

Pengelolaan Dan Pemanfaatan Biomassa Yang Terkontaminasi Pasca-Fitoremediasi: A Review

Lukman Hakim¹, Aster Rahayu^{1*}, Siti Jamilatun¹

¹Departemen Magister Teknik Kimia, Fakultas Teknologi Industri, Universitas Ahmad Dahlan, Jl. Jend. Ahmad Yani, Banguntapan, Bantul, 55166, Indonesia.

*Corresponding Author: aster.rahayu@che.uad.ac.id

ABSTRAK

Fitoremediasi hadir sebagai teknologi yang menjanjikan untuk mengurangi permasalahan pencemaran air dan tanah. Fitoremediasi terbukti menjadi teknologi yang ekonomis dan ramah lingkungan. Namun, teknik fitoremediasi menyumbangkan sejumlah besar bahan yang terkontaminasi ke lingkungan dan menciptakan masalah polusi lebih lanjut. Biomassa yang dihasilkan pasca-fitoremediasi cukup banyak dan akan menjadi limbah biologis yang tergolong kedalam limbah berbahaya dan beracun. Oleh karena itu harus dikelola dan dilakukan penanganan yang tepat. Review paper ini akan mengulas metode metode pemanfaatan biomassa pasca-fitoremediasi. Penelitian yang telah dilakukan mengenai konversi biomassa menjadi bioenergi dan kompos dinilai cukup efektif dan efisien. Selain itu metode ini juga akan meningkatkan nilai ekonomis biomassa tanaman pasca fitoremediasi. Kemudian metode pemadatan dinilai memang lebih ekonomis namun menghasilkan residu kontaminan yang harus dilakukan pengolahan kembali. Sintesis nanomaterial dari biomassa yang terkontaminasi juga dapat menjadi alternatif namun metode ini sangat rumit dan cukup mahal. Perlu dilakukan penelitian lebih lanjut dan juga *life cycle assessment* untuk dapat memilih teknologi yang tepat dan efisien dalam pengelolaan biomassa serta peninjauan efek yang dihasilkan pasca-fitoremediasi yang bertujuan untuk mengimplementasikan teknologi fitoremediasi yang ramah lingkungan dan berkelanjutan.

Kata kunci: Biomassa; Fitoremediasi; Keberlanjutan; Pasca-Fitoremediasi.

ABSTRACT

Phytoremediation is a promising technology to reduce water and soil pollution problems. Phytoremediation has proven to be an economical and environmentally friendly technology. However, phytoremediation techniques contribute a large amount of contaminated materials to the environment and create further pollution problems. The biomass produced after phytoremediation is quite a lot and will become biological waste which is classified as hazardous and toxic waste. Therefore, it must be managed and handled properly. This review paper will review the methods of utilizing biomass after phytoremediation. Research that has been done on the conversion of biomass into bioenergy and compost is considered quite effective and efficient. In addition, this method will also increase the economic value of plant biomass after phytoremediation. Then the compaction method is considered more economical but produces contaminant residues that must be reprocessed. Synthesis of nanomaterials from contaminated biomass can also be an alternative, but this method is very complicated and quite expensive. Further research and life cycle assessment are needed to be able to choose the right and efficient technology in biomass management and review the effects produced after phytoremediation which aims to implement environmentally friendly and sustainable phytoremediation technology.

Keywords: Biomass; Phytoremediation; Sustainability; Pasca-Phytoremediation.

1. PENDAHULUAN

Dewasa ini fitoremediasi telah menjadi alternatif pengolahan limbah yang digunakan untuk mengatasi masalah pencemaran lingkungan. Dalam beberapa tahun terakhir, banyak peneliti yang telah

memanfaatkan tanaman untuk mendegradasi polutan yang menyebabkan pencemaran lingkungan baik di air maupun tanah (Liu et al., 2020; Yan et al., 2020; Zulfahmi et al., 2021). Selain itu, fitoremediasi merupakan alternatif pengolahan yang ramah lingkungan, ekonomis dan tidak membutuhkan energi yang besar dalam operasionalnya serta mudah untuk dioperasikan (Matheson et al., 2023). Fitoremediasi dapat mendegradasi berbagai macam jenis polutan yang terdapat di air maupun tanah seperti yang dirangkum pada tabel 1.

Dibalik keunggulan teknologi fitoremediasi, terdapat permasalahan mengenai isu pencemaran sekunder yang dihasilkan dari biomassa tanaman (limbah biologis) yang terkontaminasi pasca pengolahan (Gong et al., 2018). Hal ini terjadi karena tanaman hanya berfungsi sebagai wadah untuk menyimpan polutan yang diserap melalui mekanisme yang kompleks tanpa menghancurkan atau menguraikan kontaminan yang tidak dapat terurai secara hayati. Limbah biologis yang dihasilkan dari pasca-fitoremediasi ini tergolong limbah berbahaya karena dikhawatirkan akan berpotensi masuk sistem rantai makanan (Song & Park, 2017).

Akumulasi sejumlah besar biomassa tanaman pasca-fitoremediasi yang terkontaminasi mendesak adanya teknik pemanfaatan atau penanganan yang tepat dan sebagian besar solusi terkait masalah ini adalah melalui metode pengurangan volume seperti pemadatan, pengomposan, pembakaran, dan gasifikasi (Liu & Tran, 2021). Oleh karena itu, review jurnal ini akan mengulas beberapa teknologi yang membahas berbagai metode pemanfaatan dan penanganan biomassa tanaman yang terkontaminasi pasca-fitoremediasi untuk mewujudkan implementasi teknologi fitoremediasi yang berkelanjutan.

2. FITOREMEDIASI

Fitoremediasi adalah salah satu metode pemulihan biologis yang memanfaatkan tanaman untuk menghilangkan, menstabilkan, atau memperbaiki kontaminasi lingkungan yang berada di tanah maupun perairan. Teknologi ini cukup efektif dalam menangani pencemaran logam berat dan kontaminan organik, serta menawarkan alternatif yang hemat biaya dan ramah lingkungan (Alsafran et al., 2022). Berbagai penelitian telah banyak dilakukan untuk menguji berbagai macam jenis tanaman dalam mendegradasi polutan seperti yang terlihat pada Tabel 1. Tabel 1 menunjukkan berbagai macam tanaman dapat mendegradasi polutan seperti pestisida, logam berat dan kontaminan organik yang berasal dari industri.

Tabel 1. Jenis – Jenis Tanaman dan Polutan yang Berhasil di Degradasi

Spesies tanaman	Jenis Polutan	Referensi
<i>Helianthus annuus</i>	<i>Azoxystrobin</i>	(Romeh, 2015)
	<i>DDD, DDE, DDT</i> (Pestisida)	(Mitton et al., 2014)
<i>Ricinus communis</i>	<i>Heptachlor, methoxychlor</i> (Pestisida)	(Rissato et al., 2015)
<i>Zea mays</i>	<i>Endosulfan</i>	(Mukherjee & Kumar, 2012)
<i>Tagetes minuta</i>	As (Arsen)	(Salazar & Pignata, 2014)
<i>Amaranthus caudate</i>	<i>Glyphosate</i>	(Al-Arfaj A et al., 2013)
<i>Echinacea purpurea</i>	<i>Petroleum hydrocarbon</i>	(Heidari et al., 2018)
<i>Noccaea caerulea</i>	Pb (Timbal)	(Dinh et al., 2018)

<i>Cannabis sativa L.</i>	Cd (Cadmium) dan Cu (Tembaga)	(Ahmad et al., 2016)
<i>Alyssum markgrafii</i>	Ni (Nikel)	(Salihaj et al., 2018)
<i>Brassica nigra</i>	Pb (Timbal)	
<i>Thlaspi caerulescens</i>	Cd (Kadmium)	(Koptsik, 2014)
<i>Medicago sativa</i>	Pb (Timbal)	
<i>Chrysopogon zizanioides</i>	COD dan BOD	(Darajeh et al., 2014)
<i>Ipomoea aquatica</i>	COD, Nitrat dan Fosfat	(Zulfahmi et al., 2021b)
<i>Myriophyllum spicatum</i>		
<i>Potamogeton lucens</i>	Atrazine, isoproturon, dan diuron	(Knauert et al., 2010)
<i>Elodea canadensis Michx</i>		
<i>Azolla pinnata</i>	COD, BOD, TSS, Oil and Grease, Ammonia	(Mamat et al., 2022)

Dengan berbagai macam jenis tanaman yang dapat digunakan, fitoremediasi telah menarik perhatian ilmuwan untuk mengurangi tingkat polusi lingkungan (Liu et al., 2020; Osman et al., 2020). Adapun kelebihan dan kekurangan fitoremediasi yang telah dipelajari dapat dilihat pada Tabel 2 berikut.

Tabel 2. Kelebihan dan Kekurangan Fitoremediasi (Asante-Badu et al., 2020; Hakim et al., 2024).

Kelebihan	Kekurangan
Biaya operasional yang rendah	Tanaman pasca-fitoremediasi berpotensi masuk ke rantai makanan
Frekuensi <i>maintenance</i> yang rendah	Terbatas pada kontaminan yang rendah
Dapat di gunakan untuk berbagai variasi jenis limbah	Untuk mencegah kecelakaan, diperlukan praktik budidaya dan pemeliharaan yang baik .
Dapat digunakan untuk memperbaiki tanah yang tidak produktif untuk keperluan pertanian.	Efektivitas proses remediasi dipengaruhi oleh faktor iklim dan cuaca.
Ramah lingkungan dan estetik	Ada kemungkinan spesies tanaman invasif yang tidak diinginkan masuk dan menyebar.

3. PENGOLAHAN BIOMASSA PASCA-FITOREMEDIASI

Berdasarkan kelebihan dan kekurangan pada table 2, terdapat point penting mengenai bagaimana pengolahan lanjutan untuk biomassa yang telah kontaminasi karena fitoremediasi melibatkan akumulasi kontaminan dalam tanaman selama pertumbuhan tanaman (Kafle et al., 2022). Berbagai macam metode yang dapat digunakan untuk pengolahan dan pemanfaatan biomassa pasca-fitoremediasi adalah sebagai berikut.

3.1 Bioenergy

Produksi energi terbarukan merupakan salah satu sasaran utama langkah kebijakan negara untuk mengurangi perubahan iklim dan fluktuasi harga bahan bakar. Konversi biomassa dari tanaman pasca-fitoremediasi menjadi bioenergi dapat menjadi salah satu langkah keberlanjutan fitoremediasi. Tanaman sejatinya dapat dikonversi menjadi berbagai macam jenis bioenergi seperti dalam bentuk bahan bakar padat (briket dan arang), bahan bakar gas (biogas) dan bahan bakar cair (misalnya bioetanol, biodiesel) (Karp & Shield, 2008).

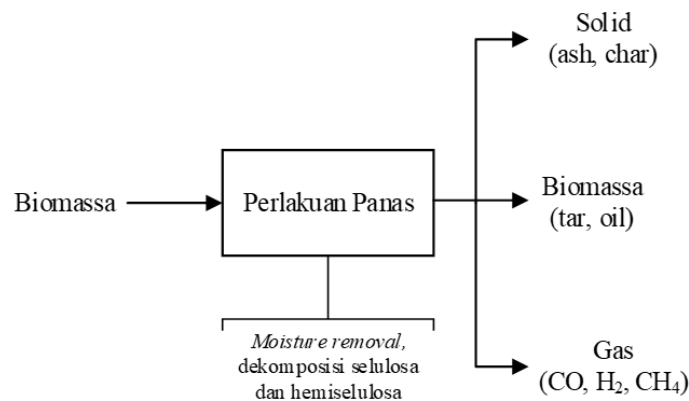
Beberapa penelitian yang telah dilakukan untuk mengkonversi biomassa menjadi *bioenergy* seperti yang tercantum pada Tabel 3 berikut.

Tabel 3. Konversi Biomassa Terkontaminasi Menjadi *Bioenergy*

Spesies tanaman	Potensial Produk	Referensi
<i>Helianthus annuus</i>	Biodiesel, biogas, briket, bioetanol	(Abubakar et al., 2020; Geletukha et al., 2020)
<i>Ricinus communis</i>	Biodiesel	(Gebrehiwot & Zelelew, 2022)
<i>Zea mays</i>	Biodiesel, bioetanol, biogas, briket	(JEDS & Honora, 2021; Schulz et al., 2018)
<i>Tagetes minuta</i>	Briket, biodiesel	(Pal et al., 2023; Walia & Kumar, 2021)
<i>Amaranthus caudate</i>	Briket dan biodiesel	(Karaeva et al., 2023; Walia & Kumar, 2021)
<i>Chrysopogon zizanioides</i>	Briket, bioetanol, biogas	(Peipei et al., 2014; Restiawaty & Dewi, 2017)

Biomassa dapat dikonversi menjadi bioenergi dengan menggunakan beberapa metode. Seperti perlakuan panas (*pyrolysis*, *gasification* and *liquefaction*) (Cui et al., 2021; Fu et al., 2021) serta pengolahan dengan menggunakan mikroorganisme secara aerobik maupun anaerobik (Cao et al., 2015; Yang et al., 2019). Dalam operasionalnya, *pyrolysis* dan *gasification* biasanya membutuhkan temperature yang tinggi dibandingkan dengan *liquefaction* untuk mengkonversi biomassa menjadi bioenergi. Reaksi *pyrolysis* terjadi dalam atmosfer inert, sedangkan *gasification* dan *liquefaction* terjadi dalam atmosfer oksidatif. Adapun ilustrasi proses yang terjadi pada perlakuan panas dalam mengkonversi biomassa pasca-fitoremediasi menjadi bioenergi dapat dilihat pada Gambar 1.

Pyrolysis adalah proses termokimia yang melibatkan dekomposisi termal bahan organik pada suhu tinggi tanpa adanya oksigen. *Pyrolysis* terbagi menjadi beberapa jenis diantaranya yaitu *fast pyrolysis* yang dilakukan pada suhu sedang hingga tinggi (biasanya 400 – 650°C) dengan laju pemanasan cepat (hingga 1000°C/detik). Metode ini terutama menghasilkan *bio – oil* (G. Wang et al., 2020). Kemudian *slow pyrolysis* yang dioperasikan pada laju pemanasan yang lebih rendah (10°C/detik) dan menghasilkan biochar yang lebih banyak (Mohan et al., 2014) dan selanjutnya *flash pyrolysis* yang melibatkan suhu yang sangat tinggi (700 – 1000°C) dan waktu tinggal yang sangat singkat (<0,5 detik), dengan fokus pada pemaksimalan produksi gas (Ighalo et al., 2022).



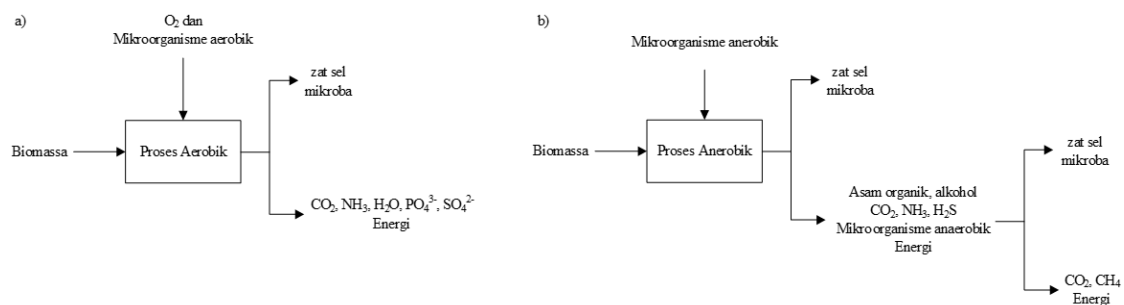
Gambar 1. Proses Perlakuan Panas

Sumber: (Wen et al., 2018; Zhang et al., 2019)

Pyrolysis dapat digunakan sebagai teknologi praktis tetapi membutuhkan fasilitas yang canggih dan masalah pengoperasian yang cukup rumit (Samolada & Zabaniotou, 2014). Hal ini akan berdampak ke meningkatnya biaya dalam proses tersebut. Namun, pemanfaatan produk samping hasil *pyrolysis* memiliki nilai tambah yang tinggi, seperti *pyrolysis*, *bio-char*, dan *bio-oil* yang dapat mengurangi biaya operasional jika dimanfaatkan dengan benar (Debalina et al., 2017). Zeng et al. (2019) melakukan *flash pyrolysis* biomassa *willow* untuk menguji pengaruh logam berat terhadap produksi biogas dan menyimpulkan bahwa 14,8% H₂ dan 34,5% CO lebih banyak dihasilkan selama pirolisis 5 menit pada temperatur 1200°C (Cui et al., 2018).

Berbeda dengan *pyrolysis*, selama gasifikasi, padatan yang dipanaskan hingga suhu tertentu diubah menjadi syngas, yang merupakan campuran CO, H₂, CH₄ dan lainnya. Biasanya, reaktan yang digunakan selama gasifikasi adalah udara, uap air dan karbon dioksida dan menghasilkan residu berupa abu, char dan tar (Situmorang et al., 2020). Syngas yang dihasilkan dari gasifikasi biomassa digunakan untuk menghasilkan listrik melalui sistem *fuel cells* atau *gas turbines* (Azami & Yari, 2017). Menurut Basu (2018), syngas dapat digunakan sebagai sumber CO dan H₂ sebagai bahan tambahan industri kimia dan bahan bakar bernilai tinggi. Syngas yang dihasilkan selama gasifikasi *S. alfredii* pada temperatur 500 – 800 °C dapat digunakan untuk membuat bahan bakar melalui proses *Fischer – Tropsch* (Cui et al., 2018).

Selain perlakuan panas yang dapat dilakukan untuk mengkonversi menjadi *bioenergy*, terdapat metode pengolahan biologis yang memanfaatkan mikroorganisme untuk mengkonversi biomassa menjadi bioetanol. Adapun ilustrasi proses pengolahan biologis untuk mengkonversi biomassa menjadi bioetanol dapat dilihat pada Gambar 2b.



Gambar 2. a) Pengolahan Aerobik; b) Pengolahan Anaerobik

3.2 Produksi Kompos (Pupuk Organik)

Pengolahan dengan mikroorganisme aerobik dapat menguraikan bahan organik tanaman dan mengubahnya menjadi zat sel mikroba, CO_2 , dan komponen H_2O , NH_3 , PO_4^{2-} , SO_4^{2-} yang dapat menjadi sumber nutrient bagi tanah dan tanaman (Gambar 2a) (Fu et al., 2021). Metode pembuatan kompos dari biomassa jauh lebih ekonomis dibandingkan dengan pengolahan menjadi bioenergi dikarenakan tidak membutuhkan energi yang besar. Lalu Yang et al. (2019), melakukan pengomposan *Elsholtzia splendens Nakai* yang terkontaminasi Cu dan mengaplikasikannya sebagai pupuk dasar pada tanah yang kekurangan Cu. Hasil penelitian menunjukkan bahwa hal tersebut dapat meningkatkan tinggi tanaman, biomassa, dan berat gabah gandum secara signifikan, yang merupakan cara yang efektif untuk memanfaatkan sumber daya. Wei et al. (2020), mempelajari tentang pengaruh humus dari berbagai sumber kompos dan bakteri yang dihasilkan oleh kompos terhadap penyerapan kontaminan logam berat. Mereka menemukan bahwa bakteri memiliki kemampuan mengikat logam berat yang lebih baik daripada humus. Selain itu, humus sebagai aktivator dapat meningkatkan keanekaragaman dan biomassa bakteri yang toleran terhadap logam berat, sehingga meningkatkan penyerapan ion logam berat. Perpaduan antara humus dan bakteri dapat mengurangi pelindian logam berat hingga 60-80%. Kemudian Singh & Kalamdhad (2016), juga mempelajari kombinasi bakteri fungsional dan adsorben dalam pembuatan kompos yang terbukti cukup efisien. Spons dan kapas memiliki efisiensi penghilangan logam berat yang baik. Efisiensi penghilangan Cr oleh spons dan kapas berada dalam kisaran 19%–26%. Selain itu, bakteri fungsional dapat secara langsung mempengaruhi penghilangan Cu, Cd, dan Cr, dan juga secara tidak langsung mempengaruhi penghilangan Pb dan Cr dengan mengubah bakteri asli. Sehingga disimpulkan menghilangkan logam berat dari biomassa yang terkontaminasi dapat menggunakan metode atau sistem pengomposan.

3.3 Pemadatan Tanaman

Metode pemadatan tanaman merupakan metode yang di usulkan oleh Blaylock pada tahun 2000 untuk memproses residu fitoekstraksi yang kaya logam (Raskin & Ensley, 2000). Pemadatan adalah metode yang paling umum, sederhana dan mudah dioperasikan. Keuntungan dari metode ini sama dengan pengomposan, yaitu lindi harus dikumpulkan dan diolah dengan benar. Metode Pemadatan terbagi menjadi beberapa sistem diantaranya yaitu sistem penyimpanan limbah, sistem pengumpulan lindi, dan sistem pengumpulan gas (Mohanty, 2016).

Selain itu dalam proses pemadatan menghasilkan partikulat dengan kandungan sejumlah besar logam berat yang menjadi pencemaran sekunder. Partikulat ini tentunya harus diproses lebih lanjut sebagai limbah berbahaya dan beracun. Akan sangat bermanfaat jika studi dan penelitian lebih lanjut dilakukan untuk mengekstraksi logam berat dari lindi yang dikumpulkan. Kemudian jika dibandingkan dengan metode pengomposan, informasi mengenai implementasi metode pemadatan yang sedikit dan terbatas. Sehingga sulit untuk menggali potensi metode ini untuk diaplikasikan dalam mengolah tanaman yang terkontaminasi pasca-fitoremediasi (Liu & Tran, 2021).

3.4 Sintesis Nanomaterial

Nanomaterial atau nanopartikel adalah material berukuran sangat kecil (<1000 nm) yang memiliki sifat fisikokimia spesifik dan berbeda dengan material pada umumnya. Nanopartikel logam dan nanopartikel oksida logam banyak digunakan di bidang elektrokimia, katalisis, perawatan medis, industri penerbangan, dan bidang lain (He et al., 2021; Medina et al., 2007; Pei et al., 2021; Priyadarshini et al., 2020). Biosintesis nanopartikel logam melalui tanaman fitoremediasi semakin populer dibandingkan dengan metode konvensional yang mahal dan berbahaya bagi lingkungan (Ahmed et al., 2017).

Menurut Patil et al. (2022), dalam biosintesis nanopartikel oksida logam dapat menggantikan penggunaan agen pereduksi dan penstabil yang berbahaya selama reduksi kompleks logam dengan fitokimia seperti protein, enzim, gula, fenolik, dan flavonoid yang lebih ramah lingkungan. Penelitian yang dilakukan Wang et al. (2019) dan Wang et al. (2016), telah berhasil mensintesis nanopartikel seng oksida dari hiperakumulator yang mengandung seng (*Sedum alfredii*). Nanopartikel seng oksida yang disintesis juga memiliki kemampuan degradasi fotokatalitik yang telah mendegradasi 97% dari 2-klorofenol di bawah penyinaran sinar matahari setelah 120 menit. Diperlukan lebih banyak penelitian tentang persiapan nanomaterial dari berbagai spesies tanaman yang mengandung berbagai jenis kontaminan. Namun, sintesis nanomaterial untuk residu fitoremediasi rumit dan mahal.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil review dapat disimpulkan bahwa teknologi fitoremediasi mendapat banyak perhatian karena daya tariknya yang ramah lingkungan dan ekonomis. Namun dibalik keunggulannya terdapat tantangan besar yang harus diselesaikan pasca-fitoremediasi mengenai pemanfaatan dan penanganan biomassa tanaman yang terkontaminasi. Biomassa tanaman dapat dikonversi menjadi bioenergi seperti biodiesel, biogas, biochar dan bioetanol dengan metode perlakuan panas seperti *pyrolysis*, gasifikasi dan metode pengolahan anaerobik. Kemudian biomassa juga dapat dikonversi menjadi kompos atau pupuk organik melalui proses pengolahan aerobik. Konversi biomassa menjadi bioenergi dan kompos akan meningkatkan nilai ekonomis teknologi fitoremediasi. Selain itu metode pemadatan tanaman juga diamati dapat digunakan untuk penanganan biomassa pasca-fitoremediasi. Namun metode ini akan menghasilkan residu yang kembali harus diolah. Sintesis nanomaterial dari biomassa dapat dijadikan alternatif namun proses ini sangat rumit dan cukup mahal dalam praktiknya. Pemilihan metode pengolahan biomassa pasca-fitoremediasi harus berdasarkan dari efisiensi, nilai ekonomis dan dampak ke lingkungan. Diperlukan penelitian lebih lanjut untuk menguji bagaimana efisiensi masing – masing teknologi yang telah ditawarkan untuk mendukung teknologi fitoremediasi yang berkelanjutan.

DAFTAR PUSTAKA

- Abubakar, H., Hammari, A. M., Adamu, U., & Abubakar, A. (2020). Biodiesel Production Using *Helianthus Annuus* (Sunflower) Seed Oil By Trans-Esterification Method. In *Bstr* (Vol. 8, Issue 2). <https://Journal.Hibiscuspublisher.Com/Index.Php/Bstr>
- Ahmad, R., Tehsin, Z., Malik, S. T., Asad, S. A., Shahzad, M., Bilal, M., Shah, M. M., & Khan, S. A. (2016). Phytoremediation Potential Of Hemp (*Cannabis Sativa* L.): Identification And Characterization Of Heavy Metals Responsive Genes. *Clean - Soil, Air, Water*, 44(2), 195–201. <https://doi.org/10.1002/Clen.201500117>
- Ahmed, S., Annu, Chaudhry, S. A., & Ikram, S. (2017). A Review On Biogenic Synthesis Of ZnO Nanoparticles Using Plant Extracts And Microbes: A Prospect Towards Green Chemistry. In *Journal Of Photochemistry And Photobiology B: Biology* (Vol. 166, Pp. 272–284). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/J.Jphotobiol.2016.12.011>
- Al-Arfaj A, Abdel-Megeed A, Ali Hm, & Al-Shahrani O. (2013). Phyto-Microbial Degradation Of Glyphosate In Riyadh Area. In *Journal Of Pure And Applied Microbiology* (Vol. 7, Issue 2).
- Alsafran, M., Usman, K., Ahmed, B., Rizwan, M., Saleem, M. H., & Al Jabri, H. (2022). Understanding The Phytoremediation Mechanisms Of Potentially Toxic Elements: A Proteomic Overview Of Recent Advances. In *Frontiers In Plant Science* (Vol. 13). Frontiers Media S.A. <https://doi.org/10.3389/Fpls.2022.881242>

- Asante-Badu, B., Kgorutla, L. E., Li, S. S., Danso, P. O., Xue, Z., & Qiang, G. (2020). Phytoremediation Of Organic And Inorganic Compounds In A Natural And An Agricultural Environment: A Review. *Applied Ecology And Environmental Research*, 18(5), 6875–6904. https://doi.org/10.15666/Aeer/1805_68756904
- Azami, V., & Yari, M. (2017). Comparison Between Conventional Design And Cathode Gas Recirculation Design Of A Direct-Syngas Solid Oxide Fuel Cell– Gas Turbine Hybrid Systems Part I: Design Performance. *International Journal Of Renewable Energy Development*, 6(2), 127–136. <https://doi.org/10.14710/Ijred.6.2.127-136>
- Basu, P. (2018). Chapter 12 - Production Of Synthetic Fuels And Chemicals From Biomass. In P. Basu (Ed.), *Biomass Gasification, Pyrolysis And Torrefaction (Third Edition)* (Pp. 415–443). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812992-0.00012-1>
- Cao, Z., Wang, S., Wang, T., Chang, Z., Shen, Z., & Chen, Y. (2015). Using Contaminated Plants Involved In Phytoremediation For Anaerobic Digestion. *International Journal Of Phytoremediation*, 17(3), 201–207. <https://doi.org/10.1080/15226514.2013.876967>
- 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. <https://doi.org/10.1016/J.Cej.2018.04.133>
- 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. In *Journal Of Hazardous Materials* (Vol. 405). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/J.Jhazmat.2020.123832>
- Darajeh, N., Idris, A., Truong, P., Abdul Aziz, A., Abu Bakar, R., & Che Man, H. (2014). Phytoremediation Potential Of Vetiver System Technology For Improving The Quality Of Palm Oil Mill Effluent. *Advances In Materials Science And Engineering*, 2014. <https://doi.org/10.1155/2014/683579>
- Debalina, B., Reddy, R. B., & Vinu, R. (2017). Production Of Carbon Nanostructures In Biochar, Bio-Oil And Gases From Bagasse Via Microwave Assisted Pyrolysis Using Fe And Co As Susceptors. *Journal Of Analytical And Applied Pyrolysis*, 124, 310–318. <https://doi.org/10.1016/J.Jaap.2017.01.018>
- Dinh, N., Van Der Ent, A., Mulligan, D. R., & Nguyen, A. V. (2018). Zinc And Lead Accumulation Characteristics And In Vivo Distribution Of Zn²⁺ In The Hyperaccumulator *Noccaea Caerulescens* Elucidated With Fluorescent Probes And Laser Confocal Microscopy. *Environmental And Experimental Botany*, 147, 1–12. <https://doi.org/10.1016/J.Envexpbot.2017.10.008>
- Fu, Y., You, S., & Luo, X. (2021a). A Review On The Status And Development Of Hyperaccumulator Harvests Treatment Technology. *Iop Conference Series: Earth And Environmental Science*, 634(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/634/1/012113>
- Gebrehiwot, H., & Zelelew, D. (2022). Ricinus Communis Seed Oils As A Source Of Biodiesel; A Renewable Form Of Future Energy. *Journal Of The Turkish Chemical Society, Section A: Chemistry*, 9(2), 339–354. <https://doi.org/10.18596/Jotcsa.1019969>
- Geletukha, G., Drahnev, S., Zheliezna, T., & Bashtovyi, A. (2020). Prospects Of Sunflower Residues Use For Energy. www.uabio.org

- Gong, X., Huang, D., Liu, Y., Zeng, G., Wang, R., Wei, J., Huang, C., Xu, P., Wan, J., & Zhang, C. (2018). Pyrolysis And Reutilization Of Plant Residues After Phytoremediation Of Heavy Metals Contaminated Sediments: For Heavy Metals Stabilization And Dye Adsorption. *Bioresource Technology*, 253, 64–71. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.01.018>
- Hakim, L., Rahayu, A., & Jamilatun, S. (2024). Potensi Teknologi Fitoremediasi Sebagai Polishing Treatment Palm Oil Mill Effluent : A Review. *Seminar Nasional Sains Dan Teknologi 2024*.
- He, J., Mao, M., Li, X., & Chua, C. K. (2021). Bioprinting Of 3d Functional Tissue Constructs. *International Journal Of Bioprinting*, 7(3), 1–2. <https://doi.org/10.18063/Ijb.V7i3.395>
- Heidari, S., Fotouhi Ghazvini, R., Zavareh, M., & Kafi, M. (2018). Physiological Responses And Phytoremediation Ability Of Eastern Coneflower (Echinacea Purpurea) For Crude Oil Contaminated Soil. In *Caspian J. Environ. Sci* (Vol. 16, Issue 2).
- Ighalo, J. O., Iwuchukwu, F. U., Eyankware, O. E., Iwuozor, K. O., Olotu, K., Bright, O. C., & Igwegbe, C. A. (2022). Flash Pyrolysis Of Biomass: A Review Of Recent Advances. *Clean Technologies And Environmental Policy*, 24(8), 2349–2363. <https://doi.org/10.1007/s10098-022-02339-5>
- Jeds, & Honora, P. (2021). Analysis Of Bioenergy From Corn cob Waste To Increase People's Economic Condition In Tantom Angkola Subdistrict Tapanuli Selatan Regency. *Journal Of Environmental And Development Studies*, 2(2), 79–86. <https://doi.org/10.32734/Jeds.V2i2.6614>
- Kafle, A., Timilsina, A., Gautam, A., Adhikari, K., Bhattarai, A., & Aryal, N. (2022). Phytoremediation: Mechanisms, Plant Selection And Enhancement By Natural And Synthetic Agents. In *Environmental Advances* (Vol. 8). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.envadv.2022.100203>
- Karaeva, J., Timofeeva, S., Islamova, S., Bulygina, K., Aliev, F., Panchenko, V., & Bolshev, V. (2023). Pyrolysis Of Amaranth Inflorescence Wastes: Bioenergy Potential, Biochar And Hydrocarbon Rich Bio-Oil Production. *Agriculture (Switzerland)*, 13(2). <https://doi.org/10.3390/Agriculture13020260>
- Karp, A., & Shield, I. (2008). Bioenergy From Plants And The Sustainable Yield Challenge. In *New Phytologist* (Vol. 179, Issue 1, Pp. 15–32). <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2008.02432.x>
- Knauert, S., Singer, H., Hollender, J., & Knauer, K. (2010). Phytotoxicity Of Atrazine, Isoproturon, And Diuron To Submersed Macrophytes In Outdoor Mesocosms. *Environmental Pollution*, 158(1), 167–174. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2009.07.023>
- Koptsik, G. N. (2014). Problems And Prospects Concerning The Phytoremediation Of Heavy Metal Polluted Soils: A Review. In *Eurasian Soil Science* (Vol. 47, Issue 9, Pp. 923–939). Maik Nauka-Interperiodica Publishing. <https://doi.org/10.1134/S1064229314090075>
- Liu, Z., Chen, B., Wang, L. Ao, Urbanovich, O., Nagorskaya, L., Li, X., & Tang, L. (2020). A Review On Phytoremediation Of Mercury Contaminated Soils. In *Journal Of Hazardous Materials* (Vol. 400). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.123138>
- Liu, Z., & Tran, K. Q. (2021a). A Review On Disposal And Utilization Of Phytoremediation Plants Containing Heavy Metals. In *Ecotoxicology And Environmental Safety* (Vol. 226). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2021.112821>
- Mamat, N. Z., Abdullah, S. R. S., Hasan, H. A., Ismail, N. 'izzati, & Sharuddin, S. S. N. (2022). Polishing Of Treated Palm Oil Mill Effluent Using Azolla Pinnata. *Journal Of Biochemistry, Microbiology And Biotechnology*, 10(Sp2), 40–45. <https://doi.org/10.54987/Jobimb.V10isp2.727>

- Matheson, S., Fleck, R., Irga, P. J., & Torpy, F. R. (2023). Phytoremediation For The Indoor Environment: A State-Of-The-Art Review. In *Reviews In Environmental Science And Biotechnology* (Vol. 22, Issue 1, Pp. 249–280). Springer Science And Business Media B.V. <https://doi.org/10.1007/S11157-023-09644-5>
- Medina, C., Santos-Martinez, M. J., Radomski, A., Corrigan, O. I., & Radomski, M. W. (2007). Nanoparticles: Pharmacological And Toxicological Significance. In *British Journal Of Pharmacology* (Vol. 150, Issue 5, Pp. 552–558). <https://doi.org/10.1038/Sj.Bjp.0707130>
- Mitton, F. M., Miglioranza, K. S. B., Gonzalez, M., Shimabukuro, V. M., & Monserrat, J. M. (2014). Assessment Of Tolerance And Efficiency Of Crop Species In The Phytoremediation Of Ddt Polluted Soils. *Ecological Engineering*, 71, 501–508. <https://doi.org/10.1016/J.Ecoleng.2014.07.069>
- Mohan, D., Sarswat, A., Ok, Y. S., & Pittman, C. U. Jr. (2014). Organic And Inorganic Contaminants Removal From Water With Biochar, A Renewable, Low Cost And Sustainable Adsorbent—A Critical Review. *Bioresource Technology*, 160, 191–202. <https://api.semanticscholar.org/Corpusid:23729337>
- Mohanty, M. (2016). Post-Harvest Management Of Phytoremediation Technology. *Journal Of Environmental & Analytical Toxicology*, 6(5). <https://doi.org/10.4172/2161-0525.1000398>
- Mukherjee, I., & Kumar, A. (2012). Phytoextraction Of Endosulfan A Remediation Technique. In *Bulletin Of Environmental Contamination And Toxicology* (Vol. 88, Issue 2, Pp. 251–254). <https://doi.org/10.1007/S00128-011-0454-1>
- Osman, N. A., Ujang, F. A., Roslan, A. M., Ibrahim, M. F., & Hassan, M. A. (2020). The Effect Of Palm Oil Mill Effluent Final Discharge On The Characteristics Of Pennisetum Purpureum. *Scientific Reports*, 10(1). <https://doi.org/10.1038/S41598-020-62815-0>
- Pal, P. K., Mahajan, M., Thakur, B. K., Kapoor, P., & Shivani. (2023). Achievement Of Higher Biomass, Yield And Quality Of Essential Oil Of Tagetes Minuta L. Through Optimizing The Sowing Method And Seeding Rate. *Frontiers In Plant Science*, 14. <https://doi.org/10.3389/Fpls.2023.1133370>
- Patil, S. P., Chaudhari, R. Y., & Nemade, M. S. (2022). Azadirachta Indica Leaves Mediated Green Synthesis Of Metal Oxide Nanoparticles: A Review. In *Talanta Open* (Vol. 5). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/J.Talo.2022.100083>
- Pei, N., Hao, Z., Wang, S., Pan, B., Fang, A., Kang, J., Li, D., He, J., & Wang, L. (2021). 3d Printing Of Layered Gradient Pore Structure Of Brain-Like Tissue. *International Journal Of Bioprinting*, 7(3), 71–85. <https://doi.org/10.18063/Ijb.V7i3.359>
- Peipei, S., Wudi, Z., Fang, Y., Xingling, Z., Jing, L., Yubao, C., & Shiqing, L. (2014). Biogas Production Potential Of Transgenic Vetiveria Zizanioides In Mesophilic Batch Anaerobic Digestion. *Scientific Research And Essays*, 9(9), 293–296. <https://doi.org/10.5897/Sre2014.5904>
- Priyadarshini, B. M., Dikshit, V., & Zhang, Y. (2020). 3d-Printed Bioreactors For In Vitro Modeling And Analysis. In *International Journal Of Bioprinting* (Vol. 6, Issue 4). Whioce Publishing Pte. Ltd. <https://doi.org/10.18063/Ijb.V6i4.267>
- Raskin, Ilya., & Ensley, B. D. . (2000). *Phytoremediation Of Toxic Metals : Using Plants To Clean Up The Environment*. J. Wiley.

- Restiawaty, E., & Dewi, A. (2017). Comparison Of Pretreatment Methods On Vetiver Leaves For Efficient Processes Of Simultaneous Saccharification And Fermentation By *Neurospora* Sp. *Journal Of Physics: Conference Series*, 877(1). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/877/1/012048>
- Rissato, S. R., Galhiane, M. S., Fernandes, J. R., Gerenutti, M., Gomes, H. M., Ribeiro, R., & Almeida, M. V. De. (2015). Evaluation Of *Ricinus Communis* L. For The Phytoremediation Of Polluted Soil With Organochlorine Pesticides. *Biomed Research International*, 2015. <https://doi.org/10.1155/2015/549863>
- Romeh, A. A. (2015). Evaluation Of The Phytoremediation Potential Of Three Plant Species For Azoxystrobin-Contaminated Soil. *International Journal Of Environmental Science And Technology*, 12(11), 3509–3518. <https://doi.org/10.1007/S13762-015-0772-7>
- Salazar, M. J., & Pignata, M. L. (2014). Lead Accumulation In Plants Grown In Polluted Soils. Screening Of Native Species For Phytoremediation. *Journal Of Geochemical Exploration*, 137, 29–36. <https://doi.org/10.1016/J.Gexplo.2013.11.003>
- Salihaj, M., Bani, A., Shahu, E., Benizri, E., & Echevarria, G. (2018). Metal Accumulation By The Ultramafic Flora Of Kosovo. *Ecological Research*, 33(4), 687–703. <https://doi.org/10.1007/S11284-018-1635-8>
- Samolada, M. C., & Zabaniotou, A. A. (2014). Comparative Assessment Of Municipal Sewage Sludge Incineration, Gasification And Pyrolysis For A Sustainable Sludge-To-Energy Management In Greece. *Waste Management*, 34(2), 411–420. <https://doi.org/10.1016/J.Wasman.2013.11.003>
- Schulz, V. S., Munz, S., Stolzenburg, K., Hartung, J., Weisenburger, S., Mastel, K., Möller, K., Claupen, W., & Graeff-Hönniger, S. (2018). Biomass And Biogas Yield Of Maize (*Zea Mays* L.) Grown Under Artificial Shading. *Agriculture (Switzerland)*, 8(11). <https://doi.org/10.3390/Agriculture8110178>
- Singh, J., & Kalamdhad, A. S. (2016). Effect Of Lime On Speciation Of Heavy Metals During Composting Of Water Hyacinth. *Frontiers Of Environmental Science And Engineering*, 10(1), 93–102. <https://doi.org/10.1007/S11783-014-0704-7>
- Situmorang, Y. A., Zhao, Z., Yoshida, A., Abudula, A., & Guan, G. (2020). Small-Scale Biomass Gasification Systems For Power Generation (<200 kw Class): A Review. In *Renewable And Sustainable Energy Reviews* (Vol. 117). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/J.Rser.2019.109486>
- Song, U., & Park, H. (2017). Importance Of Biomass Management Acts And Policies After Phytoremediation. *Journal Of Ecology And Environment*, 41(1). <https://doi.org/10.1186/S41610-017-0033-4>
- Walia, S., & Kumar, R. (2021). Wild Marigold (*Tagetes Minuta* L.) Biomass And Essential Oil Composition Modulated By Weed Management Techniques. *Industrial Crops And Products*, 161. <https://doi.org/10.1016/J.Indcrop.2020.113183>
- Wang, D., Liu, H., Ma, Y., Qu, J., Guan, J., Lu, N., Lu, Y., & Yuan, X. (2016). Recycling Of Hyper-Accumulator: Synthesis Of ZnO Nanoparticles And Photocatalytic Degradation For Dichlorophenol. *Journal Of Alloys And Compounds*, 680, 500–505. <https://doi.org/10.1016/J.Jallcom.2016.04.100>

- Wang, G., Dai, Y., Yang, H., Xiong, Q., Wang, K., Zhou, J., Li, Y., & Wang, S. (2020). A Review Of Recent Advances In Biomass Pyrolysis. In *Energy And Fuels* (Vol. 34, Issue 12, Pp. 15557–15578). American Chemical Society. <https://doi.org/10.1021/Acs.Energyfuels.0c03107>
- Wang, K., Liu, Y., Song, Z., Wang, D., & Qiu, W. (2019). Chelator Complexes Enhanced *Amaranthus Hypochondriacus* L. Phytoremediation Efficiency In Cd-Contaminated Soils. *Chemosphere*, 237. <https://doi.org/10.1016/J.Chemosphere.2019.124480>
- Wei, Y., Zhao, Y., Zhao, X., Gao, X., Zheng, Y., Zuo, H., & Wei, Z. (2020). Roles Of Different Humin And Heavy-Metal Resistant Bacteria From Composting On Heavy Metal Removal. *Bioresource Technology*, 296. <https://doi.org/10.1016/J.Biortech.2019.122375>
- 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.
- Yan, A., Wang, Y., Tan, S. N., Mohd Yusof, M. L., Ghosh, S., & Chen, Z. (2020). Phytoremediation: A Promising Approach For Revegetation Of Heavy Metal-Polluted Land. In *Frontiers In Plant Science* (Vol. 11). Frontiers Media S.A. <https://doi.org/10.3389/Fpls.2020.00359>
- Yang, K., Zhu, L., Zhao, Y., Wei, Z., Chen, X., Yao, C., Meng, Q., & Zhao, R. (2019). A Novel Method For Removing Heavy Metals From Composting System: The Combination Of Functional Bacteria And Adsorbent Materials. *Bioresource Technology*, 293. <https://doi.org/10.1016/J.Biortech.2019.122095>
- Zeng, K., Li, R., Minh, D. P., Weiss-Hortala, E., Nzihou, A., He, X., & Flamant, G. (2019). Solar Pyrolysis Of Heavy Metal Contaminated Biomass For Gas Fuel Production. *Energy*, 187. <https://doi.org/10.1016/J.Energy.2019.116016>
- Zhang, B., Zhang, J., Zhong, Z., Wang, W., & Zhu, M. (2019). Syngas Production And Trace Element Emissions From Microwave-Assisted Chemical Looping Gasification Of Heavy Metal Hyperaccumulators. *Science Of The Total Environment*, 659, 612–620. <https://doi.org/10.1016/J.Scitotenv.2018.12.176>
- Zulfahmi, I., Kandi, R. N., Huslina, F., Rahmawati, L., Muliari, M., Sumon, K. A., & Rahman, M. M. (2021a). Phytoremediation Of Palm Oil Mill Effluent (POME) Using Water Spinach (*Ipomoea Aquatica* Forsk.). *Environmental Technology And Innovation*, 21. <https://doi.org/10.1016/J.Eti.2020.101260>