

A Review ; Optimalisasi Sisa Tanaman Hiperakumulator: Pemanfaatan dan Pengelolaan Biomassa Logam Berat Pasca-Fitoremediasi

Siti Jamilatun¹, Nurmustaqimah^{1*}, Erna Astuti¹, Aster Rahayu¹

Magister Teknik Kimia, Fakultas Teknologi Industri, Universitas Ahmad Dahlan, Jl. Ringroad Selatan, Tamanan, Bantul, Yogyakarta, 55166

*Corresponding Author: 2307054001@webmail.uad.ac.id

Abstrak

Urbanisasi dan industrialisasi yang pesat meningkatkan risiko polusi logam berat, mengakibatkan dampak ekologis yang merugikan dan klasifikasi sebagai polutan utama. Logam berat seperti kadmium, kromium, merkuri, arsenik, timbal, dan seng tidak dapat terurai secara alami, menyebabkan tanah tidak cocok untuk pertanian. Fitoremediasi, dengan menggunakan tanaman hiperakumulator, muncul sebagai solusi untuk mengatasi kontaminasi logam berat, tetapi menghadapi tantangan polusi sekunder dari pelepasan ulang kontaminan oleh biomassa tanaman. Review ini mengevaluasi metode perlakuan pasca-fitoremediasi, termasuk perlakuan panas (insinerasi, pirolisis, dan gasifikasi), ekstraksi (dengan agen seperti amonium asetat dan amonium oksalat), pengomposan, dan pemadatan. Meskipun perlakuan panas efektif dalam menghilangkan logam berat, diperlukan penelitian lebih lanjut mengenai efisiensi dan pemulihan logam berat. Pengomposan, meskipun mengurangi volume biomassa, memiliki risiko remobilisasi logam berat. Pemadatan, sebagai alternatif, melibatkan tekanan untuk memadatkan biomassa tanaman. Pemilihan metode perlakuan harus mempertimbangkan efisiensi, biaya, dan dampak lingkungan. Kesadaran akan potensi polusi sekunder dan pengelolaan limbah hasil dari perlakuan sangat penting untuk keberlanjutan upaya remediasi logam berat. Diperlukan penelitian lanjutan dalam pengembangan teknologi pasca-fitoremediasi dan pemantauan lingkungan untuk mendukung keberlanjutan upaya remediasi logam berat.

Kata kunci: Limbah, Biomassa, Logam berat, Lingkungan, Fitoremediasi

Abstract

Rapid urbanization and industrialization have escalated the risk of heavy metal pollution, resulting in detrimental ecological impacts and classification as a major pollutant. Heavy metals such as cadmium, chromium, mercury, arsenic, lead, and zinc cannot naturally degrade, rendering the soil unsuitable for agriculture. Phytoremediation, utilizing hyperaccumulator plants, emerges as a solution to address heavy metal contamination but faces challenges of secondary pollution from the re-release of contaminants by plant biomass. This review evaluates post-phytoremediation treatment methods, including heat treatments (incineration, pyrolysis, and gasification), extraction (using agents like ammonium acetate and ammonium oxalate), composting, and densification. Although heat treatments effectively remove heavy metals, further research is needed on efficiency and metal recovery. Composting, while reducing biomass volume, carries the risk of heavy metal remobilization. Densification, as an alternative, involves applying pressure to compact plant biomass and requires further research on efficiency and metal recovery. The selection of treatment methods should consider efficiency, cost, and environmental impact. Awareness of potential secondary pollution and waste management from treatments is crucial for the sustainability of heavy metal remediation efforts. Further research in developing post-phytoremediation technologies and environmental monitoring is needed to support the sustainability of heavy metal remediation endeavors.

Keywords: waste, Biomass, Heavy metal, Environmental, Phytoremediation

PENDAHULUAN

Dengan semakin cepatnya urbanisasi dan industrialisasi, polusi logam berat telah menjadi masalah yang semakin serius (Zeng et al., 2017). Di antara berbagai jenis polutan tanah, logam berat (HM) telah mendapatkan perhatian yang signifikan karena ekologis yang merugikan dan klasifikasi sebagai polutan utama oleh lembaga perlindungan lingkungan (J. Liu et al., 2023). HM seperti kadmium (Cd), kromium (Cr), merkuri (Hg), arsenik (As), timbal (Pb), dan seng (Zn), tidak dapat terurai secara hayati dan dapat bertahan di lingkungan untuk waktu yang lama; membuat tanah tidak cocok untuk budidaya (Shah & Daverey, 2020).

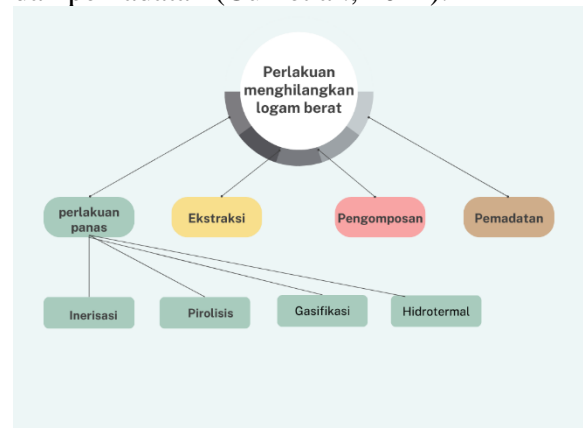
perlu dilakukan langkah-langkah remediasi untuk mencegah logam berat masuk ke dalam lingkungan darat, atmosfer, atmosfer, dan lingkungan akuatik, serta memitigasi lahan yang terkontaminasi (Hasan et al., 2019). Sejauh ini, ada berbagai pendekatan remediasi yang telah dikembangkan untuk mereklamasi tanah yang terkontaminasi logam berat. Langkah-langkah ini adalah terutama didasarkan pada teknik mekanis atau fisio-kimia, seperti pembakaran tanah, penggalian dan penimbunan, pencucian tanah pematatan, dan aplikasi medan listrik (DalCorso et al., 2019).

Fitoremediasi, sebagai solusi efisien dan ramah lingkungan untuk kontaminasi logam berat dalam air, melibatkan penggunaan tanaman hiperakumulator seperti makrofit dengan mekanisme seperti fitoekstraksi, rizofiltrasi, fitovolatilisasi, dan fitostabilisasi. Efisiensi fitoremediasi dipengaruhi oleh faktor-faktor seperti jenis tanaman, iklim, dan kondisi lingkungan. Meskipun memiliki keuntungan yang signifikan, tantangan utama adalah potensi polusi sekunder akibat pelepasan ulang kontaminan yang diserap oleh tanaman. Oleh karena itu, perhatian serius terhadap metode perlakuan pasca-fitoremediasi dan penanganan tanaman setelahnya sangat penting (Tan et al., 2023)

Fitoremediasi, menggunakan tanaman hijau untuk menghilangkan HMs dari tanah, sedimen dan air, menarik banyak perhatian para ilmuwan dan insinyur di seluruh dunia selama beberapa tahun terakhir. Keuntungan dari fitoremediasi dibandingkan dengan metode remediasi fisik dan kimiawi tradisional adalah biaya yang murah, kesederhanaan dan ramah lingkungan (Z. Liu et al., 2020).

Logam berat dan spesies tanaman sering yang sering digunakan dalam fitoremediasi tercantum dalam Tabel 1. Teknik fitoremediasi tradisional sering kali membutuhkan hiperakumulator dan peningkatan jumlah siklus tanaman, yang dapat diterapkan untuk lokasi yang rendah/ sedang rendah/ sedang, yang dapat diterapkan untuk lokasi yang terkontaminasi (Khalid et al., 2017). Baru-baru terdapat berbagai metode perawatan untuk hiperakumulator HM telah telah diselidiki, seperti TPA, pengomposan, pematatan, fitomining, dan termal (Cui et al., 2018)

Review ini membahas strategi penghilangan dan pemanfaatan biomassa tanaman yang mengandung logam berat setelah proses fitoremediasi, menggunakan beberapa metode perlakuan, seperti perlakuan panas, ekstraksi, pengomposan, dan pematatan (Cui et al., 2021).



Gambar 1. Berbagai perlakuan menghilangkan logam berat

1. Perlakuan Panas

Perlakuan panas adalah metode yang paling umum menggunakan energi panas untuk membuang tanaman yang terkontaminasi oleh HM dan mencakup insinerasi, pirolisis, dan gasifikasi, serta karbonisasi hidrotermal, pencairan, dan gasifikasi (Fu et al., 2021). teknis dari metode-metode ini sedikit berbeda, seperti yang ditunjukkan pada Tabel 1. Metode-metode tersebut adalah suhu insinerasi, pirolisis, dan gasifikasi biasanya lebih tinggi dari karbonisasi hidrotermal, pencairan, dan gasifikasi, yang membutuhkan lingkungan bertekanan (Tabel 1). Reaksi hidrotermal sering kali membutuhkan tekanan yang lebih

tinggi dibandingkan dengan insinerasi, pirolisis, dan gasifikasi (Tabel 1). Pirolisis dilakukan dalam lingkungan yang lambat atmosfer, tetapi insinerasi dan gasifikasi dilakukan di bawah kondisi oksidatif (Cui, Zhang, Wang, Pan, Lin, Khan, Yan, Li, He, & Yang, 2021). Media hidrotermal karbonisasi

dan pencairan hidrotermal adalah air subkritis, namun, media gasifikasi hidrotermal adalah air superkritis (Tabel 1). Karbonisasi hidrotermal biasanya membutuhkan pemanasan paling lama.

Tabel 1. Parameter teknis dari berbagai metode perlakuan panas

Heat treatment method	Plants with HMs	Device	Heating temperature(°C)	Heating time(min)	Medium	Gas flow	Ref
Incineration	<i>Leersia hexandra Swartz (Cr)</i>	Tube furnace	350–800	15–45	O ₂	0.12	(Wen et al., 2018)
	<i>Ryegrass (Cd, Pb, Zn)</i>	Tube furnace	600–900	10	O ₂	3.33	(Zhu et al., 2019)
Pirolisis	<i>Brassica juncea (Zn, Pb, Cd)</i>	Tube furnace	350–750	60	N ₂	0.2	(Wen et al., 2018)
	<i>Willow (Cu, Ni)</i>	furnace	350	5	Ar	9	(Z. Liu et al., 2019)
Gasifikasi	<i>Sedum alfredii (Zn, Cd, Pb)</i>	Fixed bed	400–900	30	CO ₂	0.3	(Duan et al., 2017)
	<i>Sedum plumbizincicola (Zn, Cd, Pb),</i>	gasifier	300–900	/	Air, CO ₂ , N ₂	0.3	(Cui et al., 2018)
Hydrothermal carbonization	<i>Rice straw (with no HMs)</i>	High pressure reactor	190–250	60–360	Subcritical water	Saturated pressure	(Dai et al., 2014)
	<i>Hydrocotyle verticillata, Myriophyllum spicatum, Canna indica (with no HMs)</i>	High pressure reactor	200-260	120	Subcritical water	Saturated pressure	(Cui et al., 2020)
Hydrothermal liquefaction	<i>Phytolacca americana L. (Mn, Cr, Zn)</i>	High pressure reactor	320–380	30	Supercritical water	High pressure	(Jian-guang et al., 2014)

	<i>Sedum plumbizincicola</i> (Zn)	High pressure reactor	190–310	120	Supercritical water	High pressure	(Qian et al., 2018)
Hydrothermal gasifikasi	Timothy grass (with no HMs)	High pressure reactor	450–650	15-45	Supercritical water	High pressure	(Jian-guang et al., 2014)
	<i>Pteris vittata</i> L. (As, Cd, Pb, Zn)	High pressure reactor	395–445	10-40	Supercritical water	High Pressure	(Li et al., 2018)

1.1. Gasifikasi

Selama gasifikasi, padatan yang dipanaskan hingga suhu tertentu diubah menjadi gas, yang merupakan campuran CO, H₂, dll. Biasanya, zat gas reaktif (misalnya uap, udara, CO₂) digunakan selama gasifikasi untuk membentuk arang, abu, dan tar (Situmorang et al., 2020). Dibandingkan dengan insinerasi, maka lingkungan terbatas oksigen dalam gasifier menahan generasi polutan udara yang dihasilkan di insinerator. Lebih penting lagi, gasifikasi fikasi dapat mendukung produksi syngas dan produk padat bernilai tambah padat bernilai tambah (biochar) (Lee et al., 2017). proses gasifikasi berhasil diterapkan untuk membuang hyper-akumulator (*Sedum alfredii*) dan memproduksi biochar serta syngas. Volatilisasi logam berat seperti Zn, Cd, dan Pb berhasil ditingkatkan dengan sukses melalui pengaturan suhu gasifikasi yang tinggi dan atmosfer yang bersifat reduksi. Suhu di atas 800 °C dengan pasokan N₂ terbukti sebagai kondisi optimal untuk pemisahan logam berat (Cui et al., 2018).

1.2. Inerisasi

Insinerasi melibatkan reaksi oksidasi dan pembakaran bertekanan tinggi antara udara paksa dan residu fitoremediasi yang mengandung HM. Biomassa tanaman ini akan terkonsentrasi di dalam residu

insinerasi (abu, dll.) Dengan demikian, volume biomassa akan berkurang.

Proses ini dapat dibagi menjadi tiga tahap (Wu et al., 2021). Pada tahap awal, air dari tanaman menguap sepenuhnya pada suhu antara suhu kamar dan 185 °C. Selama tahap kedua, berat tanaman menurun secara signifikan karena selulosa dan hemiselulosa terurai pada suhu antara 185 hingga 400 °C. Pada tahap terakhir, karbon dalam tanaman terus terurai pada suhu antara 400 hingga 697 °C, meskipun penurunan berat badan mulai melambat. Panas yang dihasilkan dari proses insinerasi dapat digunakan kembali untuk aplikasi lain, seperti pembangkit listrik.

suhu insinerasi yang lebih tinggi bermanfaat untuk mengurangi kapasitas pelindian Cd. (Zhu et al., 2019).

1.3. Pirolisis

Pirolisis didefinisikan sebagai penguraian anaerobik biomassa tanaman pada suhu tinggi. Produk akhir pirolisis biomassa termasuk bio-minyak, biochar dan gas pirolisis (campuran H₂, CO₂ dan CO) yang bervariasi sesuai dengan parameter seperti suhu dan waktu (Tayibi et al., 2021). Hingga saat ini, ada total empat jenis pirolisis yang dikenal sebagai lambat, menengah, cepat, dan kilat (Cui et al., 2021). Pirolisis lambat biasanya memiliki kisaran suhu sedang antara 300 hingga 700 °C, waktu pemanasan yang lama antara 5 hingga 720 menit dan menghasilkan biochar sebagai produk akhir. Sebaliknya, pirolisis cepat

memiliki suhu yang sangat tinggi (antara 400 hingga 800 °C), waktu tinggal yang relatif singkat sekitar 5 detik atau di bawahnya serta bio-minyak sebagai produk akhir (Alcazar-Ruiz et al., 2022)

1.4. Modifikasi hidrotermal

Modifikasi hidrotermal adalah teknologi yang menggunakan air superkritis atau subkritis untuk mengubah biomassa menjadi bahan bakar bernilai kalori tinggi dalam autoklaf (Ahmad et al., 2021). HTC biasanya dilakukan pada kisaran suhu sedang (160 hingga 260 °C) dan tekanan jenuh antara 2 hingga 10 MPa. Proses ini melibatkan konversi biomassa tanaman menjadi padatan hidrokarbon berkarbon. Pengurangan berat biomassa tanaman yang diproses oleh HTC lebih rendah daripada insinerasi, pirolisis dan proses gasifikasi. Selain itu, sifat dan hasil hidrokarbon sangat tergantung pada kondisi reaksi (suhu dan tekanan) serta jenis bahan baku. Sebagai contoh, hasil hidrokarbon dapat berkurang dari 46,5% hingga 22,8% dengan peningkatan suhu dari 200°C hingga 260°C (Zhang et al., 2020).

tanaman akumulator dengan kadar air yang tinggi. (Lee & Park, 2021) menyatakan bahwa konsentrasi Cd, Cu, Ni, Pb dan Zn dalam hidrokarbon mengalami penurunan dibandingkan dengan biomassa mentah bunga matahari setelah perlakuan HTC. Selain itu, karena HM tidak terurai tetapi diubah menjadi bentuk tidak stabil selama HTC, HM yang dipisahkan dari biomassa bunga matahari tetap berada dalam fase cair.

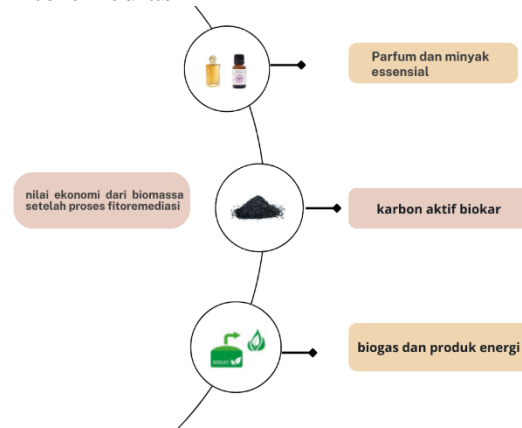
2. Ekstraksi

Perlakuan ekstraksi residu fitoremediasi melibatkan penghilangan logam berat dengan menggunakan agen ekstraksi seperti amonium asetat, amonium oksalat, asam sulfat, dan air murni. Namun, pengurangan berat dari biomassa tanaman hiperakumulator dengan metode ekstraksi lebih rendah dibandingkan dengan metode perlakuan panas (Deng, 2018). Sebelum

sebelum perlakuan ekstraksi, residu fitoremediasi dapat dikompresi untuk memeras cairan atau dipanaskan untuk memekatkan logam berat di dalam cairan yang diperas atau biomassa yang dipanaskan. Menurut (Song et al., 2021), logam berat logam yang mengandung cairan perasan residu fitoremediasi harus diolah terlebih dahulu sebelum melanjutkan ke ekstraksi metode.

Dibandingkan dengan metode ekstraksi berbasis pelarut konvensional yang memiliki efisiensi ekstraksi rendah dan keamanan, metode ekstraksi baru memiliki sejumlah keunggulan seperti hemat energi, efektivitas tinggi dan ramah lingkungan. Metode ekstraksi baru ini meliputi ekstraksi gelombang mikro, ekstraksi ultrasonik, semi bionik ekstraksi serta ekstraksi elektrokimia (Molaey et al., 2021). Sebagai contoh, (Delil et al., 2020), mampu memulihkan Cd dan Pb dari lobak (*Brassica napus*) dan kedelai (*Glycine max*) dengan menggunakan ekstraksi elektrokimia pendekatan elektrokimia. Dalam percobaan mereka, mereka mampu memperoleh tingkat pemulihan 80% Cd dan 94% Pb, serta 97% Cd dan 99% Pb dari rapeseed dan kedelai, masing-masing.

Berikut merupakan berbagai produk hasil pemanfaatan biomassa setelah proses fitoremediasi



Gambar 2. Skema pemanfaatan biomassa setelah proses fitoremediasi

3. Pengomposan

Pengomposan adalah metode pengolahan konversi biokimia yang diterapkan untuk memusatkan bagian yang diperkaya logam berat dari biomassa tanaman pasca fitoremediasi dengan mengurangi volume dan berat biomassa tanaman melalui pencernaan yang dapat mengurangi biaya transportasi. Meskipun metode pengolahan ini membutuhkan energi yang relatif rendah dan telah banyak diterapkan dalam pengolahan limbah pertanian untuk waktu yang lama, metode ini masih rentan terhadap remobilisasi logam berat yang terserap oleh aksi mikroorganisme alami serta menghasilkan limbah padat (lindi) yang membutuhkan yang tepat untuk menghindari risiko pelindian logam berat (Viaene et al., 2016). Selanjutnya, lindi yang mengandung logam berat Selanjutnya, lindi yang mengandung logam berat harus dipadatkan lebih lanjut menjadi kompos atau bahan organik kering lainnya yang dapat digunakan untuk mengatasi mengatasi defisiensi nutrisi melalui biofortifikasi makanan (Muthusaravanan et al., 2020).

Menurut (Edgar et al., 2021), pengomposan dapat dikombinasikan dengan metode perlakuan termal untuk mengatasi kekurangan dari hanya menggunakan perlakuan pengomposan dalam penanganan tanaman pasca fitoremediasi. Namun, ada trade-off karbon yang hilang selama proses pengomposan yang berkontribusi pada hilangnya energi untuk proses hulu. proses hulu Sebagai alternatif, pengomposan dan pemulihan biogas dapat diterapkan pada pabrik pasca fitoremediasi biomassa, tetapi akumulasi dan biodegradabilitas yang berbeda pada spesies tanaman yang berbeda dapat mengatur berat akhir konsentrasi logam berat akhir dan jumlah hasil biogas (Bernal et al., 2019)

4. Pematatan

Pematatan, juga dikenal sebagai proses paletisasi, adalah pendekatan alternatif yang digunakan untuk memecahkan masalah pembuangan tanaman yang terkontaminasi

yang melibatkan penerapan tekanan untuk memadatkan biomassa tanaman yang terkontaminasi dan selanjutnya pengumpulan lindi secara terpisah. Karena proses pemadatan biasanya melibatkan interaksi kompleks antara partikel yang dapat sangat bervariasi dengan spesies tanaman yang berbeda, ukuran, bentuk, komposisi kimia, kepadatan partikel dan curah, oleh karena itu data terkait dan hasil eksperimen masih jarang (Kovacs & Szemmelveisz, 2017). Selain itu, produk akhir partikulat dari proses pemadatan juga mengandung sejumlah besar logam berat yang tentunya memerlukan pengolahan lebih lanjut sebagai limbah berbahaya limbah B3 di fasilitas pembuangan yang tepat. Selain itu, ada juga kurangnya studi penilaian tentang pemulihan logam berat yang berharga dari lindi yang dikumpulkan dari pemadatan biomassa tanaman yang terkontaminasi (Oladoye et al., 2022)

5. Kesimpulan

Berdasarkan hasil review dapat disimpulkan bahwa Fitoremediasi dengan menggunakan tanaman hiperakumulator telah terbukti sebagai solusi efisien dan ramah lingkungan untuk mengatasi kontaminasi logam berat. Meskipun memiliki keunggulan biaya murah dan kesederhanaan, fitoremediasi juga menghadapi tantangan, terutama potensi polusi sekunder dari pelepasan ulang kontaminan yang diserap oleh tanaman. Metode perlakuan pasca-fitoremediasi yang dibahas melibatkan perlakuan panas, ekstraksi, pengomposan, dan pemadatan. Perlakuan panas seperti insinerasi, pirolisis, dan gasifikasi memiliki parameter teknis yang berbeda. Ekstraksi residu fitoremediasi menggunakan agen ekstraksi dengan keunggulan hemat energi dan efektivitas tinggi. Pengomposan bertujuan mengurangi volume biomassa, namun, masih rentan terhadap remobilisasi logam berat dan menghasilkan limbah padat. Pemilihan metode perlakuan harus mempertimbangkan

efisiensi, biaya, dan dampak lingkungan. Perhatian serius terhadap potensi polusi sekunder dan pengelolaan limbah hasil menjadi kunci. Diperlukan penelitian lebih lanjut untuk meningkatkan efisiensi dan

pemulihan logam berat, serta pengembangan teknologi pasca-fitoremediasi dan pemantauan lingkungan guna mendukung keberlanjutan upaya remediasi logam berat.

DAFTAR PUSTAKA

- Bernal, M. P., Gómez, X., Chang, R., Arco-Lázaro, E., & Clemente, R. (2019). Strategies for the use of plant biomass obtained in the phytostabilisation of trace-element-contaminated soils. *Biomass and Bioenergy*, *126*, 220–230.
- Cui, X., Lu, M., Khan, M. B., Lai, C., Yang, X., He, Z., Chen, G., & Yan, B. (2020). Hydrothermal carbonization of different wetland biomass wastes: Phosphorus reclamation and hydrochar production. *Waste Management*, *102*, 106–113.
- Cui, X., Shen, Y., Yang, Q., Kawi, S., He, Z., Yang, X., & Wang, C.-H. (2018). Simultaneous syngas and biochar production during heavy metal separation from Cd/Zn hyperaccumulator (*Sedum alfredii*) by gasification. *Chemical Engineering Journal*, *347*, 543–551.
- Cui, X., Zhang, J., Wang, X., Pan, M., Lin, Q., Khan, K. Y., Yan, B., Li, T., He, Z., & Yang, X. (2021). A review on the thermal treatment of heavy metal hyperaccumulator: Fates of heavy metals and generation of products. *Journal of Hazardous Materials*, *405*, 123832.
- Cui, X., Zhang, J., Wang, X., Pan, M., Lin, Q., Khan, K. Y., Yan, B., Li, T., He, Z., Yang, X., & Chen, G. (2021). A review on the thermal treatment of heavy metal hyperaccumulator: Fates of heavy metals and generation of products. *Journal of Hazardous Materials*, *405*, 123832. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.123832>
- Dai, L., Wu, B., Tan, F., He, M., Wang, W., Qin, H., Tang, X., Zhu, Q., Pan, K., & Hu, Q. (2014). Engineered hydrochar composites for phosphorus removal/recovery: lanthanum doped hydrochar prepared by hydrothermal carbonization of lanthanum pretreated rice straw. *Bioresource Technology*, *161*, 327–332.
- DalCorso, G., Fasani, E., Manara, A., Visioli, G., & Furini, A. (2019). Heavy metal pollutions: state of the art and innovation in phytoremediation. *International Journal of Molecular Sciences*, *20*(14), 3412.
- Delil, A. D., Köleli, N., Dağhan, H., & Bahçeci, G. (2020). Recovery of heavy metals from canola (*Brassica napus*) and soybean (*Glycine max*) biomasses using electrochemical process. *Environmental Technology & Innovation*, *17*, 100559.
- Deng, Z., Y. J., L. J., Z. X. (2018). Removal of heavy metals and upgrading crude bio-oil from *Phytolacca Americana* L. harvest using hydrothermal upgrading process. *Chin. J. Environ*, 3919–3926.
- Duan, L., Li, X., Jiang, Y., Lei, M., Dong, Z., & Longhurst, P. (2017). Arsenic transformation behaviour during thermal decomposition of *P. vittata*, an arsenic hyperaccumulator. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, *124*, 584–591.
- Edgar, V.-N., Fabián, F.-L., Mario, P.-C. J., & Ileana, V.-R. (2021). Coupling plant biomass derived from phytoremediation of potential toxic-metal-polluted soils to bioenergy production and high-value by-products—A review. *Applied Sciences*, *11*(7), 2982.

- Fu, Y., You, S., & Luo, X. (2021). A review on the status and development of hyperaccumulator harvests treatment technology. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 634(1), 012113.
- Hasan, Md. M., Uddin, Md. N., Ara-Sharmeen, I., F. Alharby, H., Alzahrani, Y., Hakeem, K. R., & Zhang, L. (2019). Assisting Phytoremediation of Heavy Metals Using Chemical Amendments. *Plants*, 8(9), 295.
<https://doi.org/10.3390/plants8090295>
- Jian-guang, Y., Zi-xiang, D., Jun-yuan, L., & Xu-liang, Z. (2014). Removal of Heavy Metals and Upgrading Crude Bio-Oil from *Pteris Vittata* Stems and Leaves Harvest Using Hydrothermal Upgrading Process. *EPD Congress 2014*, 137–149.
- Khalid, S., Shahid, M., Niazi, N. K., Murtaza, B., Bibi, I., & Dumat, C. (2017). A comparison of technologies for remediation of heavy metal contaminated soils. *Journal of Geochemical Exploration*, 182, 247–268.
- Kovacs, H., & Szemmelveisz, K. (2017). Disposal options for polluted plants grown on heavy metal contaminated brownfield lands—a review. *Chemosphere*, 166, 8–20.
- Li, J., Chen, J., & Chen, S. (2018). Supercritical water treatment of heavy metal and arsenic metalloids-bioaccumulating-biomass. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 157, 102–110.
- Liu, J., Kang, H., Tao, W., Li, H., He, D., Ma, L., Tang, H., Wu, S., Yang, K., & Li, X. (2023). A spatial distribution–Principal component analysis (SD-PCA) model to assess pollution of heavy metals in soil. *Science of The Total Environment*, 859, 160112.
- Liu, Z., Chen, B., Wang, L., Urbanovich, O., Nagorskaya, L., Li, X., & Tang, L. (2020). A review on phytoremediation of mercury contaminated soils. *Journal of Hazardous Materials*, 400, 123138.
- Liu, Z., Lu, B., He, B., Li, X., & Wang, L. (2019). Effect of the pyrolysis duration and the addition of zeolite powder on the leaching toxicity of copper and cadmium in biochar produced from four different aquatic plants. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 183, 109517.
- Molaey, R., Yesil, H., Calli, B., & Tugtas, A. E. (2021). Enhanced heavy metal leaching from sewage sludge through anaerobic fermentation and air-assisted ultrasonication. *Chemosphere*, 279, 130548.
- Muthusaravanan, S., Sivarajasekar, N., Vivek, J. S., Vasudha Priyadharshini, S., Paramasivan, T., Dhakal, N., & Naushad, M. (2020). Research updates on heavy metal phytoremediation: enhancements, efficient post-harvesting strategies and economic opportunities. *Green Materials for Wastewater Treatment*, 191–222.
- Oladoye, P. O., Olowe, O. M., & Asemoloye, M. D. (2022). Phytoremediation technology and food security impacts of heavy metal contaminated soils: A review of literature. *Chemosphere*, 288, 132555.
- Qian, F., Zhu, X., Liu, Y., Shi, Q., Wu, L., Zhang, S., Chen, J., & Ren, Z. J. (2018). Influences of temperature and metal on subcritical hydrothermal liquefaction of hyperaccumulator: implications for the recycling of hazardous hyperaccumulators. *Environmental Science & Technology*, 52(4), 2225–2234.
- Shah, V., & Daverey, A. (2020). Phytoremediation: A multidisciplinary approach to clean up heavy metal contaminated soil. *Environmental Technology & Innovation*, 18, 100774.

- Song, Q., Sun, Z., Chang, Y., Zhang, W., Lv, Y., Wang, J., Sun, F., Ma, Y., Li, Y., & Wang, F. (2021). Efficient degradation of polyacrylate containing wastewater by combined anaerobic–aerobic fluidized bed bioreactors. *Bioresource Technology*, *332*, 125108.
- Tan, H. W., Pang, Y. L., Lim, S., & Chong, W. C. (2023). A state-of-the-art of phytoremediation approach for sustainable management of heavy metals recovery. *Environmental Technology & Innovation*, *30*, 103043.
- Viaene, J., Van Lancker, J., Vandecasteele, B., Willekens, K., Bijttebier, J., Ruyschaert, G., De Neve, S., & Reubens, B. (2016). Opportunities and barriers to on-farm composting and compost application: A case study from northwestern Europe. *Waste Management*, *48*, 181–192.
- Wen, X. B., Zhang, X. H., & Liu, J. (2018). A comparative study on the disposal of harvested products of Cr hyper-accumulator *Leersia hexandra* Swartz by incineration and pyrolysis. *J. Industrial Safety and Environmental Protection*, *44*(03), 73–77.
- Zeng, G., Wan, J., Huang, D., Hu, L., Huang, C., Cheng, M., Xue, W., Gong, X., Wang, R., & Jiang, D. (2017). Precipitation, adsorption and rhizosphere effect: the mechanisms for phosphate-induced Pb immobilization in soils—a review. *Journal of Hazardous Materials*, *339*, 354–367.
- Zhu, Z., Huang, Y., Zha, J., Yu, M., Liu, X., Li, H., & Zhu, X. (2019). Emission and retention of cadmium during the combustion of contaminated biomass with mineral additives. *Energy & Fuels*, *33*(12), 12508–12517.