

Aplikasi Mikoriza Kombinasi Serbuk Gergaji dalam Remediasi Lahan Tercemar: Review

Nur Fadillah¹, Alifah Danuk Aryanti², Martha Oktavia Prasandy³, Lintang Denalin Aulia Pratiwi⁴, Pujiati^{5*}

Corresponding Author : fadillahnur0304@gmail.com

ARTICLE INFO

Article history

Received: 28 Mei 2023

Revised: 21 Juni 2023

Accepted: 19 Agustus 2023

Published: 22 November 2023

Keywords

Bioremediasi,

Mikoriza,

Serbuk Gergaji

ABSTRACT

This research aims to determine the application of mycorrhizal fungi in land remediation to improve polluted land using the immobilization method, which is to limit the mobility of microbial cells or their enzymes by maintaining their vitality and catalytic function at the same time and the use of AMF can effectively reduce pollutant in environment.

PENDAHULUAN

Polutan bisa terjadi kapan saja dan dimana saja, disengaja ataupun tidak disengaja. Pencemaran lingkungan bisa diakibatkan dari berbagai hal, misalnya dari penggunaan pestisida, tumpahan minyak, limbah-limbah yang dibuang sembarangan yang akhirnya mencemari lingkungan sekitar. Penggunaan pestisida dalam jumlah besar dalam jangka panjang di pertanian di daerah sempit dapat menyebabkan masalah serius, seperti gangguan mikroflora lokal dan manusia. Biodegradasi bergantung pada keadaan fisiologis mikroorganisme yang sensitif terhadap berbagai faktor lingkungan, dan imobilisasi akan meningkatkan ketahanan mikroorganisme terhadap pengaruh lingkungan yang merugikan juga beracun bagi organisme non-target. Bioremediasi merupakan salah satu teknologi remediasi yang memanfaatkan mikroorganisme. Teknologi ini digunakan untuk remediasi sebuah area dan dapat memperbaiki sebuah lahan yang tercemar secara menyeluruh. Teknologi bioremediasi dipilih karena ekonomis, cukup efektif, efisien, dan lebih ramah lingkungan. Ada beberapa teknik remediasi yang lebih cocok untuk menghilangkan pencemar lingkungan tersebut, antara lain bioremediasi adalah terapi alami yang menggunakan organisme atau produknya untuk mengurangi atau menghilangkan pencemar lingkungan (Quintella, 2019). Mikroremediasi dapat menjadi salah satu strategi ekonomi yang ramah lingkungan dan efektif untuk menyelesaikan permasalahan tanah yang semakin serius dan pencemaran air. Pertumbuhan jamur yang kuat seperti jamur saprofit, jamur gourmet, jamur mikoriza, jamur entomopatogen, dan jamur parasit. Kemudian hifa jaringan yang luas, produksi ligninase ekstraseluler multifungsi, rasio luas permukaan terhadap volume yang tinggi, ketahanan terhadap logam berat, mampu beradaptasi dengan fluktuasi

pH dan suhu, serta adanya protein pengikat logam, jamur Jamur merupakan spesies kunci untuk bioremediasi limbah beracun dan situs yang terkontaminasi yang dapat digunakan untuk memperbaiki berbagai polutan (Quintella, 2019), (Akhtar, 2020). Transfer elektron antara sel biochar dan mikroorganisme yang terlibat dalam degradasi polutan memiliki peran penting dalam transportasi organik dan logam berat. Biochar dapat berpartisipasi dalam proses tanah, seperti dekomposisi bahan organik, karena berpartisipasi dalam transfer elektron ekstraseluler langsung (DEET) antara bahan organik tanah (atau mineral tanah) dan sel mikroba, dan transfer elektron interspesifik langsung antara sel mikroba (Zhu et al, 2017).

Efek Jamur Mikoriza Terhadap Tumbuhan

Mikoriza adalah hubungan yang saling menguntungkan antara jamur dan tumbuhan yang ditularkan melalui tanah akar. Jamur mikoriza memberikan nutrisi penting bagi tanaman inang yang digunakan untuk gula atau lipid (Ruytinx, 2020). Secara tradisional, transportasi dan transshipment macronutrients termasuk nitrogen dan fosfor di seluruh miselium jamur tanaman inang telah dipelajari sepenuhnya. Namun, pertukaran nutrisi dan pengaturan fungsi Kontribusi morfogenesis dan perkembangan mikoriza tidak jelas. AMF adalah simbiosis obligat dari Glomeromycota, yang mana nantinya akan membentuk hubungan simbiosis dengan akar tumbuhan vaskular dan banyak terdapat di berbagai ekosistem termasuk lingkungan yang penuh tekanan (Emmanuel and Babalola, 2020).

AMF berguna untuk banyak tanaman hortikultura, seperti jeruk, apel, persik, stroberi, selada, nanas, bawang, melon, dan paprika. Efek menguntungkan lain dari AMF adalah meningkatkan kelangsungan hidup dan pembentukan bibit yang diinokulasi. AMF juga meningkatkan penyerapan nutrisi dan meningkatkan kelangsungan hidup dan pembentukan bibit. Hasil ini menunjukkan bahwa jamur jenis AM dapat memediasi cekaman garam dan meningkatkan toleransi garam pada tanaman *L. vicaryi*. Perubahan N, Ca²⁺, Zn²⁺, Mg²⁺ dan kandungan protein terlarut dapat menjadi dasar bagaimana AMF dapat membantu tanaman *L. vicaryi* di bawah tekanan garam (Qiu et al, 2020).

Serbuk Gergaji

Serbuk gergaji merupakan limbah kayu yang dapat dengan mudah kita temukan, serbuk gergaji ini dapat digunakan untuk imobilisasi sel bakteri *Arthrobacter* sp. Selain itu serbuk gergaji tidak kehilangan aktivitas enzimatisnya setelah disimpan selama 6 minggu pada suhu 25°C hingga 45°C. Serbuk gergaji memiliki struktur labirin yang mempunyai permukaan yang luas untuk perletakan seluler (Hou et al, 2020). Serbuk gergaji mengandung banyak senyawa organik seperti selulosa, hemiselulosa, dan lignin dengan gugus polifenol yang mungkin berguna untuk mengikat logam dan ion metaloid (Jaouadi, 2020)(Daâssi et al, 2016).

Metode Imobilisasi

Saat ini bioremediasi lebih sering menggunakan metode imobilisasi, imobilisasi sendiri merupakan pembatasan mobilitas sel mikroba atau enzimnya dengan mempertahankan vitalitas dan fungsi katalitiknya pada saat yang

bersamaan (Guzik, 2014). Sel imobilisasi (IC) telah banyak digunakan untuk meningkatkan perbaikan tanah yang terkontaminasi secara organik (seperti hidrokarbon aromatik polisiklik, PAH) (Li, 2020). Proses ini dapat memanfaatkan kemampuan alami mikroorganisme untuk membentuk biofilm pada permukaan berbagai bahan, yang biasanya diamati di lingkungan. Metode ini membawa banyak manfaat bagi bioremediasi, seperti efisiensi degradasi polutan yang lebih tinggi, penggunaan kembali biokatalis, dan pengurangan biaya yang menghilangkan langkah penyaringan sel. Sedangkan untuk efek imobilisasi pada biochar serbuk gergaji pinus (suhu pirolisis 300°C) untuk Pb sangat kurang pada lingkungan yang memiliki potensi redoks (Wang, 2021).

Pembakaran

Proses ini didasarkan pada degradasi termal (pembakaran, gasifikasi) biomassa kayu yang tercemar menjadi abu yang mengandung logam dengan volume yang dapat dikontrol. Perbedaan antara insinerasi dan pirolisis adalah setelah pembakaran dan gasifikasi, residu padat hanya mengandung abu (dalam kondisi optimal). Perbedaan lainnya adalah suhu proses insinerasi lebih tinggi dari suhu pirolisis. Insinerasi biomassa yang tercemar logam berat merupakan teknologi yang menjanjikan, namun belum sepenuhnya dikembangkan (Kovacs and K. Szemmelveisz, 2017). Berbagai sistem pembakaran saat ini sedang dikembangkan untuk aplikasi skala lapangan. Dalam waktu dekat, metode ini dapat memberikan alternatif yang ramah lingkungan dan dapat diterima secara ekonomi.

Biochar

Biochar diperoleh dengan konversi termokimia biomassa dengan adanya oksigen terbatas, berupa bahan padat dengan aromatik tinggi dan kandungan karbon tinggi (kandungan karbon lebih dari 60%). Biochar berperan penting dalam memperbaiki sifat tanah (seperti memperbaiki kualitas tanah dan retensi hara, serta meningkatkan hasil panen) (Agegnehu, 2017). Serbuk kayu dicuci dengan air, dikeringkan dengan udara, dan digiling hingga ukuran kurang dari 1,0 mm untuk menghasilkan biochar. Berdasarkan analisis termogravimetri, penurunan berat serbuk gergaji pinus biochar yang cepat terjadi pada suhu sekitar 350°C, yang menunjukkan bahwa perubahan komposisi biochar telah berubah, dan bobot biochar relatif stabil (Rajapaksha, 2016). Biochar yang dihasilkan dari serbuk gergaji pinus lebih efektif menyerap karbon dioksida dari lumpur biochar pabrik kertas (Igalavithana, 2020). Penerapan biochar sebagian besar ditentukan oleh morfologi permukaannya (Ho et al., 2017; Mitra dkk., 2016; Premarathna et al., 2019) (Gujre, 2020). Mekanisme yang mendasari interaksi ini dan perannya dalam degradasi PAH tanah tetap ada tidak jelas. Dengan demikian, karakterisasi komunitas mikroba tanah akan berkontribusi untuk pemahaman yang lebih baik tentang proses ekologi yang mendorong bioremediasi, dan interaksi tumbuhan-mikroba dan mikroba-mikroba (Bao dkk., 2019; Jiao et al., 2016a) (Ma, 2021).

Eksudat akar yang juga bervariasi tergantung pada genotipe mempengaruhi struktur dan fungsi komunitas mikroba rhizosfer nitias (Leisso et al., 2018) (Somera, 2021). Dalam perawatan biochar yang tidak dimodifikasi, SOM diturunkan dari biochar dapat bergabung dengan logam berat untuk membentuk kompleks organik dan mengarah pada pelarutan bersama, sehingga meningkatkan

kemampuan migrasi (Wen dkk., 2018; Liang dkk., 2019). (Yan, 2021). Penyerapan polutan ke dinding sel jamur telah kembali porting dalam banyak studi yang mungkin berkontribusi dan sangat penting dalam penghapusan polutan (Kumar dan Dwivedi, 2019 ,b; Tu et al., 2018; Chen dkk., 2019) (Kumar, 2021). Bahan baku untuk memproduksi biochar adalah terdiri dari banyak sumber, seperti kayu keras, kotoran hewan, beras, sekam, jerami, ampas tebu, bambu, sisa tanaman, limbah padat kota (MSW), dll. (Tan et al., 2018) (Hussain, 2021). Sebuah penelitian menemukan bahwa aplikasi biochar di tanah lempung meningkatkan konsentrasi PAH pada akar dan sayuran daun dan akar serta daun (Wang et al., 2018) (Wang, 2019). Biochar tidak hanya mampu mengubah ketersediaan anorganik N melalui serapan (Xu et al., 2016) (Zhu, 2019). Biochar adalah produk sampingan berkelanjutan yang kaya karbon dari bahan bakar versi bahan baku di bawah udara terbatas, atau inert (yaitu, nitrogen) atau reatmosfer aktif (yaitu, karbon dioksida) (Igalavithana et al., 2018a, 2018b)(Igalavithana, 2019). Biochar adalah residu organik padat yang diperoleh dari biomassa pirolisis. Biochar, digunakan sebagai pembenah tanah memiliki pengaruh yang signifikan berpengaruh pada kesuburan tanah dengan cara merubah kimiawi, biologi dan fisik karakteristik tanah (Awad et al., 2018) (Oni, 2019).

Konvensi Biokimia Biomassa

Mikroba atau enzim mikroba dapat menguraikan biomassa menjadi bahan bakar gas atau cair untuk menghasilkan bahan bakar cair atau gas, seperti biogas atau bioetanol. Enzim mikroba dapat memecah polisakarida kompleks menjadi monosakarida, dan kemudian menjadi alkohol atau asam organik. Di antara transformasi biokimia yang berbeda, teknologi yang paling populer adalah pencernaan anaerobik dan fermentasi(Roy, 2018).

Bioremediasi Tanah

Enzim pengurai lignolitik telah terbukti mendegradasi sejumlah besar polutan dalam kultur cair, saat ini mulai dikembangkan bioremediasi jamur di tanah yang terkontaminasi. Aktivitas oksidatif dalam proses bioremediasi tanah ditentukan dengan cara mengekstraksi tanah dengan buffer asetat atau fosfat, kemudian aktivitas enzim diukur dari ekstraknya. Selain substrat tanah, enzim juga dapat dikombinasikan dengan lignoselulosa yang digunakan sebagai pembawa dan substrat untuk inokulasi jamur(Tuomela, 2019). Studi transkriptomik dan proteomik telah menunjukkan bahwa sebagian besar gen oksidoreduktase fungsional adalah MnP, dan tidak ada LiPs, VPs, atau lakase yang terdeteksi pada sejumlah besar sampel lapangan kayu busuk(Hori, 2018).

Teknik Bioremediasi

Terdapat dua metode perawatan utama untuk bioremediasi, yaitu ex situ dan in situ. Remediasi ex situi biasanya melibatkan penggalian situs yang terkontaminasi dan membuang limbah di tempat lain, sedangkan untuk in situ berupa pemulihan dengan mengurangi sumber pencemaran(Azubiike, 2016)(Celine, 2020). Kemudian, bioremediasi dapat dipecah menjadi metode yang memanfaatkan komunitas mikroba lokal dan komplementer Spesies mikroba khusus (bioaugmentasi). Ada beberapa opsi dan kriteria kinerja yang perlu

dipertimbangkan Saat memilih metode, namun tidak terbatas pada: sifat polutan, kondisi lingkungan, anggaran, limbah Toksisitas dan kedalaman serta area kontaminasi situs(Evans, 2018).

Sistem Berpori

Penambahan serbuk gergaji (dalam persentase yang berbeda) memiliki dampak yang lebih besar pada sifat hidrolis batu bata dari pada perubahan suhu serat. Hal tersebut jelas menunjukkan bahwa semakin banyak serpihan kayu semakin banyak maka daya serap airnya pun semakin meningkat. Memang, pada awal pengujian tekanan air, sampel yang dibakar pada suhu 1100°C menyerap air lebih lambat dibandingkan sampel lainnya, tetapi ketika mencapai saturasi paksa, batu bata yang dibakar pada suhu 1100°C menyerap lebih banyak air. Alih-alih membakar pada 950°C, pada gilirannya menyerap api di atas 800°C (Cultrone, 2020). Perbedaan ini merupakan tanda bahwa sistem berpori berubah seiring dengan kenaikan suhu lingkungan. Pembuluh kapiler di antara lubang menjadi lebih berliku, sehingga batu bata lebih sulit menyerap air. Kerutan dari sistem berpori dievaluasi dengan mengukur derajat interkoneksi antar lubang.

Remidiasi Logam Berat Yang Dimediasi AMF

Jamur mikoriza arbuskular mendetoksifikasi logam berat dengan berpartisipasi langsung dalam adsorpsi logam pada permukaan jamur dan melumpuhkannya di dalam tanah dengan cara gloomalin. Serbuk gergaji bambu kering (BSD) digunakan sebagai katalisator untuk meningkatkan laju disolusi logam konsorsium bakteri pengoksidasi besi asli(Sajjad, 2020). Miselium AMF mendorong distribusi logam berat dengan melakukan chelating pada struktur jamur HMs dan chelating HMs. Hal ini merupakan salah satu mekanisme toleransi, yaitu jamur secara langsung berpartisipasi dalam memberikan penghalang fisik bagi HMs untuk memasuki tanaman(Riaz, 2021). Spora AMF dapat berkecambah secara mandiri, tetapi perkembangan AMF tidak dapat menyelesaikan siklus hidup tanpa inang, dan jamur mulai menghasilkan miselium yang kuat. AMF memiliki strategi bertahan hidup yang berbeda, seperti pengaturan struktur infeksi.

Tabel 1 : Mikroorganisme Tahan Logam Berat

| Mikroorganisme | Logam Berat | Hasil | Referensi |
|---|---|--|-----------------|
| Aspergillus sydowii PA F-2 | TCF dan Cd(II) | Penambahan glukosa eksogen dan sukrosa secara signifikan meningkatkan penghilangan TCF dan Cd (II). Hasil kami menunjukkan bahwa A. sydowii PA F-2 mungkin berguna untuk bioremediasi ko-kontaminasi oleh TCF dan Cd (II). | (Zhang , 2019) |
| Cladosporeum perangustum, Penicillium commune, Paecilomyces lilacinus dan Fusarium equiseti | Cr | Toksisitas limbah yang diolah berkurang secara signifikan dan telah mendukung pertumbuhan Triticum aestivum. | (Sharma , 2019) |
| Mikroalga | arsenic (As), cadmium (Cd), chromium (Cr), lead (Pb) and mercury (Hg) | mikroalga menunjukkan toleransi dan respons yang bervariasi serta kemampuan bioakumulasi terhadap logam berat. Berbeda gugus fungsi serta protein dan peptida bertanggung jawab mengikat logam. | (Leong , 2020) |
| Bakteri Aliivibrio fischeri dan Photobacterium luminescen | Merkuri (Hg) | Campuran kedua bakteri dalam mikroorganisme menguntungkan tersebut menghasilkan hasil yang positif untuk penghitungan merkuri anorganik dan dapat dicatat dengan sintesis bioluminescence. | (Kumari , 2020) |
| Bacillus subtilis strain 1556WTNC | Ni, Cu, Zn dan Pb | Berpotensi menghilangkan sefaleksin dan logam berat dari limbah yang diolah dari limbah dalam satu tahap. B. subtilis juga memiliki keunggulan lain yaitu tidak mahal, ramah lingkungan, tidak patogen, tidak menghasilkan produk sampingan yang toksik. | (Lalung , 2014) |
| Pseudomonas gessardii LZ-E | Cr(VI) | Degradasi naftalen dapat mendorong reduksi Cr (VI) pada P. gessardii LZ-E sebagai katekol dan asam ftalat yang dihasilkan dalam degradasi naftalen mampu mereduksi Cr (VI) | (Huang , 2016) |

Prospek dan Tantangan Masa Depan

Jamur mikoriza arbuskular membantu bioremediasi tanah yang terkontaminasi oleh HMS adalah metode yang muncul. Budidaya tanaman pertanian membutuhkan lahan subur dan air yang berlebihan, namun sayangnya penggunaan pupuk kimia dan pestisida telah menyebabkan pencemaran lahan pertanian, dan karena masuknya polutan beracun dalam jumlah besar (kadmium, arsen, timbal), tanah dan air. Menyebabkan beban yang sangat besar. Atau merkuri), dan karena rantai makanan naik, kesehatan manusia juga berisiko besar (Riaz, 2021). Sejumlah besar studi telah mengusulkan bahwa AMF dapat secara efektif mengurangi kerusakan HM terkait dalam sistem pabrik melalui strategi langsung atau tidak langsung.

SIMPULAN

Bioremediasi merupakan salah satu teknologi remediasi yang memanfaatkan mikroorganisme. Teknologi bioremediasi dipilih karena ekonomis, cukup efektif, efisien, dan lebih ramah lingkungan. Mikoriza adalah hubungan yang saling menguntungkan antara jamur dan tumbuhan yang ditularkan melalui tanah akar. Jamur mikoriza memberikan nutrisi penting bagi tanaman inang yang digunakan untuk sumber gula atau lipid. Serbuk gergaji mengandung banyak senyawa organik seperti selulosa, hemiselulosa, dan lignin dengan gugus polifenol yang mungkin berguna untuk mengikat logam dan ion metaloid. Dengan menggunakan metode imobilisasi dan penggunaan AMF dapat secara efektif mengurangi polutan di lingkungan terkait dalam sistem pabrik melalui strategi langsung atau tidak langsung.

DAFTAR PUSTAKA

- C. M. Quintella, A. M. T. Mata, and L. C. P. Lima, "Overview of bioremediation with technology assessment and emphasis on fungal bioremediation of oil contaminated soils," *J. Environ. Manage.*, vol. 241, no. March, pp. 156–166, 2019.
- N. Akhtar and M. A. ul Mannan, "Mycoremediation: Expunging environmental pollutants," *Biotechnol. Reports*, vol. 26, p. e00452, 2020.
- X. Zhu, B. Chen, L. Zhu, and B. Xing, "Effects and mechanisms of biochar-microbe interactions in soil improvement and pollution remediation: A review," *Environ. Pollut.*, vol. 227, pp. 98–115, 2017.
- J. Ruytinx, A. Kafle, M. Usman, L. Coninx, S. D. Zimmermann, and K. Garcia, "Micronutrient transport in mycorrhizal symbiosis; zinc steals the show," *Fungal Biol. Rev.*, vol. 34, no. 1, pp. 1–9, 2020.
- O. C. Emmanuel and O. O. Babalola, "Productivity and quality of horticultural crops through co-inoculation of arbuscular mycorrhizal fungi and plant growth promoting bacteria," *Microbiol. Res.*, vol. 239, no. May, p. 126569, 2020.
- Y. J. Qiu *et al.*, "Mediation of arbuscular mycorrhizal fungi on growth and biochemical parameters of *Ligustrum vicaryi* in response to salinity," *Physiol. Mol. Plant Pathol.*, vol. 112, no. May, p. 101522, 2020.
- P. Hou *et al.*, "Win-win: Application of sawdust-derived hydrochar in low fertility soil improves rice yield and reduces greenhouse gas emissions from agricultural ecosystems," *Sci. Total Environ.*, vol. 748, p. 142457, 2020.
- M. Jaouadi, "Characterization of activated carbon, wood sawdust and their application for boron adsorption from water," *Int. Wood Prod. J.*, vol. 0, no. 0, pp. 1–12, 2020.
- D. Daâssi, H. Zouari-Mechichi, F. Frikha, S. Rodríguez-Couto, M. Nasri, and T. Mechichi, "Sawdust waste as a low-cost support-substrate for laccases production and adsorbent for azo dyes decolorization," *J. Environ. Heal. Sci. Eng.*, vol. 14, no. 1, pp. 1–12, 2016.
- U. Guzik, K. Hupert-Kocurek, A. Marchlewicz, and D. Wojcieszńska, "Enhancement of biodegradation potential of catechol 1,2-dioxygenase through its immobilization in calcium alginate gel," *Electron. J. Biotechnol.*, vol. 17, no. 2, pp. 83–88, 2014.
- J. Li *et al.*, "Viability and distribution of bacteria immobilized on Sawdust@silica: The removal mechanism of phenanthrene in soil," *Ecotoxicol. Environ. Saf.*, vol. 198,

no. April, p. 110649, 2020.

- J. Wang *et al.*, "Analysis of the long-term effectiveness of biochar immobilization remediation on heavy metal contaminated soil and the potential environmental factors weakening the remediation effect: A review," *Ecotoxicol. Environ. Saf.*, vol. 207, no. June 2020, p. 111261, 2021.
- H. Kovacs and K. Szemmelveisz, "Disposal options for polluted plants grown on heavy metal contaminated brownfield lands – A review," *Chemosphere*, vol. 166, pp. 8–20, 2017.
- G. Agegnehu, A. K. Srivastava, and M. I. Bird, "The role of biochar and biochar-compost in improving soil quality and crop performance: A review," *Appl. Soil Ecol.*, vol. 119, no. April, pp. 156–170, 2017.
- K. Lou, A. U. Rajapaksha, Y. S. Ok, and S. X. Chang, "Pyrolysis temperature and steam activation effects on sorption of phosphate on pine sawdust biochars in aqueous solutions," *Chem. Speciat. Bioavailab.*, vol. 28, no. 1–4, pp. 42–50, 2016.
- D. Igalavithana *et al.*, "Carbon dioxide capture in biochar produced from pine sawdust and paper mill sludge: Effect of porous structure and surface chemistry," *Sci. Total Environ.*, vol. 739, p. 139845, 2020.
- N. Gujre, A. Soni, L. Rangan, D. C. W. Tsang, and S. Mitra, "Sustainable improvement of soil health utilizing biochar and arbuscular mycorrhizal fungi: A review," *Environ. Pollut.*, p. 115549, 2020.
- X. Ma *et al.*, "Soil microbial community succession and interactions during combined plant/white-rot fungus remediation of polycyclic aromatic hydrocarbons," *Sci. Total Environ.*, vol. 752, p. 142224, 2021.
- T. S. Somera, S. Freilich, and M. Mazzola, "Comprehensive analysis of the apple rhizobiome as influenced by different Brassica seed meals and rootstocks in the same soil/plant system," *Appl. Soil Ecol.*, vol. 157, no. June 2020, p. 103766, 2021.
- C. Yan, J. Wen, Q. Wang, L. Xing, and X. Hu, "Mobilization or immobilization? The effect of HDTMA-modified biochar on As mobility and bioavailability in soil," *Ecotoxicol. Environ. Saf.*, vol. 207, no. October 2020, p. 111565, 2021.
- V. Kumar and S. K. Dwivedi, "Bioremediation mechanism and potential of copper by actively growing fungus *Trichoderma lixii* CR700 isolated from electroplating wastewater," *J. Environ. Manage.*, vol. 277, no. August 2020, p. 111370, 2021.
- R. Hussain, R., K. Ravi, and A. Garg, "Influence of biochar on the soil water retention characteristics (SWRC): Potential application in geotechnical engineering structures," *Soil Tillage Res.*, vol. 204, no. December 2019, p. 104713, 2020.
- J. Wang *et al.*, "Polyaromatic hydrocarbons in biochars and human health risks of food crops grown in biochar-amended soils: A synthesis study," *Environ. Int.*, vol. 130, no. April, p. 104899, 2019.
- X. Zhu, L. Mao, and B. Chen, "Driving forces linking microbial community structure and functions to enhanced carbon stability in biochar-amended soil," *Environ. Int.*, vol. 133, no. October, p. 105211, 2019.
- A. D. Igalavithana *et al.*, "Soil lead immobilization by biochars in short-term laboratory incubation studies," *Environ. Int.*, vol. 127, no. March, pp. 190–198, 2019.
- B. A. Oni, O. Oziegbe, and O. O. Olawole, "Significance of biochar application to the

- environment and economy,” *Ann. Agric. Sci.*, vol. 64, no. 2, pp. 222–236, 2019.
- M. ROY, R. ROYCHOWDHURY, and P. MUKHERJEE, “Remediation of Fly Ash Dumpsites Through Bioenergy Crop Plantation and Generation: A Review,” *Pedosphere*, vol. 28, no. 4, pp. 561–580, 2018.
- M. Tuomela and A. Hatakka, *Oxidative fungal enzymes for bioremediation*, Third Edit., vol. 6, no. August 2018. Elsevier, 2019.
- C. Hori *et al.*, “Multi-omic Analyses of Extensively Decayed Pinus contorta Degrading Enzymes,” *Appl. Environ. Microbiol.*, vol. 84, no. 20, pp. 1–14, 2018.
- C. C. Azubuike, C. B. Chikere, and G. C. Okpokwasili, “Bioremediation techniques—classification based on site of application: principles, advantages, limitations and prospects,” *World J. Microbiol. Biotechnol.*, vol. 32, no. 11, pp. 1–18, 2016.
- S. M. Celin, S. Sahai, A. Kalsi, and P. Bhanot, “Environmental monitoring approaches used during bioremediation of soils contaminated with hazardous explosive chemicals,” *Trends Environ. Anal. Chem.*, vol. 26, p. e00088, 2020.
- L. Evans, *Bioremediation Techniques for Agricultural Pollutants*. Elsevier Inc., 2018.
- G. Cultrone, I. Aurrekoetxea, C. Casado, and A. Arizzi, “Sawdust recycling in the production of lightweight bricks: How the amount of additive and the firing temperature influence the physical properties of the bricks,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 235, p. 117436, 2020.
- W. Sajjad *et al.*, “Dissolution of Cu and Zn-bearing ore by indigenous iron-oxidizing bacterial consortia supplemented with dried bamboo sawdust and variations in bacterial structural dynamics: A new concept in bioleaching,” *Sci. Total Environ.*, vol. 709, 2020.
- M. Riaz *et al.*, “Arbuscular mycorrhizal fungi-induced mitigation of heavy metal phytotoxicity in metal contaminated soils: A critical review,” *J. Hazard. Mater.*, vol. 402, no. September 2020, p. 123919, 2021.
- C. Zhang *et al.*, “Simultaneous degradation of trichlorfon and removal of Cd(II) by *Aspergillus sydowii* strain PA F-2,” *Environ. Sci. Pollut. Res.*, vol. 26, no. 26, pp. 26844–26854, 2019.
- S. Sharma and P. Malaviya, “Bioremediation of tannery wastewater by chromium resistant novel fungal consortium,” *Ecol. Eng.*, vol. 91, pp. 419–425, 2016.
- Y. K. Leong and J. S. Chang, “Bioremediation of heavy metals using microalgae: Recent advances and mechanisms,” *Bioresour. Technol.*, vol. 303, no. January, p. 122886, 2020.
- S. Kumari, Amit, R. Jamwal, N. Mishra, and D. K. Singh, “Recent developments in environmental mercury bioremediation and its toxicity: A review,” *Environ. Nanotechnology, Monit. Manag.*, vol. 13, no. November 2019, p. 100283, 2020.
- A. A. Lalung J, “Removal of Cephalixin Antibiotic and Heavy Metals from Pharmaceutical Effluents using *Bacillus subtilis* Strain,” *Expert Opin. Environ. Biol.*, vol. 04, no. 02, pp. 2–10, 2014.
- H. Huang *et al.*, “A novel *Pseudomonas gessardii* strain LZ-E simultaneously degrades naphthalene and reduces hexavalent chromium,” *Bioresour. Technol.*, vol. 207, pp. 370–378, 2016.