, vol. 119, Oct. 2016, doi: 10.1016/j.ibiod.2016.09.027.
- [7] E. A. Cahyono, Sutomo, and A. Hartono, "Literatur Review : Panduan Penulisan Dan Penyusunan," *jurnal keperawatan*, 2019, Accessed: Apr. 25, 2025. [Online]. Available: <http://e-journal.lppmdianhusada.ac.id/index.php/jk/article/view/43>
- [8] E. Y. Ahn, H. Jin, and Y. Park, "Assessing the antioxidant, cytotoxic, apoptotic and wound healing properties of silver nanoparticles green-synthesized by plant extracts," *Materials Science and Engineering C*, vol. 101, pp. 204-216, Aug. 2019, doi: 10.1016/j.msec.2019.03.095.
- [9] D. Zhang, X. Ma, Y. Gu, H. Huang, and G. Zhang, "Green Synthesis of Metallic Nanoparticles and Their Potential Applications to Treat Cancer," *Front Chem*, vol. 8, Oct. 2020, doi: 10.3389/fchem.2020.00799.
- [10] H. Muhammad et al., "Green Synthesis of cobalt oxide nanoparticles for potential biological applications," *Mater Res Express*, vol. 7, Feb. 2020, doi: 10.1088/2053-1591/ab70dd.

- [11] P. K. Dikshit et al., "Green Synthesis of Metallic Nanoparticles: Applications and Limitations," *Catalysts*, vol. 11, pp. 1-37, Jul. 2021, doi: 10.3390/catal11080902.
- [12] H. Duan, D. Wang, and Y. Li, "Green Chemistry for Nanoparticle Synthesis," *Chem Soc Rev*, vol. 44, Jan. 2015, doi: 10.1039/c4cs00363b.
- [13] T. Widayatno, T. Yuliawati, and A. A. Susilo, "ADSORPSI LOGAM BERAT (Pb) DARI LIMBAH CAIR DENGAN ADSORBEN ARANG BAMBU AKTIF," *Jurnal Teknologi Bahan Alam*, vol. 1, no. 1, 2017, Accessed: Apr. 26, 2025. [Online]. Available: <https://journals.ums.ac.id/jtba/article/view/JTBA-0004>
- [14] F. Juharna, I. Widowati, and H. Endrawati, "Kandungan Logam Berat Timbal (Pb) Dan Kromium (Cr) Pada Kerang Hijau (*Perna viridis*) Di Perairan Morosari, Sayung, Kabupaten Demak," *Buletin Oseanografi Marina*, vol. 11, pp. 139-148, May 2022, doi: 10.14710/buloma.v11i2.41617.
- [15] A. Hakim, "Studi Penurunan Logam Berat Cu²⁺ dan Cd²⁺ dengan Menggunakan Limbah Kulit Pisang Kepok (*Musa Acuminata*)," *Jurnal Biosains Pascasarjana*, vol. 18, no. 1, pp. 24-34, 2016, doi: 10.20473/jbp.v18i1.2016.24-34.
- [16] S. Liang, Y. Jin, W. Liu, X. Li, S. Shen, and L. Ding, "Feasibility of Pb phytoextraction using nano-materials assisted ryegrass: Results of a one-year field-scale experiment," *J Environ Manage*, vol. 190, pp. 170-175, Apr. 2017, doi: 10.1016/j.jenvman.2016.12.064.
- [17] A. Lagashetty, S. Ganiger, P. K., S. Reddy, and M. Pari, "Microwave-assisted green synthesis, characterization and adsorption studies on metal oxide nanoparticles synthesized using *Ficus Benghalensis* plant leaf extracts," *New Journal of Chemistry*, vol. 44, Aug. 2020, doi: 10.1039/D0NJ01759K.
- [18] M. Arshadi, M. Karimi Abdolmaleki, F. Mousavinia, S. Foroughifard, and A. Karimzadeh, "Nano modification of NZVI with an aquatic plant *Azolla filiculoides* to remove Pb(II) and Hg(II) from water: Aging time and mechanism study," *J Colloid Interface Sci*, vol. 486, pp. 296-308, Jan. 2017, doi: 10.1016/j.jcis.2016.10.002.
- [19] Z. Xiao, M. Yuan, B. Yang, Z. Liu, J. Huang, and D. Sun, "Plant-mediated synthesis of highly active iron nanoparticles for Cr (VI) removal: Investigation of the leading biomolecules," *Chemosphere*, vol. 150, pp. 357-364, May 2016, doi: 10.1016/j.chemosphere.2016.02.056.
- [20] X. Xiao, Q. Wang, G. Owens, F. Chiellini, and Z. Chen, "Reduced graphene oxide/iron nanoparticles used for the removal of Pb (II) by one step green synthesis," *J Colloid Interface Sci*, vol. 557, pp. 598-607, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2019.09.058>.
- [21] R. Babu, P. Yugandhar, and N. Savithramma, "Synthesis, characterization and antimicrobial studies of bio silica nanoparticles prepared from *Cynodon dactylon* L.: a green approach," *Bulletin of Materials Science*, vol. 41, Jun. 2018, doi: 10.1007/s12034-018-1584-4.
- [22] O. Elmitwalli, O. Barakat, R. Daoud, S. Akhtar, and F. Henari, "Green synthesis of gold nanoparticles using cinnamon bark extract, characterization, and fluorescence activity in Au/eosin Y assemblies," *Journal of Nanoparticle Research*, vol. 22, Oct. 2020, doi: 10.1007/s11051-020-04983-8.
- [23] S. Geneti et al., "Biogenic Synthesis of Magnetite Nanoparticles Using Leaf Extract of *Thymus schimperi* and Their Application for Monocomponent Removal of Chromium and Mercury Ions from Aqueous Solution," *J Nanomater*, vol. 2022, pp. 1-15, Apr. 2022, doi: 10.1155/2022/5798824.
- [24] S. Sahoo, G. Panigrahi, A. Sahoo, A. Pradhan, and A. Dalbehera, "Bio-hydrothermal synthesis of ZnO-ZnFe₂O₄ nanoparticles using *Psidium guajava* leaf extract: Role in waste water remediation and plant immunity," *J Clean Prod*, vol. 318, p. 128522, Aug. 2021, doi: 10.1016/j.jclepro.2021.128522.

- [25] D. Sachan, A. Ramesh, and G. Das, "Green Synthesis of Silica Nanoparticles from Leaf Biomass and its application to Remove Heavy Metals from Synthetic Wastewater: A Comparative Analysis," *Environ Nanotechnol Monit Manag*, vol. 16, p. 100467, Apr. 2021, doi: 10.1016/j.enmm.2021.100467.
- [26] E. Khatiwora, V. Adsul, V. Arbale, S. Gaikwad, N. Deshpande, and R. Kashalkar, "SPECTROSCOPIC DETERMINATION OF TOTAL PHENOL AND FLAVONOID CONTENTS OF CITRUS LIMON PEEL FROM NORTH EASTERN REGION OF INDIA," *Journal of Drug Delivery and Therapeutics*, vol. 7, Jan. 2017, doi: 10.22270/jddt.v7i1.1368.
- [27] E. Zare, P. Makvandi, A. Borzacchiello, F. Tay, khadijeh Ashtari, and V. Padil, "Antimicrobial gum bio-based nanocomposites and their industrial and biomedical applications," *Chemical Communications*, vol. 55, Nov. 2019, doi: 10.1039/C9CC08207G.
- [28] A. A. Olajire and M. Aminat, "Bio-directed synthesis of gold nanoparticles using Ananas comosus aqueous leaf extract and their photocatalytic activity for LDPE degradation," *Advanced Powder Technology*, vol. 32, Jan. 2021, doi: 10.1016/j.appt.2021.01.009.
- [29] H. Abdul Salam, R. Periakaruppan, K. Murugesan, J. P, and S. Gunalan, "Plants: Green Route for Nanoparticle Synthesis," *International Research Journal of Biological Sciences*, vol. 1, pp. 85-90, Sep. 2012, Accessed: Apr. 26, 2025. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/230844426_Plants_Green_Route_for_Nanoparticle_Synthesis
- [30] V. Makarov et al., "'Green' Nanotechnologies: Synthesis of Metal Nanoparticles Using Plants," *Acta Naturae*, vol. 6, pp. 35-44, Mar. 2014, doi: 10.32607/20758251-2014-6-1-35-44.
- [31] K. X. Lee et al., "Green Synthesis of Gold Nanoparticles Using Aqueous Extract of *Garcinia mangostana* Fruit Peels," *J Nanomater*, vol. 2016, pp. 1-7, Sep. 2016, doi: 10.1155/2016/8489094.
- [32] A. Al Saqr et al., "Synthesis of gold nanoparticles by using green machinery: Characterization and in vitro toxicity," *Nanomaterials*, vol. 11, no. 3, pp. 1-14, Mar. 2021, doi: 10.3390/nano11030808.
- [33] M. Prado-Audelo, I. Garcia Kerdan, L. Escutia-Guadarrama, M. Reyna, J. Magaña, and G. Leyva-Gómez, "Nanoremediation: Nanomaterials and Nanotechnologies for Environmental Cleanup," *Front Environ Sci*, vol. 9, Dec. 2021, doi: 10.3389/fenvs.2021.793765.
- [34] A. Awasthi, P. Jadhao, and K. Kumari, "Clay nano-adsorbent: structures, applications and mechanism for water treatment," *SN Appl Sci*, vol. 1, Sep. 2019, doi: 10.1007/s42452-019-0858-9
- [35] M. Khajeh and K. Dastafkan, "Nanoadsorbents: Classification, Preparation, and Applications (with Emphasis on Aqueous Media)," *Chem Rev*, vol. 113, Jul. 2013, doi: 10.1021/cr400086v.
- [36] K. Demssie, F. Sabir, H. C. A. Murthy, G. Ayanie, M. Shume, and E. Tilahun, "Green Synthesis of Nanomaterials for Environmental Remediation," 2023, pp. 27-65. doi: 10.1007/978-3-031-30558-0_2.
- [37] S. Palanisamy, B. Subramaniam, S. Thangamuthu, S. Nallusamy, and P. Rengasamy, "Review on Agro-Based Nanotechnology through Plant-Derived Green Nanoparticles: Synthesis, Application and Challenges," *Journal of Environmental Science and Public Health*, vol. 05, Jan. 2021, doi: 10.26502/jesph.96120118.