

Mekanisme Fitoremediasi: Review

Phytoremediation Mechanisms: A Review

Geo Aghni Bintang Sukono¹, Farhan Rahmatullah Hikmawan¹, Evitasari¹, Dodi Satriawan^{1*}

^{1,2,3,4}Teknik Pengendalian Pencemaran Lingkungan, Politeknik Negeri Cilacap, Indonesia.

Email : ¹geoagghi300@gmail.com, ²farhanhikmawan27@gmail.com, ³evitasari2906@gmail.com,

⁴dodi.satriawan@pnc.ac.id

Direview : 10 Agustus 2020

Diterima : 25 Agustus 2020

Abstrak

Meningkatnya urbanisasi, industrialisasi, dan populasi berlebih adalah salah satu penyebab utama degradasi lingkungan dan polusi. Logam berat seperti Pb, Zn, Cd, As dan lainnya adalah salah satu polutan paling beracun yang menunjukkan efek berbahaya pada semua makhluk hidup. Timbal adalah salah satu polutan yang mengganggu rantai makanan dan mematikan bahkan pada konsentrasi rendah. Teknologi pemurnian yang digunakan untuk menghilangkan kontaminan dari air limbah tidak hanya sangat mahal tetapi juga menyebabkan dampak negatif pada ekosistem. Fitoremediasi, teknologi ramah lingkungan yang baik secara ekologis dan ekonomis merupakan alternatif yang menarik untuk metode pembersihan saat ini yang sangat mahal. Fitoremediasi merupakan teknologi remediasi in-situ yang memanfaatkan kemampuan yang melekat pada tumbuhan hidup. Fitoremediasi menggunakan tumbuhan untuk membersihkan pencemaran di lingkungan. Tanaman dapat membantu membersihkan berbagai jenis polusi termasuk logam, pestisida, bahan peledak, dan minyak. Ada Tiga mekanisme di mana tanaman dapat mempengaruhi massa kontaminan di tanah, sedimen, dan air. Yang pertama adalah fitoekstraksi juga disebut fitoakumulasi, yang mengacu pada serapan dan translokasi kontaminan logam di dalam tanah oleh akar tanaman ke bagian tanaman di atas tanah. Yang kedua rizofiltrasi terutama digunakan untuk memulihkan air tanah yang diekstraksi, air permukaan, dan air limbah dengan konsentrasi kontaminan rendah. Dan yang ketiga fitovolatilisasi yang melibatkan penggunaan tanaman untuk mengambil kontaminan dari tanah, mengubahnya menjadi bentuk yang mudah menguap dan memindahkannya ke atmosfer.

Kata kunci: fitoremediasi, fitoekstraksi, rizofiltrasi, fitovolatilisasi.

Abstract

Increasing urbanization, overpopulation, and industrialization are amongst the major lead of environmental degradation and pollution. Severe metals like Pb, Zn, Cd, As, etc. are among the highly harmful pollutants which fair harmful effects on all existing things. Lead is a pollutant that interferes with the food chain and is deadly even at low sedimentation. The purification technique used to wipe contaminants from wastewater is not only very scarce but also leads to a negative effect on the ecosystem. Phytoremediation, an environmentally friendly technique that is both ecologically and economically impression, is an appealing alternative to influx methods which are very scarce. Phytoremediation is an in-situ remediation technique that uses the inherent capability of living crops. Phytoremediation uses crops to clean up contaminants in the environment. Crops can help cleanse many types of contaminants including metals, pesticides, detonators, and oils. There are three ways in which crops can sway the mass of pollution in soil, sediment, water, and air. The first is phytoextraction also called phytoaccumulas, which refers to the uptake and translocation of metal contaminants in the soil by plant roots to above-ground plant parts. The second rizofiltration is mainly used to improve extracted groundwater, surface water, and low-contaminant wastewater. And the third is phytovolatilization which involves using plants to take contaminants from the soil, visit them into easy forms and transfer them to the atmosphere.

Keywords: phytoremediation, phytoextraction, rhizofiltration, phytovolatilization.

DOI : 10.35970/jppl.v2i2.360

Corresponding Author : geoagghi300@gmail.com, dodi.satriawan@pnc.ac.id

1. PENDAHULUAN

Tingkat polusi logam berat yang terpapar ke lingkungan, misalnya oleh limbah industri dan pupuk menyebabkan masalah serius di alam karena logam tersebut tidak dapat terurai secara alami atau hayati dan terakumulasi pada tingkat tinggi. Polusi logam berat adalah masalah global, meskipun tingkat keparahan dan tingkat polusi berbeda dari satu tempat ke tempat lain. Sedikitnya 20 logam diklasifikasikan sebagai limbah beracun dengan separuhnya dilepaskan ke lingkungan yang menimbulkan risiko besar bagi kesehatan manusia (Ashraf et al., 2019).

Logam berat yang umum ditemukan di lingkungan seperti Cd, Pb, Co, Zn dan Cr memiliki sifat fitotoksik baik pada konsentrasi rendah maupun konsentrasi sangat tinggi yang terdeteksi dalam air limbah (Rajkumar et al., 2012). Jika logam ini ada dalam sedimen, maka logam ini mencapai rantai makanan melalui tumbuhan dan hewan air. Dalam jumlah kecil, logam berat tertentu memiliki sifat positif berupa nutrisi penting untuk kehidupan lingkungan yang sehat, tetapi logam berat dalam jumlah besar dapat menyebabkan toksisitas akut atau kronis (keracunan).

Timbal merupakan salah satu logam berat yang sangat beracun yang tidak hanya terakumulasi secara individu tetapi juga memiliki kemampuan untuk mempengaruhi seluruh rantai makanan dan mengganggu sistem kesehatan manusia, hewan dan fitoplankton. Karenanya, treatment timbal yang tepat dari tanah dan air limbah industri sangat penting. Beberapa metode konvensional digunakan untuk menghilangkan timbal dari air limbah termasuk pengendapan kimiawi, pertukaran ion dan osmosis balik, dan lainnya (Antoniadis et al., 2017). Tetapi kelemahan utama dengan treatment tersebut adalah menghasilkan lumpur dalam jumlah besar dan mungkin proses yang tidak efektif atau mahal. Jadi, pencarian teknologi baru, sederhana, efektif dan ramah lingkungan yang melibatkan penghilangan logam berat beracun dari air limbah. Salah satu treatment yang dimaksud adalah fitoremediasi.

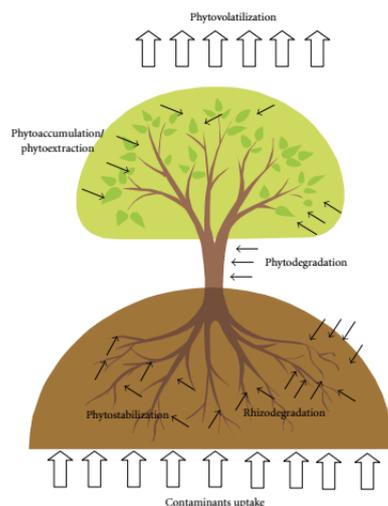
1.1. Fitoremediasi

Istilah umum fitoremediasi berasal dari bahasa Yunani yaitu *phyto* (tumbuhan), yang dilekatkan pada akar bahasa Latin *remedium* (untuk memperbaiki atau menghilangkan kejahatan) (Ali et al., 2013). Fitoremediasi adalah teknologi alternatif atau pelengkap yang dapat digunakan bersama dengan atau menggantikan teknologi pembersihan konvensional mekanis yang seringkali memerlukan input modal tinggi dan padat karya serta energi (Pandey et al., 2016).

Fitoremediasi merupakan teknologi remediasi in-situ yang memanfaatkan kemampuan yang melekat pada tumbuhan hidup (Manousaki & Kalogerakis, 2011; Wang et al., 2017). Ini juga merupakan teknologi pembersihan yang ramah lingkungan dan digerakkan oleh energi matahari, berdasarkan konsep menggunakan alam untuk membersihkan lingkungan. Kontaminasi tanah oleh tumpahan minyak merupakan masalah lingkungan yang menyebar luas yang seringkali membutuhkan pembersihan situs yang terkontaminasi (Glick, 2010)

Fitoremediasi adalah istilah luas yang digunakan sejak tahun 1991 untuk menggambarkan penggunaan tumbuhan untuk mengurangi volume, mobilitas, atau toksisitas kontaminan dalam tanah, air tanah, atau media terkontaminasi lainnya (Sood et al., 2012). Fitoremediasi menggunakan tumbuhan untuk membersihkan pencemaran di lingkungan. Tanaman dapat membantu membersihkan berbagai jenis polusi termasuk logam, pestisida, bahan peledak, dan minyak. Tanaman juga membantu mencegah angin, hujan, dan air tanah membawa polutan dari lokasi ke area lain (Antoniadis et al., 2017).

Fitoremediasi adalah teknologi in-situ non-destruktif dan hemat biaya yang dapat digunakan untuk membersihkan tanah yang terkontaminasi. Potensi teknologi ini di daerah tropis cukup tinggi karena kondisi iklim yang mendukung pertumbuhan tanaman dan merangsang aktivitas mikroba (Saier & Trevors, 2010).



Gambar 1. Mekanisme fitoremediasi tanaman dalam menyerap polutan (Tangahu *et al.*, 2011)

Selama setidaknya 300 tahun, kemampuan tanaman untuk menghilangkan kontaminan dari lingkungan telah dikenali dan dimanfaatkan dalam aplikasi seperti pengolahan limbah di lahan (Saier & Trevors, 2010). Seiring waktu, penggunaan tanaman ini telah berkembang menjadi pembangunan pengolahan lahan basah atau bahkan penanaman pohon untuk menangkal polusi udara. Dalam beberapa tahun terakhir, seiring dengan semakin meningkatnya pengakuan atas kerusakan yang diakibatkan di seluruh dunia dari dekade ekonomi industri dan penggunaan bahan kimia yang ekstensif, begitu pula minat untuk menemukan teknologi yang dapat mengatasi kontaminasi residual, di antaranya fitoremediasi (Aken *et al.*, 2010).

Penelitian dan penerapan fitoremediasi telah berkembang pesat selama 15 tahun terakhir. Fitoremediasi telah diimplementasikan sebagai komponen perbaikan yang dipilih di 18 lokasi Superfund di Amerika Serikat (Rahman & Hasegawa, 2011). Sejak 2001, *International Journal of Phytoremediation* telah diterbitkan setiap tiga bulan. Konferensi internasional yang berfokus pada pengolahan treatment fitoremediasi telah diselenggarakan sebanyak tujuh kali (Saier & Trevors, 2010). Dalam periode waktu yang sama ini, dana publik dan swasta telah disalurkan untuk penelitian di laboratorium, rumah kaca, dan skala lapangan untuk memahami mekanisme yang digunakan pada tanaman dalam mengatasi kontaminasi yang ada dan untuk menetapkan kinerja remediasi aktual berbagai spesies tanaman di berbagai media dan media kontaminan (Vamerali *et al.*, 2010). Tujuan dari tinjauan ini adalah untuk membahas berbagai mekanisme fitoremediasi dan potensinya sebagai teknik remediasi yang memanfaatkan kemampuan tanaman hidup yang sudah berumur panjang untuk menghilangkan polutan dari lingkungan tetapi belum menjadi teknologi yang tersedia secara komersial terutama di negara berkembang.

1.2. Mekanisme Fitoremediasi

Mekanisme dan efisiensi fitoremediasi bergantung pada jenis kontaminan, ketersediaan hayati dan sifat tanah (Li *et al.*, 2012). Ada beberapa cara tanaman membersihkan atau memulihkan area yang terkontaminasi. Penyerapan kontaminan pada tanaman terjadi terutama melalui sistem akar, di mana merupakan mekanisme utama untuk mencegah toksisitas. Sistem akar menyediakan luas permukaan yang sangat besar yang menyerap dan mengakumulasi air dan nutrisi penting untuk pertumbuhan bersama dengan kontaminan non-esensial lainnya (Ma *et al.*, 2011).

Tinjauan ini telah mengidentifikasi tiga mekanisme di mana tanaman dapat mentreatmen massa kontaminan di tanah, sedimen, dan air. Meskipun tumpang tindih atau kesamaan dapat diamati antara beberapa mekanisme ini, dan nomenklaturnya bervariasi, jurnal review ini mengacu pada tiga mekanisme fitoremediasi, masing-masing dijelaskan secara rinci di bawah. Masing-masing mekanisme ini akan

berdampak pada volume, mobilitas, atau toksisitas kontaminan, seperti yang dimaksudkan oleh penerapan fitoremediasi (Ali et al., 2013; Saier & Trevors, 2010; Wang et al., 2017).

1.2.1. Fitoekstraksi

Fitoekstraksi juga disebut fitoakumulasi, mengacu pada serapan dan translokasi kontaminan logam di dalam tanah oleh akar tanaman. Fitoekstraksi terutama digunakan untuk treatment tanah yang terkontaminasi (Glick, 2010). Untuk menghilangkan kontaminasi dari tanah, pendekatan ini menggunakan tanaman untuk menyerap, memusatkan, dan mengendapkan logam beracun dari tanah yang terkontaminasi ke dalam biomassa di atas tanah (pucuk, daun, dan anggota tumbuhan lainnya.). Ilustrasi dari metode ini ditunjukkan pada Gambar 1.

Penemuan spesies hiperakumulator logam menunjukkan bahwa tumbuhan berpotensi menghilangkan logam dari tanah yang terkontaminasi (Tangahu et al., 2011). Hiperakumulator adalah spesies tanaman yang mampu mengakumulasi logam 100 kali lebih banyak daripada tanaman tidak terakumulasi pada umumnya (Tangahu et al., 2011). Logam seperti nikel, seng dan tembaga adalah polutan yang mudah untuk dihilangkan dengan fitoekstraksi karena telah ditunjukkan bahwa logam tersebut disukai oleh sebagian besar tanaman yang menyerap dan menyerap sejumlah besar logam yang tidak biasa (Li et al., 2012).

Ada beberapa keuntungan dari fitoekstraksi (Sarma, 2011; Sarwar et al., 2017). Biaya fitoekstraksi cukup murah jika dibandingkan dengan metode konvensional. Selain itu kontaminan dapat dikurangi atau dihilangkan secara permanen dari tanah. Selanjutnya, jumlah polutan yang harus diserap secara substansial berkurang (hingga 95%) dan dalam beberapa kasus, kontaminan dapat didaur ulang dari biomassa tanaman yang terkontaminasi (Sarma, 2011; Sarwar et al., 2017).

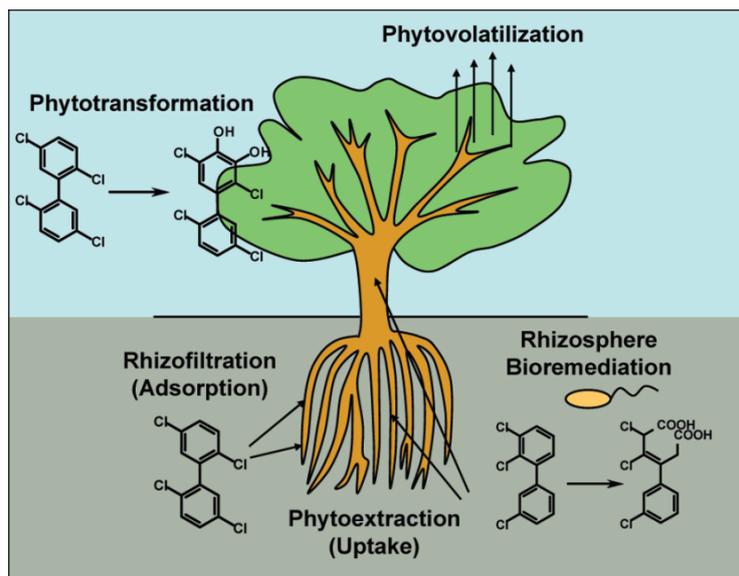
Penggunaan spesies hiperakumulator dibatasi oleh pertumbuhan lambat, sistem perakaran dangkal, dan produksi biomassa kecil. Selain itu, biomassa tanaman juga harus dipanen dan dibuang dengan benar sesuai dengan standar (Vamerali et al., 2010). Ada beberapa faktor yang membatasi luasnya fitoekstraksi logam antara lain ketersediaan hayati logam di dalam rizosfer, laju serapan logam oleh akar, proporsi logam yang tertambat di dalam akar, laju pemuatan xilem / translokasi ke pucuk, toleransi seluler terhadap logam beracun. Metode ini juga biasanya terbatas pada logam dan senyawa anorganik lainnya dalam tanah atau sedimen (Sarma, 2011).

Agar metode treatment ini memungkinkan, tanaman harus mengekstraksi logam berat dalam konsentrasi besar ke dalam akarnya, mentranslokasi logam berat ke dalam biomassa permukaan, dan menghasilkan biomassa tanaman dalam jumlah besar. Selain itu, tanaman remediatif harus memiliki mekanisme untuk mendetoksifikasi dan / atau mentolerir konsentrasi logam tinggi yang terakumulasi dalam tunasnya (Ma et al., 2011; Tangahu et al., 2011; Wang et al., 2017).

1.2.2. Rizofiltrasi

Rizofiltrasi terutama digunakan untuk memulihkan air tanah yang diekstraksi, air permukaan, dan air limbah dengan konsentrasi kontaminan rendah. Metode ini merupakan metode adsorpsi atau pengendapan ke akar tanaman atau penyerapan kontaminan dalam larutan yang mengelilingi zona akar (Wang et al., 2017). Rizofiltrasi biasanya dieksploitasi di air tanah (baik in situ atau diekstraksi), air permukaan, atau air limbah untuk menghilangkan logam atau senyawa anorganik lainnya (Vamerali et al., 2010). Rizofiltrasi dapat digunakan untuk Pb, Cd, Cu, Ni, Zn, dan Cr, yang tertahan di dalam akar (Vamerali et al., 2010). Ilustrasi dari metode ini ditunjukkan pada Gambar 2.

Rizofiltrasi mirip dengan fitoekstraksi, tetapi tanaman digunakan terutama untuk mengatasi air tanah yang terkontaminasi daripada tanah yang terkontaminasi (Gupta et al., 2013). Tanaman yang akan digunakan untuk pembersihan dibesarkan atau ditumbuhkan di rumah kaca dengan akarnya di air, bukan



Gambar 2. Mekanisme rizofiltrasi, fitotransformasi dan fitovolatilisasi tanaman dalam menyerap polutan (Aken *et.al*, 2010)

di tanah. Untuk menyesuaikan diri dengan tanaman dan setelah sistem perakaran besar dikembangkan, air yang terkontaminasi dikumpulkan dari tempat pembuangan limbah dan dibawa ke tanaman untuk menggantikan sumber air mereka (Gupta *et al.*, 2013).

Tanaman tersebut kemudian ditanam di area yang terkontaminasi di mana akarnya mengambil air dan kontaminan bersamanya. Saat akar menjadi jenuh dengan kontaminan, maka tanaman tersebut diambil atau dipanen (Gupta *et al.*, 2013). Bunga matahari, mustard India, tembakau, gandum hitam, bayam, dan jagung telah dipelajari karena kemampuannya menghilangkan timbal dari air, dengan bunga matahari memiliki kemampuan terbesar (Gupta *et al.*, 2013; Sood *et al.*, 2012; Vamerali *et al.*, 2010). Dalam sebuah penelitian, setelah satu jam treatment, bunga matahari mengurangi konsentrasi timbal secara signifikan (Gupta *et al.*, 2013).

Keuntungan pada metode rizofiltrasi adalah kemampuan untuk menggunakan tanaman darat dan air baik untuk aplikasi *in-situ* maupun *ex-situ*. Keuntungan lainnya adalah kontaminan tidak harus dipindahkan ke tunas. Dengan demikian, spesies selain hiperakumulator dapat digunakan. Tanaman terestrial lebih disukai karena memiliki sistem perakaran yang berserat dan lebih panjang sehingga meningkatkan jumlah luas perakaran (Gupta *et al.*, 2013; Sood *et al.*, 2012; Vamerali *et al.*, 2010).

Kekurangan dan keterbatasan pada metode ini berupa kebutuhan konstan untuk menyesuaikan pH, tanaman mungkin perlu ditanam terlebih dahulu di rumah kaca atau pembibitan; ada pemanenan berkala dan pembuangan tanaman; desain tangki harus direkayasa dengan baik; dan pemahaman yang baik tentang spesiasi / interaksi kimia diperlukan. (Gupta *et al.*, 2013; Sood *et al.*, 2012)

1.2.3. Fitovolatilisasi

Fitovolatilisasi melibatkan penggunaan tanaman untuk mengambil kontaminan dari tanah, mengubahnya menjadi bentuk yang mudah menguap dan memindahkannya ke atmosfer (Saier & Trevors, 2010). Fitovolatilisasi juga melibatkan kontaminan yang dibawa ke dalam tubuh tumbuhan, tetapi kemudian kontaminan yang memiliki bentuk yang mudah menguap, atau produk degradasi yang mudah menguap diangkut dengan uap air dari daun (Wang *et al.*, 2017). Fitovolatilisasi juga dapat menyebabkan difusi kontaminan dari batang atau bagian tanaman lain yang dilalui kontaminan sebelum mencapai daun (Tangahu *et al.*, 2011). Ilustrasi dari metode ini ditunjukkan pada Gambar 1 dan Gambar 2.

Fitovolatilisasi dapat terjadi dengan kontaminan yang ada di tanah, sedimen, atau air. Merkuri adalah kontaminan logam utama yang telah digunakan pada penelitian dengan menggunakan metode ini (Manousaki & Kalogerakis, 2011). Itu juga telah ditemukan terjadi dengan senyawa organik yang mudah menguap, termasuk trichloroethene, serta bahan kimia anorganik yang memiliki bentuk yang mudah menguap, seperti selenium, dan arsen (Wang et al., 2017).

Keuntungan dari metode ini adalah kontaminan berupa ion merkuri, dapat diubah menjadi zat yang kurang beracun (yaitu, unsur Hg) (Wang et al., 2017). Kerugiannya adalah bahwa merkuri yang dilepaskan ke atmosfer kemungkinan besar akan didaur ulang oleh presipitasi dan kemudian disimpan kembali ke danau dan lautan, mengurangi produksi metilmerkuri oleh bakteri anaerob (Saier & Trevors, 2010; Wang et al., 2017).

2. KESIMPULAN

Ada beberapa metode cara tanaman dalam mentretmen atau memulihkan area yang terkontaminasi. Untuk menghilangkan polutan dari tanah, sedimen dan / atau air dan udara, tanaman dapat mengurai, atau mendegradasi polutan organik dan menstabilkan kontaminan anorganik dengan bertindak sebagai filter atau adsorben. Keberhasilan fitoremediasi di lokasi tertentu tidak selalu dapat dikaitkan dengan hanya satu dari mekanisme ini karena kombinasi mekanisme mungkin lebih banyak digunakan oleh tanaman dalam mendegradasi senyawa polutan. Fitoremediasi adalah teknik pembersihan alami dan berbiaya rendah yang digerakkan oleh energi matahari, yang paling berguna di lokasi dengan tingkat kontaminasi yang rendah dan dangkal. Teknologi ini berguna untuk menangani berbagai macam kontaminan lingkungan dan efektif dalam beberapa kasus, sebagai pengganti metode treatment mekanis yang lainnya. Fitoremediasi memanfaatkan proses alami untuk membantu pembersihan polutan di lingkungan.

PENGHARGAAN

Kami ucapkan terimakasih sebesar-besarnya kepada SIMBELMAWA KEMENDIKBUT atas kesempatan yang diberikan kepada kami untuk mendapatkan hibah Program Kreativitas Mahasiswa (PKM) dengan kategori Penelitian pada tahun 2020. Dan juga yang terkhusus kami ucapkan banyak terimakasih dari dalam hati kami kepada Bapak Dodi Satriawan, S.T., M.Eng selaku dosen Teknik Pengendalian Pencemaran Lingkungan, Politeknik Negeri Cilacap, yang sangat berjasa dan sangat sabar dalam membimbing kami pada program PKM-P tahun 2020 ini. Semoga Allah membalas kebaikan yang melimpah kepada dosen pembimbing kami.

DAFTAR PUSTAKA

- Aken, B. Van, Correa, P. A., & Schnoor, J. L. (2010). Phytoremediation of Polychlorinated Biphenyls: New Trends and Promises †. *Environmental Science & Technology*, 44(8), 2767–2776. <https://doi.org/10.1021/es902514d>
- Ali, H., Khan, E., & Sajad, M. A. (2013). Phytoremediation of heavy metals—Concepts and applications. *Chemosphere*, 91(7), 869–881. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2013.01.075>
- Antoniadis, V., Levizou, E., Shaheen, S. M., Ok, Y. S., Sebastian, A., Baum, C., Prasad, M. N. V., Wenzel, W. W., & Rinklebe, J. (2017). Trace elements in the soil-plant interface: Phytoavailability, translocation, and phytoremediation—A review. *Earth-Science Reviews*, 171(June), 621–645. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2017.06.005>
- Ashraf, S., Ali, Q., Zahir, Z. A., Ashraf, S., & Asghar, H. N. (2019). Phytoremediation: Environmentally sustainable way for reclamation of heavy metal polluted soils. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 174(February), 714–727. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2019.02.068>
- Glick, B. R. (2010). Using soil bacteria to facilitate phytoremediation. *Biotechnology Advances*, 28(3), 367–374. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2010.02.001>
- Gupta, D. K., Huang, H. G., & Corpas, F. J. (2013). Lead tolerance in plants: strategies for phytoremediation. *Environmental Science and Pollution Research*, 20(4), 2150–2161. <https://doi.org/10.1007/s11356-012-1135-6>

013-1485-4

- Li, H.-Y., Wei, D.-Q., Shen, M., & Zhou, Z.-P. (2012). Endophytes and their role in phytoremediation. *Fungal Diversity*, 54(1), 11–18. <https://doi.org/10.1007/s13225-012-0165-x>
- Ma, Y., Prasad, M. N. V., Rajkumar, M., & Freitas, H. (2011). Plant growth promoting rhizobacteria and endophytes accelerate phytoremediation of metalliferous soils. *Biotechnology Advances*, 29(2), 248–258. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2010.12.001>
- Manousaki, E., & Kalogerakis, N. (2011). Halophytes—An Emerging Trend in Phytoremediation. *International Journal of Phytoremediation*, 13(10), 959–969. <https://doi.org/10.1080/15226514.2010.532241>
- Pandey, V. C., Bajpai, O., & Singh, N. (2016). Energy crops in sustainable phytoremediation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 54, 58–73. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.09.078>
- Rahman, M. A., & Hasegawa, H. (2011). Aquatic arsenic: Phytoremediation using floating macrophytes. *Chemosphere*, 83(5), 633–646. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2011.02.045>
- Rajkumar, M., Sandhya, S., Prasad, M. N. V., & Freitas, H. (2012). Perspectives of plant-associated microbes in heavy metal phytoremediation. *Biotechnology Advances*, 30(6), 1562–1574. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2012.04.011>
- Saier, M. H., & Trevors, J. T. (2010). Phytoremediation. *Water, Air, and Soil Pollution*, 205(S1), 61–63. <https://doi.org/10.1007/s11270-008-9673-4>
- Sarma, H. (2011). Metal Hyperaccumulation in Plants: A Review Focusing on Phytoremediation Technology. *Journal of Environmental Science and Technology*, 4(2), 118–138. <https://doi.org/10.3923/jest.2011.118.138>
- Sarwar, N., Imran, M., Shaheen, M. R., Ishaque, W., Kamran, M. A., Matloob, A., Rehman, A., & Hussain, S. (2017). Phytoremediation strategies for soils contaminated with heavy metals: Modifications and future perspectives. *Chemosphere*, 171(2016), 710–721. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2016.12.116>
- Sood, A., Uniyal, P. L., Prasanna, R., & Ahluwalia, A. S. (2012). Phytoremediation Potential of Aquatic Macrophyte, Azolla. *AMBIO*, 41(2), 122–137. <https://doi.org/10.1007/s13280-011-0159-z>
- Tangahu, B. V., Sheikh Abdullah, S. R., Basri, H., Idris, M., Anuar, N., & Mukhlisin, M. (2011). A Review on Heavy Metals (As, Pb, and Hg) Uptake by Plants through Phytoremediation. *International Journal of Chemical Engineering*, 2011, 1–31. <https://doi.org/10.1155/2011/939161>
- Vamerali, T., Bandiera, M., & Mosca, G. (2010). Field crops for phytoremediation of metal-contaminated land. A review. *Environmental Chemistry Letters*, 8(1), 1–17. <https://doi.org/10.1007/s10311-009-0268-0>
- Wang, L., Ji, B., Hu, Y., Liu, R., & Sun, W. (2017). A review on in situ phytoremediation of mine tailings. *Chemosphere*, 184, 594–600. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.06.025>