

Bela Putra, S.Pt., M.Sc.
Prof. Dr. Ir. Lili Warly, M.Agr.
Evitayani, S.Pt., M.Agr., Pd.D.
Bopalyon Pedi Utama, S.Pt., M.Si.



Fitoremediasi Lahan Tambang Emas

Berbasis Fungi Mikoriza Arbuskula
untuk Pengembangan Hijauan

FITOREMIDIASI LAHAN TAMBANG EMAS

Berbasis Fungi Mikoriza Arbuskula untuk Pengembangan Hijauan

UU No 28 tahun 2014 tentang Hak Cipta

Fungsi dan sifat hak cipta Pasal 4

Hak Cipta sebagaimana dimaksud dalam Pasal 3 huruf a merupakan hak eksklusif yang terdiri atas hak moral dan hak ekonomi.

Pembatasan Pelindungan Pasal 26

Ketentuan sebagaimana dimaksud dalam Pasal 23, Pasal 24, dan Pasal 25 tidak berlaku terhadap:

- i. Penggunaan kutipan singkat Ciptaan dan/atau produk Hak Terkait untuk pelaporan peristiwa aktual yang ditujukan hanya untuk keperluan penyediaan informasi aktual;
- ii. Penggandaan Ciptaan dan/atau produk Hak Terkait hanya untuk kepentingan penelitian ilmu pengetahuan;
- iii. Penggandaan Ciptaan dan/atau produk Hak Terkait hanya untuk keperluan pengajaran, kecuali pertunjukan dan Fonogram yang telah dilakukan Pengumuman sebagai bahan ajar; dan
- iv. Penggunaan untuk kepentingan pendidikan dan pengembangan ilmu pengetahuan yang memungkinkan suatu Ciptaan dan/atau produk Hak Terkait dapat digunakan tanpa izin Pelaku Pertunjukan, Produser Fonogram, atau Lembaga Penyiaran.

Sanksi Pelanggaran Pasal 113

1. Setiap Orang yang dengan tanpa hak melakukan pelanggaran hak ekonomi sebagaimana dimaksud dalam Pasal 9 ayat (1) huruf i untuk Penggunaan Secara Komersial dipidana dengan pidana penjara paling lama 1 (satu) tahun dan/atau pidana denda paling banyak Rp100.000.000 (seratus juta rupiah).
2. Setiap Orang yang dengan tanpa hak dan/atau tanpa izin Pencipta atau pemegang Hak Cipta melakukan pelanggaran hak ekonomi Pencipta sebagaimana dimaksud dalam Pasal 9 ayat (1) huruf c, huruf d, huruf f, dan/atau huruf h untuk Penggunaan Secara Komersial dipidana dengan pidana penjara paling lama 3 (tiga) tahun dan/atau pidana denda paling banyak Rp500.000.000,00 (lima ratus juta rupiah).

FITOREMIDIASI LAHAN TAMBANG EMAS

Berbasis Fungi Mikoriza Arbuskula untuk Pengembangan Hijauan

Bela Putra, S.Pt., M.Sc.
Prof. Dr. Ir. Lili Warly, M.Agr.
Evitayani, S.Pt., M.Agr., Pd.D.
Bopalyon Padi Utama, S.Pt., M.Si.



Cerdas, Bahagia, Mulia, Lintas Generasi.

**FITOREMEDIASI LAHAN TAMBANG EMAS
BERBASIS FUNGI MIKORIZA ARBUSKULA
UNTUK PENGEMBANGAN HIJAUAN**

Bela Putra ... [et al.]

Desain Cover :

Ali Hasan Zein

Sumber :

<https://unsplash.com/>

Tata Letak :

Emy Rizka Fadilah

Ukuran :

x, 113 hlm, Uk: 15.5x23 cm

ISBN :

978-623-02-3794-2

Cetakan Pertama :

November 2021

Hak Cipta 2021, Pada Penulis

Isi diluar tanggung jawab percetakan

Copyright © 2021 by Deepublish Publisher

All Right Reserved

Hak cipta dilindungi undang-undang
Dilarang keras menerjemahkan, memfotokopi, atau
memperbanyak sebagian atau seluruh isi buku ini
tanpa izin tertulis dari Penerbit.

**PENERBIT DEEPUBLISH
(Grup Penerbitan CV BUDI UTAMA)**

Anggota IKAPI (076/DIY/2012)

Jl.Rajawali, G. Elang 6, No 3, Drono, Sardonoharjo, Ngaglik, Sleman

Jl.Kaliurang Km.9,3 – Yogyakarta 55581

Telp/Faks: (0274) 4533427

Website: www.deepublish.co.id

www.penerbitdeepublish.com

E-mail: cs@deepublish.co.id

PRAKATA

Puji dan syukur kami panjatkan kepada Allah Swt. atas segala nikmat yang telah diberikan sehingga kami dapat menyelesaikan buku ini. Buku dengan judul *Fitoremediasi Lahan Tambang Emas Berbasis Fungi Mikoriza Arbuskula untuk Pengembangan Hijauan* disusun dengan berbagai pertimbangan. Perkembangan industri pertambangan di Indonesia terjadi sangat pesat dan menyeluruh. Banyak industri pertambangan yang mempunyai izin resmi dan dibawah kendali pemerintah, akan tetapi banyak juga terdapat usaha pertambangan tanpa memiliki izin resmi (PETI). Berdasarkan undang-undang yang berlaku, setiap pengusaha tambang wajib mengendalikan lahan tambang maupun pascatambang. Pengendalian usaha tambang dalam rehabilitasi dengan tujuan mengembalikan penampakan bekas tambang seperti kondisi semula.

Kondisi lahan pascatambang adalah tingginya logam berat yang dapat mengancam ekologi. Salah satu usaha pemulihan lahan bekas tambang adalah melalui teknologi fitoremediasi. Konsep teknologi fitoremediasi adalah memanfaatkan tanaman hijau sebagai agen perbaikan tanah. Teknologi pemanfaatan mikroorganisme dalam usaha bioremediasi dapat dilakukan. Salah satu yang dapat digunakan adalah fungi mikoriza arbuskula (FMA). Oleh karena itu buku ini menyajikan sedikit gambaran konsep fitoremediasi dengan pemanfaatan fungi mikoriza arbuskula dengan harapan dapat menjadi bagian referensi dan pencerahan kepada masyarakat luas.

Buku ini diterbitkan selain untuk pengetahuan umum juga dapat digunakan sebagai penunjang proses pembelajaran pada mata kuliah tertentu di perguruan tinggi. Buku ini disusun agar membantu mahasiswa untuk memperkaya pengetahuannya.

Terima kasih penulis sampaikan kepada Deputi Bidang Penguatan Riset dan Pengembangan Kementerian Riset dan Teknologi/Badan Riset dan Inovasi Nasional yang telah mendanai penelitian skema Penelitian

Kerja Sama Perguruan Tinggi (PKPT). Penulis juga menyampaikan terima kasih kepada rekan mitra kerja sama, Prof. Dr. Ir. Lili Warly, M,Agr. dan Dr. Evitayani, S.Pt., M.Agr. yang telah membimbing, memberikan ilmu baik secara langsung maupun tidak langsung, termasuk berbagai metode diskusi baik formal maupun nonformal. Terima kasih juga disampaikan kepada rektor Universitas Muara Bungo yang telah memberi dukungan dan semangat dalam proses penyelesaian buku ini.

Penulis menyadari dalam penyusunan buku ini banyak kekurangan, oleh karena itu masukan dan saran yang sifatnya membangun sangat penulis harapkan guna untuk penyempurnaan edisi berikutnya. Terima kasih.

Muara Bungo, November 2021

Penulis

KATA PENGANTAR PENERBIT

Alhamdulillah, segala puji dan syukur tidak terhingga penerbit sampaikan kehadiran Allah SWT, dengan terbitnya buku *Fitoremidiasi Lahan Tambang Emas Berbasis Fungi Mikoriza Arbuskula untuk Pengembangan Hijauan*, karya Bela Putra, S.Pt., M.Sc. dkk.

Dalam kajian yang komprehensif ini, Bela Putra, S.Pt., M.Sc. dkk, memaparkan penjelasan yang mendalam dan unik mengenai teknologi fitoremidiasi. Secara detail, buku ini terdiri atas 9 bab. Sebagai permulaan, penulis memberikan bahasan tentang sistem pertambangan emas dan fungi mikoriza arbuskula. Kemudian terdapat pula penjelasan mengenai teknologi fitoremediasi, mekanismenya, dan aplikasi FMA pada hijauan makanan ternak.

Akhirnya, selain syukur ke hadirat Ilahi, penerbit juga berharap semoga dapat mendorong masyarakat umum untuk selalu antusias dalam menambah wawasan dan ilmu pengetahuan.

DAFTAR ISI

PRAKATA.....	v
KATA PENGANTAR PENERBIT	vii
DAFTAR ISI	viii
BAB 1 SISTEM PERTAMBANGAN EMAS	1
A. Pertambangan Emas.....	1
B. Dampak Negatif Pertambangan Emas.....	1
BAB 2 FUNGI MIKORIZA ARBUSKULA	3
A. Pengertian Fungi Mikoriza Arbuskula.....	3
B. Manfaat Fungi Mikoriza	7
C. Ekologi Fungi Mikoriza.....	8
D. Aplikasi FMA pada Lahan Tercemar	9
BAB 3 TEKNOLOGI FITOREMEDIASI	11
A. Pengertian Teknologi Fitoremediasi.....	11
B. Teknik Fitoremediasi	13
BAB 4 MEKANISME PENYERAPAN, TRANSLOKASI, DAN TOLERANSI.....	21
BAB 5 FAKTOR DETERMINASI FITOREMEDIASI LOGAM BERAT	24
A. Jenis Tanaman	24
B. Karakteristik Media Tanam	25
C. Zona Akar.....	26
D. Akselerator Fitoremediasi	26
E. Faktor Lingkungan	27
BAB 6 AGEN FITOREMEDIASI PADA LAHAN BEKAS TAMBANG.....	28
A. Agen Fitoremediasi Lahan Bekas Tambang	28
B. Mikoriza sebagai Agen Remediasi Tanah	30

C.	Peranan Mikoriza Arbuskula dalam Fitostabilisasi.....	32
D.	Peranan Mikoriza Arbuskula Dalam Fitoekstraksi.....	33
E.	Interaksi FMA dengan Hiperakumulator dan Non-Akumulator	34
F.	Interaksi Jamur Mikoriza Arbuskula dan Non-Akumulator	37
G.	Peranan Mikoriza Arbuskular dalam Remediasi	38
BAB 7	APLIKASI FMA DALAM FITOREMEDIASI.....	39
A.	Mekanisme Fitoremediasi Berbasis Mikoriza Arbuskula	41
B.	Kumulasi dan Penyerapan Logam Berat dengan Glomalin	42
C.	Akumulasi Logam Berat pada Struktur Fungi Mikoriza Arbuskula	43
D.	Spesies FMA dalam Fitoremediasi	46
BAB 8	MEKANISME BOKIMIA	49
A.	Peningkatan Serapan Hara pada Tanaman Inang	49
B.	Menginduksi Sistem Pertahanan Enzimatik dan Non Enzimatik.....	50
C.	Peningkatan Biomassa Tanaman Inang.....	52
D.	Morfologi Akar dan Perubahan Rizosfer	53
BAB 9	APLIKASI FMA PADA HIJAUAN MAKANAN TERNAK	55
	DAFTAR PUSTAKA	57
	INDEKS	92
	PROFIL PENULIS	93

BAB 1

SISTEM PERTAMBANGAN EMAS

A. Pertambangan Emas

Pertambangan merupakan rangkaian kegiatan manusia untuk mencari, mengekstrak, mengolah, dan menggunakan hasil galian berupa mineral, energi panas bumi, minyak dan gas bumi, batu bara, emas, dan lainnya. Pengertian pertambangan menurut UU No. 4 Tahun 2009 yakni “sebagian atau seluruh tahapan kegiatan dalam rangka penelitian, pengelolaan dan pengusahaan mineral atau batubara yang meliputi penyelidikan umum, eksplorasi, studi kelayakan, konstruksi, pertambangan, pengolahan dan pemurnian, pengangkutan dan penjualan, serta kegiatan pascatambang.”

Di Indonesia, tambang emas tersebar di berbagai daerah seperti Jawa, Kalimantan, Sumatra, Irian Jaya dan Sulawesi. Di Kabupaten Bungo, lahan yang dijadikan lokasi pertambangan emas sangat luas. Data statistik tahun 2010 menunjukkan bahwa, lokasi pertambangan emas di Kabupaten Bungo Provinsi Jambi mencakup Kabupaten Rantau Panjang seluas 1900 Ha, Kabupaten Pelepat seluas 1800 Ha, Kecamatan Limbur seluas 500 Ha, Kecamatan Tana Sepengal seluas 2000 Ha, Kecamatan Pelepat Iiril 1800 Ha, dan Kecamatan Jujuhan seluas 8000 Ha.

B. Dampak Negatif Pertambangan Emas

Amalgamasi merkuri dan sianidasi merupakan metode pertambangan emas yang tidak jarang digunakan. Dampak penggunaan merkuri (Hg) atau sianida ternyata berpotensi menghasilkan limbah lumpur dengan kandungan logam berat yang tinggi atau dikenal dengan istilah *tailing*. Di Kabupaten Bungo, *tailing* di daerah pertambangan emas tidak jarang kali dibuang begitu saja tanpa ada *treatment* lanjutan untuk

menjaga lingkungan. *Tailing* mengandung beberapa logam berat seperti Pb, Cu, Cd, Hg and As (W. Chen *et al.*, 2016).

Krisnayanti *et al.* (2012) di dalam risetnya juga melaporkan bahwa limbah dari proses amalgamasi umumnya mengandung $3.002 \text{ mg Hg kg}^{-1}$, sementara limbah proses sianidasi mengandung $1.628 \text{ mg Hg kg}^{-1}$. Pencemaran logam berat seperti ini jelas membahayakan makhluk hidup seperti hewan, tanaman, dan manusia (Bae *et al.* 2011;Wahl *et al.* 2010), serta berpotensi merusak ekosistem (Bundschuh *et al.*, 2013). Fashola *et al.* (2016) juga menambahkan bahwa dampak negatif pertambangan yakni tanah dan air menjadi terkontaminasi dengan unsur-unsur dari logam berat. Begitu juga hasil riset dari Choi & Song (2016) yang sepakat bahwa kegiatan pertambangan emas berpotensi menimbulkan dampak negatif bagi ekosistem yang meliputi tanah, air, tanaman, dan hutan baik dalam tingkat lokal, regional, maupun global. Pada intinya, kegiatan pertambangan rakyat yang dikaji dari perspektif lingkungan memang memiliki potensi merusak dan berakibat pada deforestasi parah, degradasi lahan, dan rusaknya ekosistem hutan (Jaelani *et al.*, 2018).

BAB 2

FUNGSI MIKORIZA ARBUSKULA

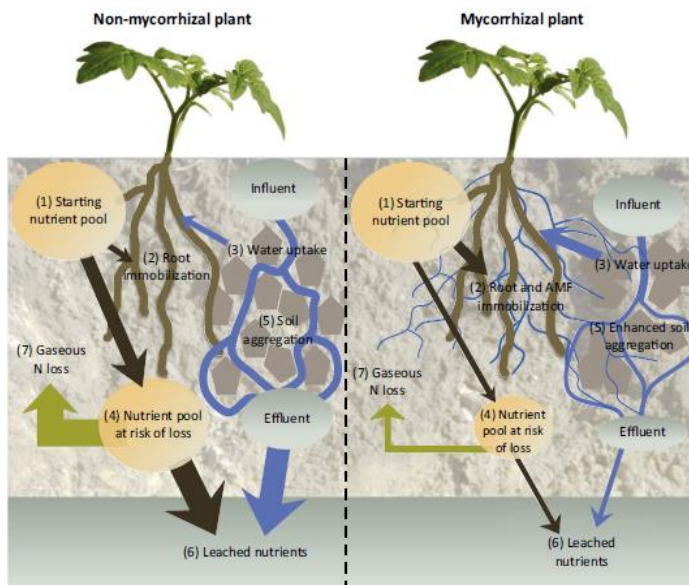
A. Pengertian Fungi Mikoriza Arbuskula

Fungi mikoriza arbuskula telah dikenal selama 600 juta tahun sebagai jamur yang berasosiasi dengan akar inangnya (Redecker *et al.*, 2000). Inang di sini sangat sangat menentukan siklus hidup fungi mikoriza arbuskula (Requena *et al.*, 2007). Menurut Klironomos (2000), simbiosis mikoriza arbuskula merupakan jenis simbiosis mikoriza yang terluas penyebarannya tanpa spesifisitas tanaman inang. Fungi mikoriza arbuskula atau FMA merupakan salah satu fungi yang hidup di dalam tanah. FMA mampu bersimbiosis dengan sebagian besar (97%) famili tanaman, seperti tanaman pangan, hortikultura, kehutanan, perkebunan, dan tanaman pakan. FMA memang dikenal selalu berasosiasi dengan tanaman tingkat tinggi dan menciptakan simbiosis mutualisme (Smith dan Smith, 2012).

Mikoriza merupakan simbiosis mutualistik yang melibatkan jamur dengan perakaran tanaman tingkat tinggi. Simbiosis FMA menguntungkan tanaman induk semangnya seperti meningkatkan penyerapan unsur hara, serta resistensi terhadap logam berat dan patogen tular akar. Simbiosis FMA juga mampu bersinergis dengan mikroba lain, berperan aktif dalam siklus nutrisi, serta meningkatkan stabilitas ekosistem (Smith dan Read, 2008). Helber *et al.* (2011) menegaskan bahwa simbiosis mutualisme terbangun karena fungi mikoriza hidup di dalam sel akar dan memperoleh sebagian karbon hasil fotosintesis tanaman. Tanaman di sini juga mendapatkan hara atau keuntungan lain dari fungi mikoriza. Fungi mikoriza arbuskula dan tanaman inang juga dikenal mampu mendeteksi kebutuhan nutrisi yang disediakan oleh simbiannya sehingga kondisi ini

mampu menciptakan kestabilan pemenuhan kebutuhan nutrisi. Kestabilan inilah yang menjadikan simbiosis ini mampu bertahan lama melalui proses “timbang balik” yang melibatkan keduanya (Kiers *et al.*, 2011).

Kondisi lingkungan dengan sedikit ketersediaan Pi berakibat pada pertumbuhan FMA meningkat hingga lebih dari 80% pada akar tanaman (Harrison, 2005). Sementara itu, apabila ketersediaan Pi tinggi maka akan menurunkan kolonisasi FMA (Balzergue *et al.*, 2011). Peranan FMA terbukti mampu meningkatkan pertumbuhan, serta kualitas tanaman inang di kondisi lingkungan yang variatif (Smith dan Read, 2008; Balzergue *et al.*, 2011; Smith dan Smith, 2012). Cavagnaro (2014) melaporkan di dalam risetnya, bahwa FMA ternyata mampu mengurangi unsur hara yang tercuci atau hilang di dalam tanah. Asghari dan Cavagnaro (2011) juga berhasil mendeteksi adanya penurunan konsentrasi NO_3 , NH_4 , dan fosfat yang tercuci akibat meningkatnya kadar pemberian FMA. Tanaman yang diinokulasi dengan FMA dinilai lebih mampu meningkatkan serapan hara dibandingkan tanaman yang tidak diinokulasi. Gambar 1 menunjukkan adanya perbedaan tanaman yang diinokulasi dengan FMA dan pengaruhnya terhadap potensi unsur hara yang tercuci. Potensi tercucinya hara di dalam tanah sangat besar. FMA berperan penting dalam mengurangi unsur hara yang tercuci di dalam tanah. Tanaman yang diinokulasi dengan FMA mampu meningkatkan serapan air dan hara lainnya. Selain itu, FMA juga berperan dalam memperbaiki struktur tanah sehingga dapat menurunkan hara yang tercuci.



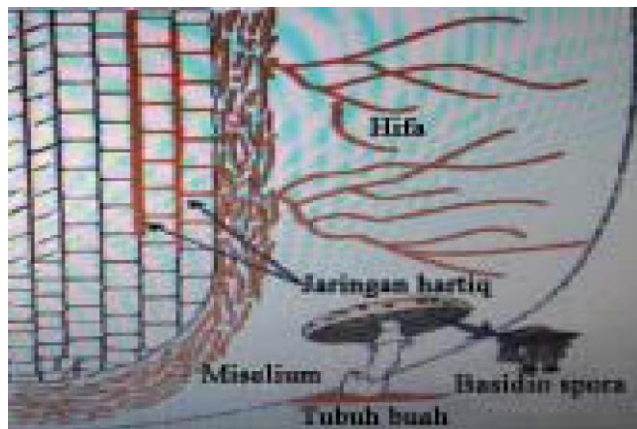
Gambar 1. Tanaman inokulasi FMA dan tanaman non inokulasi FMA.
(Cavagnaro *et al.*, 2015)

Dilihat dari struktur tubuh dan cara menginfeksi akar, FMA dikelompokkan menjadi dua jenis, yakni endomikoriza dan ektomikoriza. Endomikoriza merupakan memiliki jaringan hifa berada di dalam sel korteks dan membentuk struktur khas seperti oval (vesikula) atau bercabang yang disebut (arbuskula) (Pagano dan Rosa, 2015). Endomikoriza disebut juga FMA atau mikoriza vesikula. Fungi endomikoriza tidak memiliki batang tubuh dan tidak dapat diperbanyak tanpa tanaman inang (Lin *et al.*, 2014). Fungi endomikoriza dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Fungi endomikoriza (Invam 2005 *cit.* Musfal 2010)

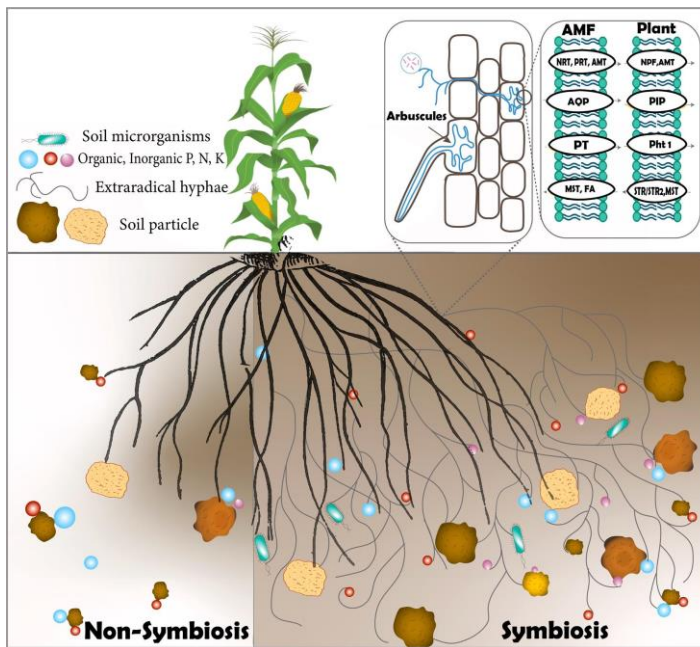
Sementara itu, fungi ektomikoriza merupakan jenis fungi yang jaringan hifanya tidak masuk sampai menuju sel korteks, tetapi berkembang di antara sel tersebut, serta membentuk mantel di permukaan akar. Fungi ektomikoriza memiliki batang tubuh dengan bentuk dan warna yang bervariasi, serta dapat diperbanyak tanpa tanaman inang. Fungi ektomikoriza dapat dilihat pada Gambar 3.



Gambar 3. Fungi ektomikoriza (Invam 2005 *cit.* Musfal 2010)

B. Manfaat Fungi Mikoriza

Terdapat tiga kelompok manfaat FMA yakni bagi tanaman, ekosistem, dan manusia. Bagi tanaman, FMA berperan dalam meningkatkan serapan hara, yakni fosfat (P). Kecepatan masuknya hara P menuju dalam hifa FMA mampu bergerak enam kali lebih cepat pada akar tanaman yang terinfeksi FMA dibandingkan dengan yang tidak. Kondisi ini terjadi karena jaringan hifa eksternal FMA mampu memperluas bidang serapan (Leifheit *et al.*, 2013; Nuccio *et al.*, 2013; Cozzolino *et al.*, 2010). Laporan riset tentang meningkatnya serapan hara akibat inokulasi FMA dilaporkan oleh Kabirun (Jayne dan Quigley, 2014; Corrêa *et al.*, 2015; Sarkar *et al.*, 2015), yakni FMA mampu meningkatkan serapan nitrogen (N) dan kalium (K). Feddermann *et al.* (2010) juga menegaskan bahwa pemberian FMA pada tanaman kacang-kacangan ternyata mampu meningkatkan serapan unsur Zn.



Gambar 4. Peran simbiosis dalam penyerapan unsur hara dari tanah (Riaz *et al.*, 2021)

Fungi mikoriza arbuskula juga melindungi patogen akar dengan cara membungkus permukaan akar oleh mikoriza yang menyebabkan akar terhindar dari serangan hama dan penyakit. Kondisi ini terjadi karena infeksi patogen yang terhambat. Mikoriza juga mampu menggunakan semua kelebihan karbohidrat dan eksudat akar lainnya. Hal inilah yang mampu menciptakan lingkungan dengan kondisi yang tidak cocok bagi patogen. Mikoriza juga telah dilaporkan banyak peneliti sebagai agen yang mampu mengurangi serangan nematoda (Vos *et al.*, 2012; Vos *et al.*, 2013; Lax *et al.*, 2011; Baum *et al.*, 2015).

Bagi ekosistem, dilaporkan oleh Javot *et al.* (2007) bahwa FMA mampu menghasilkan enzim fosfatase yang dapat melepaskan unsur P yang terikat Al dan Fe di dalam lahan masam, serta melepaskan Ca pada lahan berkapur sehingga P menjadi tersedia kembali bagi tanaman. Fungi mikoriza arbuskula juga mampu memperbaiki sifat fisik tanah dengan mengubahnya menjadi gembur. Leifheit *et al.* (2013) dan Nuccio *et al.* (2013) juga melaporkan bahwa FMA melalui akar eksternalnya berhasil memproduksi senyawa glikoprotein glomalin serta asam-asam organik yang mampu mengikat butir-butir tanah menjadi agregat mikro. Melalui proses mekanis oleh hifa eksternal, agregat mikro ini akan membentuk agregat makro yang mudah diserap tanaman.

Mikoriza juga bermanfaat untuk bahan makanan dan obat-obatan, terutama jenis ektomikoriza yakni jamur kuping dan jamur merang. Jamur ini mudah dikenali dan dapat dikonsumsi karena memiliki batang buah dan mengandung protein yang tinggi, vitamin, fosfat, serta kalsium. Ektomikoriza juga mengandung bahan toksik sehingga dapat menyebabkan keracunan bila dikonsumsi (Wiardani, 2010).

C. Ekologi Fungi Mikoriza

Faktor lingkungan berperan sebagai determinator bagi perkembangan FMA. Lingkungan yang sesuai untuk pertumbuhan tanaman umumnya cocok bagi perkembangan spora FMA. Fungi ini hidup dalam tanah dengan kondisi drainase yang baik hingga tergenang seperti lahan sawah. Fungi mikoriza arbuskula banyak ditemui pada tanah yang

memiliki kadar mineral tinggi, baik hutan primer, hutan sekunder, kebun, padang alang-alang, pantai dengan salinitas tinggi, maupun lahan gambut. Lingkungan hidup FMA juga sangat luas dan tidak jarang dijadikan dasar dalam upaya bioremediasi lahan kritis (Zhao *et al.*, 2015).

Ekosistem alami FMA di daerah tropis memiliki ciri khas keanekaragaman spesies yang sangat tinggi, khususnya pada jenis ektomikoriza (Vuorinen *et al.*, 2014). Fungi mikoriza arbuskula yang banyak ditemukan ialah fungi dari genus *acaulospora* dan *glomus*. Hutan alami dengan variasi umur tanaman dan jenisnya yang tinggi sangat mendukung pertumbuhan FMA. Konservasi hutan untuk pertanian justru mengurangi keragaman jenis dan jumlah FMA karena jenis tanaman, unsur hara yang tersedia, dan kandungan bahan organik tanah telah berubah. Praktik pertanian seperti pengolahan tanah, ameliorasi bahan organik, pemupukan, dan penggunaan pestisida juga berpengaruh terhadap keberadaan FMA dan mikroba tanah (Beauregard *et al.*, 2010; Balzergue *et al.*, 2011).

D. Aplikasi FMA pada Lahan Tercemar

Salah satu upaya optimalisasi serapan hara menuju rumput gajah mini (*Pennisetum purpureum* cv. Mott) merupakan dengan menggunakan mikoriza arbuskula. Banyak kajian empiris dan riset ilmiah yang menunjukkan bahwa mikoriza arbuskula mampu meningkatkan hasil tanaman inang pada lahan yang terkontaminasi dengan logam berat dan mampu memperbaiki kesuburan tanah (Harms *et al.*, 2011). Rangel *et al.* (2014) pun melaporkan, bahwa kebanyakan tanaman yang mampu beradaptasi dengan lahan terkontaminasi dengan logam berat merupakan tanaman berasosiasi dengan mikoriza arbuskula.

Fungi mikoriza arbuskula juga berperan dalam meningkatkan serapan nutrisi bagi tanaman. Kajian empiris dan riset ilmiah Ahmed *et al.* (2011) dan Rangel *et al.* (2014) membuktikan, bahwa Mikoriza arbuskula mampu mengurangi fitotoksisitas As melalui perangsangan dan meningkatkan serapan fosfat (P) bagi tanaman. Schmalenberger *et al.* (2013) juga melaporkan, bahwa mikroorganisme seperti bakteri, jamur

dan mikroalga berperan penting dalam melarutkan mineral seperti P- dan K-, serta melepaskan nutrisi lalu memasoknya menuju tanaman dengan proses bioremediasi *in situ*.

Logam berat merkuri (Hg) merupakan polutan yang tersebar luas di lingkungan dalam bentuk Hg^0 , Hg^+ , Hg^{2+} dan methyl-Hg (Moreno-Jiménez *et al.*, 2006). Merkuri memiliki dampak negatif yang besar bagi tubuh yang mengonsumsinya. Tingkat seluler dan molekuler Hg mampu menginduksi perubahan permeabilitas membran sel, kemudian bereaksi dengan kelompok enzim, dan memiliki *affinity* untuk bereaksi dengan gugus fosfat dan gugus aktif ADP atau ATP, serta mampu mengganti kation esensial dan mengikat DNA, RNA dan ribosom (J. Chen & Yang, 2012). Sebagian besar merkuri (Hg) terakumulasi pada akar tanaman dan sedikit ditranslokasikan menuju tunas (Yaodong Wang & Greger, 2004).

BAB 3

TEKNOLOGI FITOREMEDIASI

A. Pengertian Teknologi Fitoremediasi

Fitoremediasi didefinisikan sebagai teknik rehabilitasi melalui penggunaan tanaman untuk mengekstrak dan merombak bahan pencemar yang tersedia di dalam dan atau di permukaan tanah. Konsepsi fitoremediasi merupakan pencucian polutan yang meliputi penghancuran, inaktivasi, atau imobilisasi polutan menuju bentuk yang tidak berbahaya. Proses ini dimediasi oleh tanaman, termasuk pohon, rumput-rumputan, dan tanaman air. Fitoremediasi merupakan metode yang sangat sederhana, relatif murah, efektif dan tidak menimbulkan dampak negatif bagi lingkungan. Berbagai jenis tanaman telah diketahui memiliki potensi sebagai fitoremediator sebab kemampuannya dalam menyerap kontaminan (Ahmadpour *et al.*, 2012)

Salah satu aktivitas manusia yang berpotensi mencemari lingkungan merupakan pertambangan emas. Pertambangan emas berakibat pada terakumulasinya logam berat di dalam tanah. Logam berat memiliki sifat tidak terurai dan mampu terakumulasi pada tanah sehingga berdampak pada pencemaran lingkungan. Kontaminasi logam berat menimbulkan risiko bagi lingkungan dan kesehatan manusia. Beberapa logam berat bersifat karsinogenik, mutagenik, teratogenik (Ali *et al.*, 2013). Di dalam tanah, logam berat menyebabkan efek toksikologi bagi mikroba tanah sehingga berakibat pada konjugasi mikroba tanah yang menurun (Khan *et al.*, 2010). Logam berat juga berpotensi menyebabkan stres oksidatif yang berakibat pada terbentuknya senyawa radikal bebas (Mudipalli, 2008).

Dalam perspektif biologi, logam berat diklasifikasikan menjadi dua yakni logam berat esensial dan logam berat non esensial. Logam berat esensial merupakan logam berat yang diperlukan oleh organisme dalam jumlah kecil untuk fungsi fisiologi dan biokimia yang vital. Contoh logam berat esensial merupakan Fe, Mn, Cu, Zn, dan Ni (Cempel & Nickel, 2006). Logam berat non esensial merupakan logam berat yang tidak diperlukan oleh organisme untuk fungsi fisiologis dan biokimia (Tchounwou *et al.*, 2012). Contoh logam berat non esensial merupakan Cd, Pb, Hg, As, dan Cr (Dabonne *et al.*, 2010). Jumlah akumulasi logam berat pada lingkungan melebihi ambang batas memiliki efek negative dan dapat mengganggu kesehatan makhluk hidup (Ali *et al.*, 2013).

Fitoremediasi dikenal sebagai metode perbaikan dengan melibatkan penggunaan tanaman dan mikroba tanah untuk mengurangi konsentrasi atau efek kontaminan di lingkungan. Konsep ini merupakan bentuk aplikasi teknologi yang relatif baru serta ekonomis, efisien, dan ramah lingkungan (Ali *et al.*, 2013). Pada dasarnya, fitoremediasi mengacu pada penggunaan tanaman dan mikroba tanah untuk mengurangi konsentrasi logam berat di lingkungan. Tanaman umumnya beraksi dalam hal penanganan kontaminan tanpa mempengaruhi tanah lapisan atas, sehingga tetap dapat menjaga utilitas dan kesuburannya. Tanaman hijau memiliki kemampuan yang baik dalam menyerap polutan lingkungan dan melakukan detoksifikasi melalui banyak mekanisme. Teknologi fitoremediasi dikenal sebagai salah satu metode pembersihan tanah dari polutan yang paling murah dibandingkan teknologi remediasi yang lainnya. Pembentukan vegetasi pada tanah tercemar juga mampu membantu pencegahan erosi dan pencucian logam. Fitoremediasi lahan tercemar memiliki beberapa tujuan, antara lain:

- a. mengurangi kontaminan dari logam berbahaya di lingkungan;
- b. meningkatkan kesuburan tanah; dan
- c. meningkatkan produktivitas tanaman.

Tanaman yang sering digunakan sebagai agen fitoremediasi mampu tumbuh dengan cepat dan menghasilkan biomassa tinggi. Sekadar

informasi, bahwa salah satu tanaman yang berhasil menjadi agen fitoremediasi merupakan tanaman jarak (Abhilash *et al.*, 2012)

B. Teknik Fitoremediasi

Teknik fitoremediasi yang umum diterapkan antara lain fitoekstraksi atau fitoakumulasi, fitofiltrasi, fitostabilisasi, dan fitodegradasi (Alkorta *et al.*, 2004)

1. Fitoekstraksi

Fitoekstraksi atau fitoakumulasi atau fitoabsorpsi merupakan teknologi fitoremediasi dengan cara menyerap kontaminan tanah atau air menggunakan akar tanaman dan memindahkannya menuju area tunas tanaman (Rafati *et al.*, 2011). Translokasi logam menuju tunas merupakan proses biokimia yang penting dan diinginkan dalam efektivitas metode fitoekstraksi sebab pemanenan biomassa akar umumnya tidak memungkinkan (Tangahu *et al.*, 2011).

Fitoekstraksi dikenal sebagai teknologi fitoremediasi yang paling utama untuk menghilangkan logam berat dan metaloid dari tanah, sedimen atau air yang tercemar (Milić *et al.*, 2012). Efektivitas fitoekstraksi ditentukan banyak faktor seperti bioavailabilitas logam berat dalam tanah, sifat tanah, spesiasi logam berat dan spesies tanaman. Beberapa karakteristik tanaman yang berpotensi dapat dijadikan sebagai fitoekstraksi;

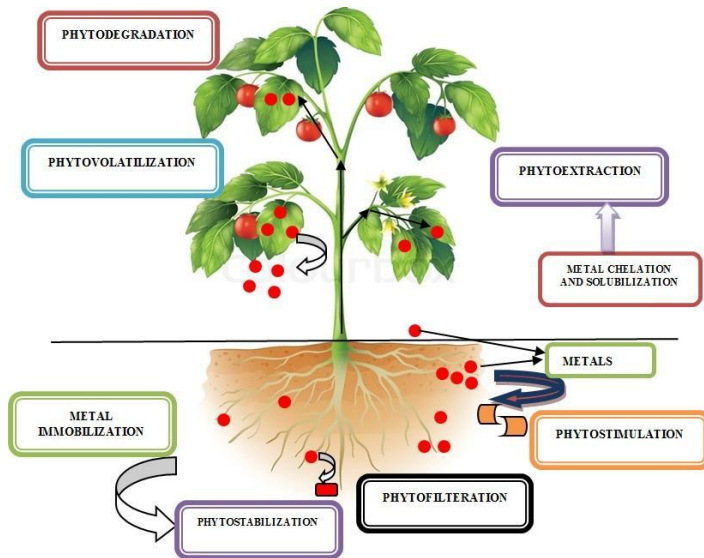
- a) tingkat pertumbuhan tinggi;
- b) produksi lebih banyak biomassa (tajuk);
- c) sistem perakaran tersebar luas;
- d) lebih banyak akumulasi logam berat dari tanah;
- e) toleransi terhadap efek toksik dari logam berat;
- f) mampu beradaptasi yang baik pada lingkungan;
- g) tahan terhadap patogen dan hama; dan
- h) mudah dibudidayakan dan pemanenan.

Kemampuan ekstraksi suatu spesies tanaman ditentukan oleh dua faktor utama yakni konsentrasi logam dan biomassa pada pucuk (Y. M. Li *et al.*, 2003). Penggunaan hiperakumulator dengan konsep menghasilkan

produksi biomassa tanaman relatif sedikit dan akumulasi logam tinggi merupakan bagian dari pendekatan teknologi fitoremediasi yang ekonomis dan mudah ditangani, terutama dalam hal pemulihan logam dan pembuangannya secara aman.

Tanaman yang menghasilkan biomassa tinggi dalam satu periode panen memiliki potensi besar untuk ekstraksi tanaman logam berat (Ali *et al.*, 2012). Rumput merupakan salah satu tanaman yang memiliki potensi sebagai ekstraktor tanaman karena memiliki produksi yang lebih tinggi dan kemampuan beradaptasi yang baik terhadap lingkungan tercemar, serta menghasilkan biomassa yang lebih tinggi dari pada semak dan pohon (Malik.*et al.*, 2010).

Menggunakan tumbuhan sebagai ekstrak tumbuhan pada lahan yang terkontaminasi dapat mengakibatkan akumulasi polutan dalam jumlah yang besar dan berbahaya untuk dikonsumsi. Berdasarkan hasil riset Vamerali *et al.* (2010), tanaman fitoekstraksi tidak direkomendasikan untuk digunakan sebagai pakan ternak atau konsumsi manusia.



Gambar 5. Teknik fitoremediasi logam pada tanaman (P. Devi & Kumar, 2020)

Komposisi kimia dan sifat adsorpsi tanah mempengaruhi mobilitas dan bioavailabilitas logam. Efisiensi ekstraksi tanaman dipengaruhi oleh bioavailabilitas atau ketersediaan hayati logam berat di dalam tanah. Bioavailabilitas atau ketersediaan hayati yang rendah dalam tanah merupakan faktor yang membatasi keberhasilan menurunkan pencemaran logam berat, khususnya ekstraksi logam timbal. Secara umum, sangat sedikit logam tanah yang tersedia secara biologis untuk diserap tanaman. Pengikatan logam berat yang kuat atau pengendapan partikel tanah menunjukkan bahwa sebagian besar logam berat tanah tidak larut dan karenanya menjadi tidak tersedia untuk diserap oleh tanaman (V. Sheoran *et al.*, 2011). Bioavailabilitas logam berat atau metaloid dalam tanah dapat dibagi menjadi tiga bagian, yakni bioavailabilitas cepat seperti Cd, Zn, Cu, Se, As, dan Ni, bioavailabilitas sedang seperti Co, Fe, dan Mn, serta bioavailabilitas rendah seperti Pb, Cr, dan U (Prasad, 2003).

Tanaman mampu mengembangkan mekanisme tertentu untuk melarutkan logam berat dalam tanah. Sekresi akar tanaman menghasilkan zat-zat penggerak logam di rizosfer yang disebut dengan *phytosiderophores* (Lone *et al.*, 2008). Sekresi ion H^+ yang dilakukan oleh akar tanaman dapat mengasamkan rizosfer dan meningkatkan pelarutan logam. Ion H^+ juga dapat mengganti kation logam berat yang diserap oleh partikel tanah (Alford *et al.*, 2010). Eksudat akar juga mampu menurunkan pH tanah rizosfer sekitar satu atau dua unit di atas pH tanah curah. Nilai pH tanah yang rendah mampu meningkatkan konsentrasi logam berat di dalam tanah. Mikroorganisme rhizosfer seperti bakteri dan fungi mikoriza mampu meningkatkan bioavailabilitas logam berat dalam tanah (Vamerali *et al.*, 2010; Sheoran *et al.*, 2011).

Teknologi fitoekstraksi dapat dilakukan melalui dua acara, yakni alami dan induksi. Fitoekstraksi alami diterapkan untuk menghilangkan logam berat tanpa adanya perubahan tanah yang dibuat. Sementara itu, fitoekstraksi induksi dilakukan dengan bantuan *chelate* seperti penggunaan EDTA, asam sitrat, unsur belerang, dan amonium sulfat yang ditambahkan menuju dalam tanah untuk meningkatkan bioavailabilitas

logam berat (Sun *et al.*, 2011). Tanaman yang digunakan sebagai fitofiltrasi setidaknya harus memiliki karakteristik sebagai berikut:

- a) menghasilkan biomassa akar atau volume akar yang besar;
- b) tanaman yang mampu mengakumulasi dan mentolerir logam berat;
- c) mudah penanganannya;
- d) biaya perawatan yang murah;
- e) mampu beradaptasi pada lingkungan yang tercemar; dan
- f) memiliki limbah sekunder yang minimum.

Tanaman yang darat, air, dan lahan basah merupakan tanaman prioritas untuk agen fitofiltrasi dalam menghilangkan logam berat seperti Pb, Cu, Ni, Cd, Cr, V, U, Cs, dan Sr.

2. Fitofiltrasi

Fitofiltrasi merupakan teknologi fitoremediasi dengan cara menghilangkan polutan dari air permukaan yang terkontaminasi oleh tanaman (Mykolenko *et al.*, 2013). Fitofiltrasi dapat disebut juga sebagai rhizofiltrasi yakni penggunaan akar tanaman, blasto filtrasi yakni penggunaan bibit, atau caulo filtrasi yakni penggunaan pucuk tanaman yang dipotong (Mesjasz-Przybyłowics *et al.*, 2004). Proses fitofiltrasi berperan sebagai penyerap logam berat di dalam tanah atau air untuk kemudian menyimpannya di dalam tanaman sehingga kontaminan logam berat tanah menjadi berkurang.

3. Fitostabilisasi

Fitostabilisasi atau fitoimobilisasi merupakan teknik bioremediasi dengan memanfaatkan tanaman tertentu untuk stabilisasi kontaminan di dalam tanah (Hauptvogel *et al.*, 2020). Teknik fitostabilisasi mampu mengurangi mobilitas dan bioavailabilitas polutan untuk mencegah migrasi zat-zat berbahaya masuk menuju air, tanah, dan rantai makanan (Mullai *et al.*, 2014).

Tanaman mampu mendegradasi logam berat dalam tanah melalui mekanisme penyerapan oleh akar, pengendapan, kompleksasi atau reduksi valensi logam di rhizosfer (Wuana & Okieimen, 2011). Logam

valensi yang berbeda juga menentukan adanya peluang toksisitas yang bervariasi. Pengeluaran enzim redoks khusus oleh tanaman mampu mengubah logam berbahaya menjadi keadaan yang relatif tidak beracun. Misalnya pada reduksi Cr_4 menjadi Cr_3 menjadikan Kromium yang dinilai tidak terlalu beracun atau berbahaya (Q. Wu *et al.*, 2011).

Fitostabilisasi membatasi akumulasi logam berat dalam biota dan mengurangi pelindiannya menuju perairan bawah tanah. Akan tetapi, fitostabilisasi bukanlah solusi permanen sebab logam berat akan tetap berada di dalam tanah, hanya saja memiliki gerakan yang terbatas. Teknologi fitostabilisasi menjadi strategi manajemen untuk stabilisasi (menonaktifkan) kontaminan yang berpotensi beracun (Vangronsveld *et al.*, 2009).

4. Fitovolatilisasi

Fitovolatilisasi merupakan teknologi fitoremediasi yang bertindak sebagai penyerap polutan dari tanah oleh tanaman lalu mengubahnya menjadi bentuk yang mudah menguap dan dilepaskan menuju atmosfer. Teknologi fitovolatilisasi diperuntukkan bagi polutan logam berat berupa raksa (Hg) dan Se. Akan tetapi, teknologi fitoremediasi dengan konsep fotovolatilisasi masih kontroversi di kalangan ilmuan (Padmavathiamma & Li, 2007).

Senyawa organik volatil (VOC) dapat diuapkan dengan metode langsung dan tidak langsung. Fitovolatilisasi langsung merupakan penyerapan zat kontaminan organik oleh tanaman kemudian mentranslokasikan dan melepaskannya dari permukaan batang dan daun (Limmer & Burken, 2016). Fitovolatilisasi tidak langsung terjadi karena peningkatan kontaminan yang mudah menguap dari tanah dan air akibat aktivitas akar tanaman (Limmer & Burken, 2016). Meskipun Arsen (As) merkuri (Hg) dan selenium (Se) hadir dalam bentuk gas di lingkungan, tetapi dapat diserap kembali menuju tanah akibat peristiwa cuaca. Beberapa tanaman seperti *Arabidopsis thaliana*, *Brassica juncea*, dan *Chara canescens* mampu menyerap logam berat dan mengubahnya menjadi gas dan melepaskannya menuju atmosfer (Khalid *et al.*, 2017).

Fitovolatisasi juga mampu mengurangi atau menghilangkan unsur Hg, dimana ion merkuri diubah menjadi unsur gas yang kurang beracun (Ghosh & Singh, 2005). Aplikasi teknologi fitovolatisasi pada tanaman *Brassica juncea* juga mampu mengurangi hingga 40 g Se/Ha pada tanah (Mahar *et al.*, 2016). Mekanisme keberhasilan fitovolatisasi dalam sistem akar harus memenuhi beberapa hal sebagai berikut (Limmer & Burken, 2016).

- 1) Jumlah air lebih rendah
- 2) Adveksi dengan gas flux karena fluktuasi
- 3) Peningkatan permeabilitas tanah
- 4) Redistribusi kimia hidrolik
- 5) Adveksi VOC dengan air permukaan tanah
- 6) Intersepsi curah hujan harus disaring tanah sehingga pengenceran dan adveksi VOC menjauh dari permukaan.

5. Fitodegradasi

Fitodegradasi merupakan teknologi fitoremediasi dengan cara degradasi polutan organik oleh tanaman yang dibantu oleh enzim dehalogenase dan oksigenase, serta tidak bergantung dengan mikroorganisme rhizosfer (Vishnoi & Srivastava, 2008). Tanaman dapat mengakumulasi xenobiotik organik dari lingkungan tercemar dan mendetoksifikasinya melalui aktivitas metabolisme. Fitodegradasi merupakan teknologi fitoremediasi yang hanya digunakan untuk polutan organik dan tidak bisa dijadikan sebagai agen fitoremediasi pada logam berat dikarenakan sifatnya non-biodegradasi. Jabeen *et al.* (2009) melaporkan bahwa enzim yang cocok untuk dijadikan sebagai fitodegradasi antara lain:

- a. dehalogenase untuk transformasi senyawa terklorinasi;
- b. peroksidase untuk konversi senyawa fenolik;
- c. nitrilase untuk transformasi senyawa aromatik sianat;
- d. nitroreduktase untuk konversi bahan peledak dan senyawa nitrasi lainnya; dan
- e. fosfatase untuk transformasi pestisida organofosfat.

6. Rhizodegradasi

Rhizodegradasi merupakan teknologi fitoremediasi dengan konsep penguraian polutan organik di dalam tanah oleh mikroorganisme di rhizosfer (Mykolenko *et al.*, 2013). Rhizosfer memanjang 1 mm di sekitar akar dan berada di bawah pengaruh tanaman. Peningkatan jumlah dan aktivitas mikroorganisme memicu peningkatan degradasi polutan di rhizosfer. Tanaman mampu merangsang aktivitas mikroba sekitar 10-100 kali lebih tinggi di rhizosfer melalui sekresi eksudat yang mengandung karbohidrat, asam amino, dan flavonoid. Pelepasan eksudat mengandung nutrisi akar tanaman sehingga mampu menyediakan sumber karbon dan nitrogen bagi mikroba tanah dan menciptakan lingkungan yang kaya akan nutrisi. Tanaman mampu mensekresi enzim tertentu untuk mendegradasi kontaminan organik di dalam tanah (Yadav *et al.*, 2010).

Rhizodegradasi atau dikenal dengan bioremediasi rhizosfer merupakan peningkatan biodegradasi polutan oleh bakteri dan jamur yang berasosiasi dengan akar. Tanaman menyediakan sumber karbon untuk merangsang jalur metabolisme guna meningkatkan degradasi logam berat di dalam tanah. Fungi mikoriza yang hidup bebas dan bersimbiosis dengan akar tanaman berperan besar dalam penyediaan hara tanaman melalui hifa akarnya (Sarwar *et al.*, 2017)

Simbiosis antara mikoriza dan akar tanaman mengubah komposisi kimia eksudat akar dan pH tanah sehingga berpeluang terjadinya peningkatan bioavailabilitas logam berat di dalam tanah. S. Kim *et al.* (2010) menegaskan, bahwa *Echinochloa crusgalli* mampu memancarkan asam sitrat dan asam oksalat (agen chelating alami) dan meningkatkan kemampuan translokasi dan bioakumulasi Cd, Cu, dan Pb. Fungi mikoriza juga dapat meningkatkan berat kering total, luas daun dan pertumbuhan tanaman yang diinokulasi dengan jamur mikoriza arbuskula pada tanah yang tercemar logam berat Cu (Mallick *et al.*, 2018). Keberhasilan bioremediasi rhizosfer logam ditentukan berbagai faktor antara (Kumar Yadav *et al.*, 2018), antara lain:

- a. asosiasi antara spesies tanaman sesuai dengan mikroba rizosfer;
- b. komposisi dan konsentrasi logam berat;

- c. sifat-sifat tanah;
- d. kondisi hara tanah seperti ketersediaan nutrisi esensial, kadar air, bahan organik, pH, tekstur, dan suhu;
- e. laju metabolisme mikroba ;
- f. jumlah koloni mikroba; dan
- g. ketersediaan variabel lingkungan yang optimal.

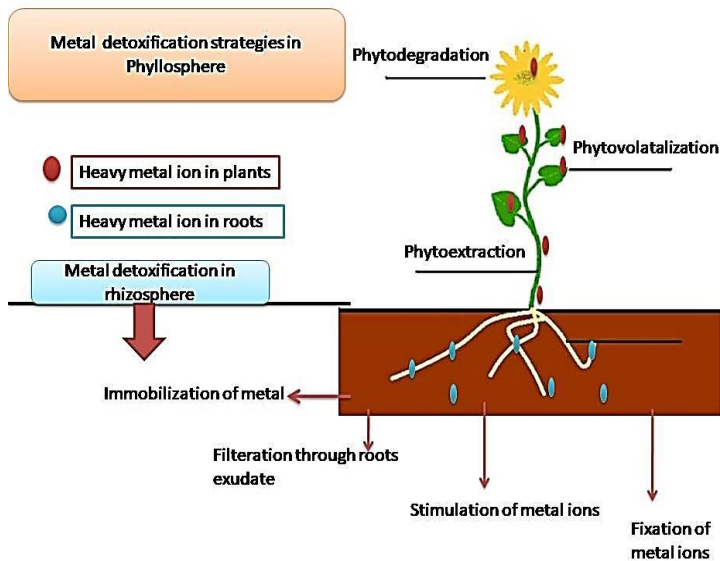
7. Fitodesalinasi

Fitodesalinasi merupakan teknologi fitoremediasi yang melibatkan peran tanaman halofit untuk menghilangkan garam dari tanah dengan tujuan meningkatkan pertumbuhan tanaman (SAKAI *et al.*, 2012). Tanaman halophytic memiliki kemampuan beradaptasi yang lebih baik dalam mengatasi logam berat dibandingkan dengan tanaman glikohitik (Manousaki & Kalogerakis, 2011). Tanaman *Suaenda maritime* dan *Sesuvium portulacastrum* merupakan jenis tanaman yang mampu menghilangkan 504 Kg Natrium Klorida pada tanah. Terbukti, bahwa *Suaenda maritime* dan *Sesuvium portulacastrum* mampu mengakumulasi NaCl dari tanah yang sangat salin dalam jangka waktu 4 bulan (Ali *et al.*, 2013), serta meningkatkan produktivitas tanaman (Ravindran *et al.*, 2007).

BAB 4

MEKANISME PENYERAPAN, TRANSLOKASI, DAN TOLERANSI

Mekanisme penyerapan logam berat dimulai dari akar tanaman yang disimpan di dalamnya atau ditranslokasikan menuju bagian tajuk tanaman melalui pembuluh xilem dan sebagian besar disimpan dalam vakuola. Sekuestrasi logam berat yang berada di dalam vakuola berfungsi untuk menghilangkan kelebihan ion logam dari sitosol dan dapat mengurangi interaksinya dengan proses metabolisme seluler (V. Sheoran *et al.*, 2011).



Gambar 6. Ilustrasi teknik fitoremediasi (P. Devi & Kumar, 2020)

Mekanisme fitoekstraksi logam berat memiliki lima aspek dasar, yakni mobilisasi logam berat dalam tanah, penyerapan ion logam oleh akar tanaman, translokasi akumulasi logam dari akar menuju jaringan tunas, sekuestrasi ion logam dalam jaringan tanaman dan toleransi logam. Penyerapan ion logam berat dalam tanah dimediasi oleh pengangkut khusus berupa protein pembawa yang digabungkan dengan H^+ yang tersedia di membran plasma akar. Misalnya transporter dari keluarga ZIP (Zn-Iron permease) berkontribusi pada penyerapan Zn^+ dan Fe^+ (Clemens, 2001). Logam berat non esensial secara efektif mampu bersaing dengan logam esensial dalam mekanisme penyerapan melalui transpor transmembran yang sama-sama digunakan logam berat esensial (Alford *et al.*, 2010). Ketidakefisienan seleksi dalam transpor ion transmembran yang menjadikan dasar alasan masuknya logam berat non esensial menuju dalam tanaman.

Proses penyerapan atau akumulasi logam oleh tanaman melibatkan beberapa langkah dimana logam bermigrasi dari tanah menuju dalam tanaman yang pada akhirnya disimpan di dalam vakuola sel. Akar tanaman dan simbiosis dengan mikroba mampu mengubah karakteristik fisikokimia rizosfer melalui aktivitas metabolisme, seperti ekskresi metabolit (Whitelaw, 1999). Logam berat banyak ditemukan di dalam tanah dengan sifatnya yang tidak larut, sehingga tanaman mampu meningkatkan deportasi logam dari matriks tanah melalui pengasaman rizosfer yang dihasilkan dari aksi pompa proton membrane plasma dan sekresi ligan dengan tujuan untuk mendesak logam keluar dari ikatan (Manab & Maiti, 2007).

Mekanisme penyerapan logam oleh tanaman digambarkan melalui logam terlarut yang masuk akar tanaman untuk kemudian ditranslokasikan menuju sel daun. Proses internal ini melibatkan xilem tanaman dalam aksi pompa membran atau saluran. Pada saat logam telah berada di xilem, aliran getah xilem mengangkutnya menuju sel-sel daun (Peer *et al.*, 2006).

Detoksifikasi atau khelasi di dalam sel tanaman digunakan untuk logam dengan berbagai keadaan oksigen yang dapat diubah menjadi

bentuk yang kurang beracun melalui konversi kimia atau kompleksasi (Peer *et al.*, 2006). Banyak chelator menggunakan gugus tiol sebagai ligan untuk pembentukan jalur biosintetik sulfur (S) yang telah terbukti memiliki peran sebagai fungsi hiperakumulasi.

Langkah-langkah terakhir dalam akumulasi sebagian besar logam merupakan penyerapan logam dari proses seluler. Sekuestrasi umumnya terjadi di vakuola tanaman, dimana logam atau logam harus diangkut melintasi membran vakuola. Misalnya pada kompartementalisasi logam yang memungkinkan *Pteris vittata* mentolerir paparan As dan mempertahankan pertumbuhan secara normal setelah menyerap As dalam jumlah yang relatif besar (B. Chen *et al.*, 2005). Vakuola mampu menyangga efek konsentrasi As yang tinggi pada metabolisme sel untuk memastikan pertumbuhan dan perkembangan tanaman berjalan normal.

BAB 5

FAKTOR DETERMINASI FITOREMEDIASI LOGAM BERAT

Akumulasi dan sirkulasi logam berat pada tanaman ditentukan oleh jenis tanaman, zona perakaran, kondisi lingkungan, struktur akar, dan jenis unsur serta sifat fisik, kimia dan biologi tanah.

A. Jenis Tanaman

Penyerapan logam berat ditentukan oleh jenis dan spesies tanaman. Jumlah akumulasi logam berat dalam tanaman akan berbeda jika jenis varietas tanaman berbeda. Keberhasilan teknologi fitoremediasi bergantung pada identifikasi spesies tanaman yang cocok untuk logam berat atau kombinasi logam tertentu, serta spesifikasi kontaminan hiperakumulator (Lorestani *et al.*, 2012).

Tabel 1. Kemampuan akumulasi logam berat dari berbagai jenis tanaman

Spesies tanaman	Jenis logam berat	Referensi
<i>Eichhornia crassipes</i>	Cr dan Cu	(M. Sarkar <i>et al.</i> , 2017)
<i>Azola filikuloides</i>	Pb(II) dan Hg(II)	(Arshadi <i>et al.</i> , 2017)
<i>Lemna kecil</i>	Cd, Cr, Ni dan Pb	(Al-Khafaji <i>et al.</i> , 2018)
<i>Phragmites australis</i>	Zn dan Pb	(Bernardini <i>et al.</i> , 2016)
<i>Typha angustifolia</i>	Zn, Cd dan Pb	(Sricoth <i>et al.</i> , 2018)
<i>Ceratophyllum demersum L</i>	Cd dan Pb	(Dogan <i>et al.</i> , 2018)
<i>Elodea canadensis</i>	Cu, Zn, Cd	(Török <i>et al.</i> , 2015)

Sumber diolah dari (Kumar Yadav *et al.*, 2018)

B. Karakteristik Media Tanam

Nilai Ph tanah, tekstur, kapasitas tukar *action*, suhu, eksudat dan kandungan nutrisi atau hara juga menentukan sifat dan bioavailabilitas logam berat untuk tanaman (Rosenfeld *et al.*, 2018). Kelarutan dan ketersediaan logam bergantung pada karakteristik tanah, terutama Ph tanah. Tanah yang memiliki Ph yang lebih rendah akan meningkatkan konsentrasi logam berat. Jumlah ion H^+ meningkat pada kondisi Ph tanah rendah sehingga meningkatkan kapasitas tukar kation antar logam berat.

Logam berat yang masuk dari permukaan koloid dan partikel mineral lempung menuju dalam tanah akan meningkat pada interval Ph rendah melalui proses desorpsi (Vimla Sheoran *et al.*, 2016). Kondisi ini dinilai mampu meningkatkan ketersediaan kontaminan logam berat untuk kebutuhan serapan tanaman dengan menghasilkan konsentrasi unsur-unsur beracun. *Thlaspi caerulescens* dikenal sebagai tanaman hiperakumulator dari logam berat unsur Cd dan Zn dengan penyerapan optimal melalui penurunan Ph tanah (A. S. Wang *et al.*, 2006).

Kondisi tanah dengan Ph yang normal menjadikan kategori mobilitas logam berat dibagi dua jenis, yakni Cd, Zn, dan Ni yang menunjukkan mobilitas tinggi, serta Pb, Cr, dan Cu yang menunjukkan mobilitas rendah (R. Y. Kim *et al.*, 2015). Kation logam berat seperti Hg, Cr, Cd, Cu, Fe, Mn dan Zn lebih mudah larut dalam tanah pada kondisi Ph rendah (Ma *et al.*, 2016). Mobilisasi logam berat dalam tanah akan meningkat seiring bertambahnya bahan organik. Kondisi nilai yang mampu mendorong pembentukan senyawa kelat, serta meningkatkan ketersediaan nutrisi bersama dengan peningkatan kapasitas tukar kation untuk meningkatkan ketersediaan logam pada tanaman (Vimla Sheoran *et al.*, 2016). Penambahan kotoran ternak dinilai mampu meningkatkan akumulasi Zn dan Pb dalam tanah disebabkan kotoran ternak memiliki zat heterogen yang secara bersamaan dapat mengerahkan dan stabilisasi (Chu *et al.*, 2017). Kadar KTK tanah akan meningkat seiring dengan meningkatnya kandungan liat tanah, sementara ketersediaan ion logam semakin berkurang. Dengan demikian, semakin besar KTK tanah maka penyerapan dan imobilisasi logam beracun, semakin rendah KTK tanah

semakin tinggi ketersediaan logam pencemar di dalam tanah (Zhou *et al.*, 2014). Selain itu, faktor penyerapan akar juga dipengaruhi oleh aktivitas rhizobiologis, eksudat akar, suhu, kelembapan, Ph, konsentrasi ion pesaing, dan konsentrasi logam dalam larutan tanah (Vimla Sheoran *et al.*, 2016).

C. Zona Akar

Akar merupakan jalur utama penyerapan logam berat dari tanah menuju tanaman. Zona akar dikenal sebagai tempat penyimpanan logam berat atau agen untuk metabolisme kontaminan di dalam jaringan tanaman (Tangahu *et al.*, 2011). Mekanisme lainnya dari fitoremediasi adalah degradasi kontaminan menjadi bentuk yang lebih sederhana oleh enzim tanaman yang dikeluarkan dari akar. Protein ini membantu penyerapan logam berat dengan cara konversi dan spesiasi kimianya di dalam tanah. Perubahan spesiasi logam berat dapat terjadi secara asam kation atau alkalinisasi, modifikasi potensial redoks, dan eksudasi kheat logam dan ligan organik di akar tanaman (Ma *et al.*, 2016).

Kondisi lingkungan sekitar seperti suhu, kekeringan, curah hujan dan kelembaban tanah juga menentukan pertumbuhan panjang akar. Tanah dengan kondisi cekaman kekeringan maka akar akan memperbesar diameter akar. Perpanjangan akar akan berkurang sebagai respons terhadap penurunan permeabilitas tanah kering (Brunner *et al.*, 2015).

D. Akselerator Fitoremediasi

Akselerator fitoremediasi menjadi salah satu faktor yang mampu meningkatkan laju logam berat. Fungsi ini dijalankan melalui peningkatan fenomena terkait seperti bakteri pelarut fosfat, fungi mikoriza arbuskula, konsentrasi hormon pertumbuhan dan osmolit. Asam giberelat di sini mampu meningkatkan tinggi tanaman melalui pemanjangan intermodal. Fitohormon, auksin dan sitokinin merupakan hormon pemicu pertumbuhan tanaman. Keseimbangan antara pertumbuhan tanaman dan serapan logam berat merupakan kunci keberhasilan penerapan teknologi fitoremediasi (Mwegoha, 2008).

E. Faktor Lingkungan

Iklim juga menjadi faktor yang sangat signifikan dalam mempengaruhi penerapan teknologi fitoremediasi. Suhu berperan dalam hal kontrol transpirasi, kimia air, pertumbuhan dan metabolisme tanaman. Suhu sangat menentukan aktivitas fisiologis tanaman yang berujung pada pengaruh proses penyerapan logam berat (Bhargava *et al.*, 2012). Yu *et al.* (2010) melaporkan bahwa kenaikan suhu secara linear meningkatkan laju penyisihan logam oleh tanaman.

BAB 6

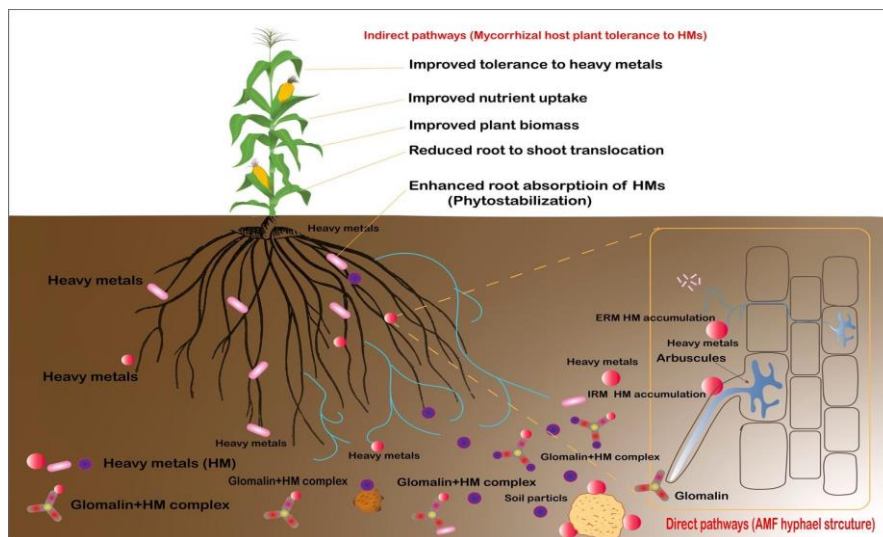
AGEN FITOREMEDIASI PADA LAHAN BEKAS TAMBANG

A. Agen Fitoremediasi Lahan Bekas Tambang

Kegiatan pertambangan yang dilakukan manusia berpotensi menghasilkan limbah pencemaran lingkungan. Limbah ini disebut *tailing* yang mengandung tinggi kadar logam berat. Penanaman tanaman hijau di lahan bekas tambang emas merupakan salah satu alternatif untuk memulihkan tanah dari pencemaran logam berat. Upaya ini dilakukan untuk membatasi kondisi fisikokimia yang tidak menguntungkan di lokasi tambang. Penanaman kembali juga berpotensi mempercepat perbaikan kondisi tanah sehingga kembali menciptakan ekosistem yang stabil. Kondisi mikroba tanah dinilai akan kembali stabil untuk meningkatkan kesuburan tanah bekas tambang. Courtney *et al.* (2009) telah menemukan program revegetasi di lokasi pembuangan residu bauksit. Revegetasi tersebut berhasil mengidentifikasi 47 spesies tanaman. Miransari (2011) juga melaporkan terkait 440 hiperakumulator logam yang dikenal di dunia dimana jumlahnya terus meningkat. Dalam ekosistem alami, tanaman pengakumulasi logam berat memiliki peran yang berbeda dalam fitoremediasi. Beberapa tanaman mampu melakukan proses fitostabilisasi logam beracun di rizosfer melalui imobilisasi eksudat akar (Guerin *et al.*, 2002).

Keberhasilan tanaman tumbuh di area tercemar logam berat ditunjukkan oleh adanya potensi pengurangan logam berat dari tanah. Tantangan terbesar bagi ilmuwan yakni tentang bagaimana meningkatkan kinerja tanaman dalam menghilangkan racun dari tanah. Kajian empiris

dan riset ilmiah H. M. Leung *et al.* (2007) melaporkan, bahwa fungi mikoriza arbuskula mampu menjelajahi akar hiperakumulator secara luas pada tanah yang terkontaminasi logam berat. Hiperakumulator mikoriza menghasilkan biomassa tanaman tinggi dan tumbuh lebih cepat di lahan tercemar (H. M. Leung *et al.*, 2006). Strategi fitoremediasi yang berbeda dan layak perlu diaplikasikan pada tanah yang terkontaminasi logam berat. Fungi mikoriza arbuskula merupakan salah satu alternatif yang paling efektif dan efisien dalam penerapan fitoremediasi. Fungi mikoriza arbuskula mampu melakukan fitoekstraksi dan fitostabilisasi untuk bertahan hidup pada tanah yang terkontaminasi logam berat (H. M. Leung *et al.*, 2010). Fungi mikoriza arbuskula berperan penting dalam fitoremediasi tanah terkontaminasi dengan cara peningkatan kapasitas tanaman untuk menahan fitotoksisitas tanah melalui perbaikan nutrisi (H. M. Leung *et al.*, 2010).



Gambar 7. Peranan FMA secara langsung maupun tidak langsung pada proses fitoekstraksi, remediasi, dan fitostabilisasi logam berat (Riaz *et al.*, 2021)

Sebagian tanaman mampu mentransfer logam berat menuju jaringan di atas permukaan tanah melalui jalur pembuangan atau pengurangan logam berat pada tanah. Remediasi berbasis vegetasi memiliki potensi nyata untuk akumulasi dan imobilisasi kontaminan persisten yang ada di dalam tanah.

B. Mikoriza sebagai Agen Remediasi Tanah

Tanah yang tercemar dengan logam berat memiliki efek buruk terhadap kehidupan mikroorganisme dalam tanah. Fungi mikoriza arbuskula mampu berinteraksi efektif dengan akar tanaman di dalam tanah yang terkontaminasi (Leung *et al.*, 2010). Akar tanaman yang tumbuh pada tanah terkontaminasi mampu berinteraksi dengan baik bersama fungi mikoriza arbuskula. Fungi mikoriza arbuskula mampu meningkatkan pertumbuhan tanaman inang serta meningkatkan serapan nutrisi N dan P pada lokasi bekas pertambangan. Fungi mikoriza arbuskula umumnya ditemukan di dalam tanah yang mampu berinteraksi dengan akar lebih dari 80% tanaman terestrial.

Fitoremediasi menjadi teknologi berkelanjutan dan terjangkau untuk menghilangkan polutan pada lingkungan melalui pemanfaatan tanaman. Kelemahan teknologi ini yakni prosesnya yang lambat sehingga memerlukan waktu yang relatif lama. Dengan demikian penting untuk meningkatkan stabilitas dan efisiensi atau penghilangan logam beracun dari tanah oleh tanaman. Secara umum tanaman yang tumbuh pada tanah yang terkontaminasi logam berat memiliki nutrisi yang buruk, kapasitas menahan air yang rendah, serta kondisi pertumbuhan tanaman yang kurang optimal (Vosátka *et al.*, 2006).

Mikoriza mampu meningkatkan serapan unsur hara pada tanaman dan memfasilitasi penyerapan logam beracun oleh inangnya. Mikoriza berperan dalam meningkatkan toleransi beberapa tanaman yang terkontaminasi logam beracun dengan cara mengembangkan toleransi logam dari jamur itu sendiri, serta mengikat logam menuju dalam bentuk polifosfat dalam hifa mikoriza (Morgan *et al.*, 2005). Mikoriza bermanfaat bagi tanaman inang yang tumbuh pada lahan yang tercemar logam berat.

Hifa jamur melampaui area penipisan nutrisi di sekitar akar tanaman ternyata mampu meningkatkan luas permukaan yang tersedia untuk penyerapan nutrisi, menyebarkan menuju dalam pori-pori tanah yang terlalu kecil untuk dimasuki akar tanaman, serta mampu mengakses unsur N dan P yang tidak dapat diakses oleh tanaman non-mikoriza (Morgan *et al.*, 2005). Berdasarkan kajian empiris dan riset ilmiah tentang rumput vitiver oleh S. C. Wu *et al.* (2011), serapan N dan P secara signifikan memiliki nilai yang lebih tinggi setelah perlakuan mikoriza (N: 13,6 mg/Kg; P: 1,26 mg/Kg) dibandingkan dengan rumput yang tidak diberikan mikoriza (N: 11,7 mg/Kg; P: 0,91 mg/Kg).

Mikoriza arbuskula juga mampu menghasilkan glikoprotein yang tidak larut, serta glomalin yang berfungsi membentuk ikatan kompleks tidak larut pada elemen toksik. Hal inilah yang dapat meningkatkan remediasi tanah yang terkontaminasi (González-Chávez *et al.*, 2004). Simbiosis mikoriza juga berperan dalam perlindungan akar dari toksik logam berat. Kemampuan asosiasi mikoriza untuk memoderasi toksisitas logam telah ditunjukkan pada mikoriza erikoid (Tian *et al.*, 2011), ekto mikoriza (Colpaert *et al.*, 2011), dan mikoriza arbuskula (Ho Man Leung *et al.*, 2010). Mikoriza asli yang bertahan hidup pada lingkungan terkontaminasi dapat mengendapkan oksalat logam di ruang intraseluler jamur atau tanaman inang sehingga mampu menghambat atau membatasi transportasi ion logam berat (Leyval *et al.*, 1997).

Mikoriza arbuskula juga mampu melindungi tanaman dari penumpukan konsentrasi fitotoksik dari polutan tertentu dengan cara mengeluarkan senyawa detoksifikasi. Sebagai contoh, suatu asam organik yang mengikat polutan menuju dalam jaringan jamur mikoriza mampu menciptakan penghalang fisik terhadap translokasi logam beracun menuju tanaman itu sendiri (Vosátka *et al.*, 2006). Peranan ektomikoriza juga mampu mengurangi serapan logam berat pada tanaman pada pohon pin (Van Tichelen *et al.*, 2001).

Jamur mengakumulasi mikronutrien dan logam beracun di luar kebutuhan mereka. Potensi biosorben biomassa jamur dalam menghilangkan logam beracun telah diakui. Penyerapan ion logam yang

beracun dapat terjadi melalui dua proses. Pertama secara fisika dimana biosorpsi ion logam berat beracun pada permukaan sel dihasilkan dari pertukaran ion dan reaksi kompleksasi dengan gugus fungsi seperti karboksil, amina, dan sulfidryl (Viraraghavan & Srinivasan, 2011). Kedua proses biologis, yakni dengan cara ion logam diangkut ke dalam sitosol melintasi dinding sel dan membran sel. Menurut Janoušková *et al.* (2006), miselium ekstradikal dan jamur yang terkena logam berat Cd mengakumulasi 20 kali lebih banyak Cd pada akar tanaman tembakau. Mikoriza mampu menurunkan kadar racun Cd pada tanaman melalui peningkatan penyerapan Cd pada mikoriza. Artinya, mikoriza sangat tepat untuk dijadikan sebagai teknologi fitoremediasi pada lahan tercemar khususnya fitostabilisasi.

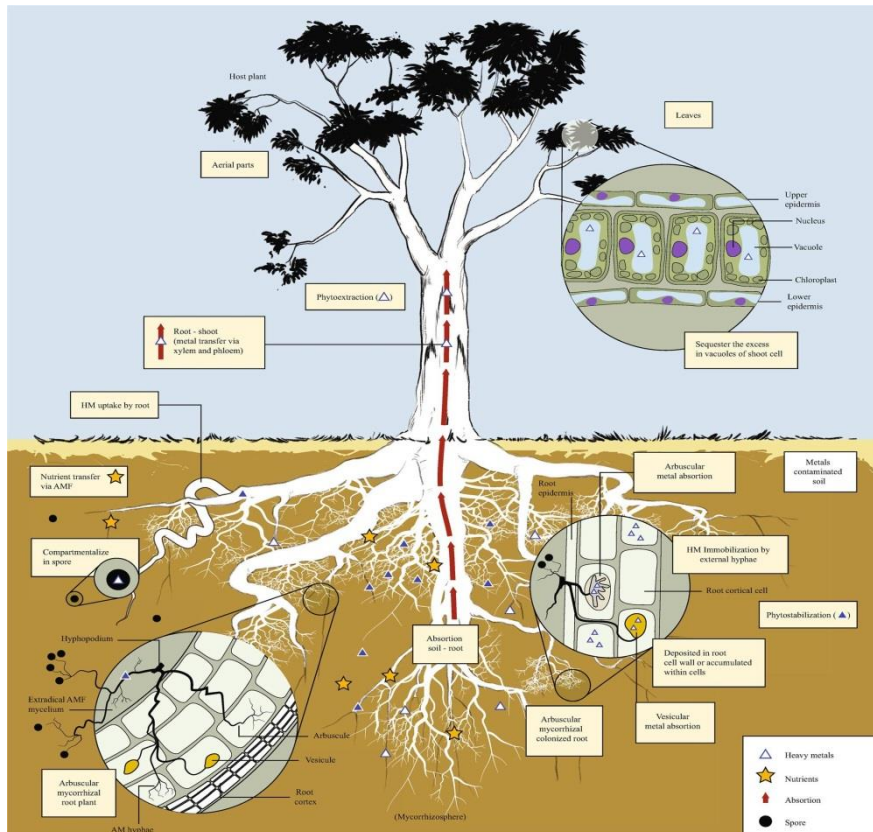
C. Peranan Mikoriza Arbuskula dalam Fitostabilisasi

Peranan mikoriza arbuskula dalam fitostabilisasi tampaknya mendukung aplikasi teknologi remediasi lingkungan tercemar dengan peningkatan pertumbuhan tanaman. Mekanisme fitostabilisasi melalui peningkatan akumulasi logam berat pada struktur mikoriza dan menghambat akumulasi yang berlebihan pada akar dan tunas tanaman. Rasio luas permukaan terhadap volume yang besar yang disajikan oleh jamur di dalam tanah. Pengikatan hifa penting dalam penyerapan logam beracun. Selain itu, jamur toleran terhadap logam beracun memiliki kapasitas yang lebih tinggi untuk mengikat logam beracun (Joner *et al.*, 2004), sehingga sangat cocok untuk stabilisasi logam berat pada tanah. Mikoriza arbuskula dapat meningkatkan ketahanan tanaman dan memfasilitasi fitostabilisasi pada lingkungan yang tercemar.

Fungi mikoriza arbuskula juga memiliki kemampuan proteksi tanaman *Holcus lanatus* dari keracunan As. Kajian empiris dan riset ilmiah Gonzalez-Chavez *et al.* (2002), menunjukkan bahwa tanaman *Holcus lanatus* berasosiasi dengan mikoriza arbuskula dapat meningkatkan resistensi arsenat pada tanaman inang. Mikoriza arbuskula menjalankan perannya dengan membantu inang untuk memfiksasi logam beracun di

dalam zona rizosfer, sehingga mencegah penyerapan logam beracun menuju dalam tanaman inang.

D. Peranan Mikoriza Arbuskula Dalam Fitoekstraksi



Gambar 8. Skema fitoremediasi berbasis fungi mikoriza arbuskula (Solís-Ramos et al., 2021)

Teknologi fitoekstraksi merupakan proses remediasi tanah yang relatif lambat, sehingga memerlukan waktu yang lama. Berdasarkan kajian ilmiah dan hasil riset Ranieri *et al.* (2020), teknologi fitoekstraksi memerlukan waktu bertahun-tahun untuk mengurangi tingkat

kontaminan pada tanah. Ketersediaan mikoriza arbuskula merupakan agen hayati yang menjadi faktor utama dalam percepatan fitoremediasi. Mikoriza arbuskula dapat mengubah komposisi dan sifat tanah selama proses metabolisme, seperti komposisi nutrisi dan bahan organik di dalam tanah serta bioavailabilitas logam beracun dalam tanah.

Efisiensi fitoekstraksi dapat ditingkatkan oleh mikoriza arbuskula yang berkontribusi pada peningkatan produksi biomassa tanaman. Mikoriza arbuskula mampu meningkatkan akumulasi As serta biomassa *P. vittata* (H. M. Leung *et al.*, 2006). Tanaman yang tumbuh di lokasi tambang yang tinggi kadar logam berat yang diinokulasi dengan mikoriza arbuskula mampu mengakumulasi logam berat lebih tinggi dibanding dengan tanaman yang tidak diinokulasikan dengan mikoriza arbuskula. Salah satu alasan yang mungkin untuk ini merupakan peningkatan pertumbuhan, yang dianggap berasal dari aktivitas sistem transport fosfat pada tanaman inang.

Kajian empiris dan riset ilmiah K. Turnau *et al.* (2005) menunjukkan, bahwa tanaman yang diinokulasikan dengan mikoriza arbuskula menghasilkan produksi dan akumulasi Ni lebih tinggi dibandingkan dengan tanaman yang tidak diinokulasikan dengan mikoriza arbuskula. Penambahan jamur mikoriza arbuskula mengurangi efek fitotoksik dari kadar Zn yang lebih tinggi.

E. Interaksi FMA dengan Hiperakumulator dan Non-Akumulator

Fungi mikoriza arbuskula mampu merangsang pertumbuhan hiperakumulator. Tanaman yang memiliki kapasitas untuk mentolerir kadar logam berat yang tinggi dan terakumulasi dalam jaringannya, dikenal sebagai metalofit atau hiperakumulator. Toleransi merupakan kemampuan tanaman atau mikroorganisme untuk hidup dan beradaptasi pada lingkungan yang tercemar dengan logam berat di dalam tanah (Dietz *et al.*, 1999). Hiperakumulator melindungi metabolisme sel dari toksisitas logam berat melalui penyerapan dan mentranslokasikannya dengan tonoplast, lalu terakumulasi di dalam vakuola (Maiti *et al.*, 2015)

Tanaman dengan kemampuan hiperakumulasi dan berasosiasi dengan mikoriza arbuskula merupakan salah satu penerapan teknologi fitoremediasi yang sangat tepat untuk memperbaiki kondisi tanah yang tercemar oleh logam berat (Miransari, 2011). Setelah logam memasuki hifa mikoriza arbuskula, mereka akan diimobilisasi atau ditranslokasikan menuju akar. Ion logam berat di dalam akar, mereka dapat diasingkan atau ditranslokasikan menuju pucuk (Leyval *et al.*, 1997).

Aplikasi mikoriza arbuskula juga pernah diterapkan di dalam tanaman *Cannabis sativa* pada tanah yang mengandung logam berat yang tinggi seperti Cd, Cr, dan Ni pada pucuk dan batang. Dalam hal ini, mikoriza arbuskula mampu merangsang spesies tanaman yang hiperakumulasi, serta meningkatkan translokasi logam dari akar menuju tunas melalui molekul metallothionein dan fitokelatin (Citterio *et al.*, 2005)

Eucalyptus globulus juga merupakan tanaman yang cocok tujuan remediasi tanah dari logam berat serta untuk perbaikan. Hasil riset dan kajian ilmiah C. A. Arriagada *et al.* (2007) menunjukkan, bahwa mikoriza arbuskula dapat meningkatkan serapan Cd dan Pb pada daun dan batang tanaman *Eucalyptus globulus*. Mikoriza arbuskula berkontribusi pada redistribusi Cd di dalam tanaman. Faktanya, akumulasi Cd di batang lebih tinggi daripada di daun kayu putih yang diinokulasi dengan mikoriza arbuskula. Redistribusi logam berat di bagian tanaman yang kurang aktif secara metabolik mungkin menjelaskan mengapa mikoriza arbuskula meningkatkan kandungan logam berat dan meningkatkan pertumbuhan kayu putih (C. A. Arriagada *et al.*, 2007).

Efek simbiosis fungi mikoriza arbuskula terhadap pertumbuhan tanaman ditentukan banyak faktor stres seperti kekeringan, pengasaman tanah, logam beracun, dan patogen tanaman (Finlay, 2008), baik yang membawa dampak positif maupun negatif. Berbagai kajian empiris dan riset ilmiah yang membuktikan bahwa adanya interaksi positif dan negatif antara mikoriza arbuskula dengan tanaman inang.

Tabel 2. Tinjauan pustaka tentang interaksi positif dan negatif fungi mikoriza arbuskula dengan tanaman yang digunakan untuk fitoremediasi

Spesies tanaman	Jenis logam berat	Jenis interaksi	Referensi
<i>Allium cepa</i>	Logam campuran	Positif	(Selvam & Mahadevan, 2002)
<i>Acalypha indica</i>	Pb, Cu, Ni, dan Zn	Positif	(Selvaraj <i>et al.</i> , 2005)
<i>Acer platanoides</i>	Cu	Positif	(Sonja Kosuta <i>et al.</i> , 2002)
<i>Acer ginnala</i>	Cu	Positif	(S. Kosuta & Hamel, 2000)
<i>Betula sp.</i>	Cd, Pb, Cd, Cu, Zn, Pb, Ni	Positif	(Krupa & Piotrowska-Seget, 2003)
<i>Avena sativa</i>	Cu, Zn	Positif	(Katarzyna Turnau & Mesjasz-Przybylowicz, 2003)
<i>Beta vulgaris</i>	Cd	Positif	(Blaudez <i>et al.</i> , 2000)
<i>Berkheya coddii</i>	Ni	Positif	(Medina <i>et al.</i> , 2005)
<i>Brassica sp.</i>	Zn, Cd, Pb	Positif	(H. M. Leung <i>et al.</i> , 2006)
<i>Echinochloa crusgalli</i>	Pb	Positif	(Selvaraj <i>et al.</i> , 2005)
<i>Daucus carota L</i>	Cs	Positif	(X. Chen <i>et al.</i> , 2005)
<i>Cynodon dactylon</i>	As	Positif	(Declerck <i>et al.</i> , 2003)
<i>Eclipta prostrata</i>	Ni, Zn, Pb, Cu	Positif	(F. Y. Wang <i>et al.</i> , 2007)
<i>Eucalyptus urophylla</i>	Cr dan Ni	Positif	Aggangan <i>et al.</i> , 1998
<i>Glycine max</i>	Zn dan Ni	Positif	(Jamal <i>et al.</i> , 2002)
<i>Hordeum vulgare</i>	U	Positif	(B. Chen <i>et al.</i> , 2005)
<i>Kummerowia striata</i>	Pb	Positif	(X. Chen <i>et al.</i> , 2005)
<i>Ixeris denticulata</i>	Pb	Positif	(X. Chen <i>et al.</i> , 2005)
<i>Lens culinaris</i>	Ni dan Zn	Positif	(Jamal <i>et al.</i> , 2002)
<i>Lycopersicon esculentum L.</i>	As Cd, dan Zn	Positif	(Y. Liu <i>et al.</i> , 2005) (Ouziad <i>et al.</i> , 2005)
<i>Paspalum vaginatum</i>	Ni, Pb, Cu, Zn	Positif	(Selvaraj <i>et al.</i> , 2005)
<i>Physalis minima</i>	Ni, Pb, Cu, Zn	Positif	(Selvaraj <i>et al.</i> , 2005)

Spesies tanaman	Jenis logam berat	Jenis interaksi	Referensi
<i>Pinus sylvestris</i>	Cd dan Zn	Positif	(Colpaert <i>et al.</i> , 2000)
<i>Pinus sylvestris</i>	Cd, Zn, dan Cu	Positif	(Werner & Karolewski, 2004)
<i>Zea mays</i>	Zn, Cu, Pb, Cd, dan Cr Cd, C,Zn, dan Pb	Positif	Pawłowska <i>et al.</i> , 2000 Joner <i>et al.</i> , 2001
<i>Allium porrum</i>	Cu, Cr, dan Cd	Negatif	Mozafar <i>et al.</i> , 2002
<i>Agrostis tenuis</i>	Cs	Negatif	Berreck <i>et al.</i> , 2001
<i>Daucus carota</i>	Cd	Negatif	Janoušková <i>et al.</i> , 2005b
<i>Andropogon virginicus</i>	Al	Negatif	(Kelly <i>et al.</i> , 2005)
<i>Hakea verrucosa</i>	Ni	Negatif	Boulet <i>et al.</i> , 2005
<i>Nicotiana tabacum</i>	Cd	Negatif	(Janoušková <i>et al.</i> , 2005)
<i>Picea sp.</i>	Zn, Ni, Cu, dan Cd	Negatif	Brunner <i>et al.</i> , 2000
<i>Agrostis capillaries</i>	Pb	Positif/Negatif	(Malcová <i>et al.</i> , 2003)
<i>Pinus sylvestris</i>	Zn, Cd, Ni, dan Cu	Positif/Negatif	(Blaudez <i>et al.</i> , 2000)
<i>Glycine max</i>	Mn	Positif/Negatif	(Malcová <i>et al.</i> , 2003)
<i>Zea mays</i>	Pb	Positif/Negatif	(Malcová <i>et al.</i> , 2003)

Sumber: diolah dari (Ho Man *et al.*, 2013)

F. Interaksi Jamur Mikoriza Arbuskula dan Non-Akumulator

Fungi mikoriza arbuskula berperan dalam meningkatkan serapan logam berat As pada akar tanaman *Cynodon dactylon* (H. M. Leung *et al.*, 2006). Tanaman yang berasosiasi dengan mikoriza arbuskula lebih mampu menyerap unsur hara mikro dan unsur hara utama seperti seng, mangan, dan tembaga ketika kurang tersedia di tanah. Pengaruh mikoriza arbuskular terhadap penyerapan dan akumulasi logam berat di akar dan tanaman sangat bervariasi. Kesenjangan mikoriza arbuskular berdasarkan hasil studi empiris dan ilmiah bahwa pengaruh mikoriza arbuskular tergantung pada bahan inokulum mikoriza, jenis tanaman, ketersediaan logam berat, dan kondisi tanah abiotik. (Ho Man *et al.*, 2013)

G. Peranan Mikoriza Arbuskular dalam Remediasi

Kegiatan antropogenik seperti kegiatan pertambangan merupakan kegiatan yang berpotensi mempercepat proses pencemaran lingkungan akibat tingginya ketersediaan logam berat. Akumulasi logam berat yang berlebihan dalam tanah dapat mempengaruhi kesuburan tanah, yang berdampak pada kegagalan pertumbuhan tanaman (Babadi *et al.*, 2019). Pencemaran tanah antropogenik baik oleh senyawa organik maupun anorganik merupakan masalah global yang cukup serius. Pencemaran anorganik yang paling signifikan berasal dari kelompok logam dan metaloid yang memiliki kepadatan relatif tinggi dan sangat beracun (Ali & Khan, 2018).

Simbiosis mikoriza arbuskula berperan dalam fitoremediasi pencemaran tanah (Dhalaria *et al.*, 2020). Mikoriza terdiri dari dua kelompok utama, yakni ectomycorrhiza terutama dibentuk oleh pohon hutan, dan mikoriza arbuskular yang terbentuk dari tanaman herbal. Jamur mikoriza mengekstrak karbon dan lipid dari tanaman dan mentransfer nutrisi mineral, terutama fosfor dan nitrogen, menuju tanaman (Ballantyne *et al.*, 2015). Mikoriza arbuskula membantu mengurangi stres tanaman yang terjadi di lahan tercemar, memperbaiki struktur tanah, melindungi akar dari patogen tanaman, serta berinteraksi dengan mikroba tanah lainnya (M. M. Gupta & Abbott, 2021). Fungi mikoriza arbuskula termasuk dalam sub filum glomeromycotina yang terdiri atas sekitar 330 spesies jamur (M. M. Gupta & Abbott, 2021). Jamur ini membentuk asosiasi mutualistic dan obligat dengan kira-kira 80% tanaman berpembuluh yang berperan penting dalam meningkatkan efisiensi agroekosistem (Brundrett & Tedersoo, 2018). Mikoriza arbuskula mampu meningkatkan produktivitas tanaman karena berperan sebagai pupuk, pelindung, sekaligus pengurai hayati (Manju M. Gupta *et al.*, 2018).

BAB 7

APLIKASI FMA DALAM FITOREMEDIASI

Fungi mikoriza arbuskula berkontribusi di dalam fitoremediasi melalui dua cara. *Pertama*, mengakumulasi dan mengasingkan ion logam beracun sehingga melindungi inangnya dari polutan (fitoakumulasi). *Kedua*, mengirimkan mineral penting seperti Cu dan Zn yang berpotensi terjadinya akumulasi logam berat pada tanaman inang (Majumdar *et al.*, 2018). Fungi mikoriza arbuskula yang memiliki tingkat toleransi berbeda bergantung pada jenis dan konsentrasi logam berat. Fungi mikoriza arbuskula mampu meningkatkan pertumbuhan tanaman pada tanah memiliki kadar Cd yang tinggi. Penambahan fungi mikoriza arbuskula mampu mengurangi akumulasi Cd pada tanaman *Linum usitatissimum* (Hancock *et al.*, 2012). Riset ilmiah lainnya juga melaporkan bahwa mikoriza arbuskula mampu menyerap kadar logam berat pada tanaman *Urochloa brizantha*, *Acacia mangium*, dan *Sorgum bicolor* yang tanahnya tercemar Pb, Zn, Cu, dan Cd (de Fátima Pedroso *et al.*, 2018). Kemampuan mikoriza arbuskula dalam teknologi fitoremediasi ditentukan oleh ketersediaan logam berat, sifat fisik kimia tanah, asosiasi tanaman dengan mikroorganisme, kondisi pertumbuhan tanaman, kerapatan akar (Lebeau *et al.*, 2008), spesies fungi mikoriza, serta toleransi tanaman terhadap kontaminan dan bioavailabilitas logam berat (Yang *et al.*, 2015).

Mikorisasi berguna untuk revegetasi di daerah yang tercemar. Hal ini disebabkan pertumbuhan tanaman yang diinokulasi dengan mikoriza arbuskula pada daerah tersebut menunjukkan pertumbuhan yang lebih baik. Berdasarkan hasil kajian Rabie (2005), tanaman kapas yang diinokulasi dengan mikoriza arbuskula dapat meningkatkan kemampuan fitostabilisasi pada lahan yang tercemar. Strategi mikoriza arbuskula di

dalam fitostabilisasi dilakukan dengan cara pengendapan logam pada miselium dan sel akar kortikal untuk mencegah translokasi logam berat dari akar menuju tunas.

Kemampuan mikoriza arbuskula juga meningkatkan serapan P pada tanaman sehingga biomassa tanaman menjadi tinggi. Dengan begitu, proses detoksifikasi efek potensial logam berat melalui pengenceran, pengendapan, atau penyerapan logam pada butiran fosfat sehingga berpeluang untuk membatasi masuknya ion logam berat menuju sel-sel akar. Kajian empiris dan riset ilmiah Gu *et al.* (2017) menunjukkan, bahwa inokulasi mikoriza arbuskula pada beberapa spesies tanaman menunjukkan variasi dalam produksi biomassa dan akumulasi logam. Misalnya, tanaman *lolium peren*, *Festuca arundinacea*, *Hylotelephium spectabile*, dan *Tradescantia pallida* menunjukkan respons pertumbuhan paling baik pada inokulasi mikoriza dan konsentrasi Pb, Zn, Cu, dan Cd menjadi rendah baik pada pucuk maupun akar.

Fungi mikoriza arbuskular membentuk simbiosis dengan lebih dari 80% tanaman vaskular budidaya. Asosiasi mikoriza dengan tanaman ini mampu menciptakan ekosistem alami dengan menjajah akar-akar intraseluler. Mikoriza meningkatkan kemampuan tanaman inang dalam hal penyerapan nutrisi dan air. Sebagai respons umpan balik, tanaman inang menyediakan karbohidrat untuk perkembangan dan pertumbuhan mikoriza (Wang *et al.*, 2017). Mikoriza bukan hanya memasok senyawa mineral menuju tanaman, melainkan juga meningkatkan sifat fisikokimia tanah, serta bertindak sebagai filter untuk memblokir xenobiotik di dalam miselium (Wu *et al.*, 2019). Mikoriza juga mampu bertindak sebagai penghalang fisik dan berfungsi sebagai selubung untuk inangnya (Ma *et al.*, 2019), serta melumpuhkan logam berat di akar tanaman (fitostabilisasi) (Wu *et al.*, 2016). Fungi mikoriza arbuskular juga telah dilaporkan berasosiasi dengan akar tanaman yang terkontaminasi logam (Kodre *et al.*, 2017) dan telah disarankan dalam optimalisasi pertumbuhan dan produktivitas tanaman di bawah kondisi ketersediaan hara yang terbatas (Ma *et al.*, 2019).

Fitoremediasi logam berat berbasis fungi mikoriza arbuskula merupakan teknik remediasi yang ramah lingkungan, ekonomis, dan memiliki lebih sedikit efek polutan sekunder (Morar *et al.*, 2018). Fungi mikoriza arbuskula dapat menginduksi fitoremediasi logam berat secara langsung yakni melalui struktur jamur dengan cara sekresi glomalin, atau secara tidak langsung yakni melalui peningkatan toleransi tanaman. Fitoremediasi logam berat dapat ditingkatkan dengan melibatkan fungi mikoriza arbuskula melalui peningkatan serapan hara dan ketahanan terhadap logam beracun (Riaz *et al.*, 2021).

A. Mekanisme Fitoremediasi Berbasis Mikoriza Arbuskula

Fitoremediasi dengan mikoriza arbuskula melibatkan banyak proses termasuk peningkatan penyerapan hara melalui peningkatan aktivitas mikroba tanah dengan kondisi logam berat yang tidak terlalu tinggi, pengikatan logam berat dan peningkatan biomassa tanaman serta tahan terhadap kontaminasi pada tanah dengan kadar logam berat tinggi. Jalur penyerapan melalui hifa ekstradikal atau sel spora mikoriza arbuskula (Dhalaria *et al.*, 2020). Mekanisme pergerakan logam berat menuju akar tanaman terjadi melalui banyak cara seperti deposisi di dinding sel atau vakuola mikoriza, dan sekuestrasi siderophores untuk menyimpan logam berat di apoplasma akar atau di dalam tanah, metallothionein atau fitokelatin.

Logam berat dalam sel mikoriza yang terdapat di dalam tanah, dan alokasi logam berat dari sitoplasma oleh pengangkut logam dalam plasmalemma atau tonoplast dari kedua simbion (Miransari, 2011). Mikoriza arbuskula mampu melumpuhkan logam berat sehingga tepat dijadikan agen fitoremediasi (Ambrosini *et al.*, 2015). Serapan dan distribusi logam berat tanaman inang ditentukan oleh mikoriza arbuskula. Kajian empiris dan riset ilmiah B. Chen *et al.* (2018) menunjukkan, bahwa pada akar tanaman *Lotus japonicus* yang diinokulasi dengan mikoriza arbuskula ternyata mampu mengakumulasi logam Cd baik dalam kadar yang tinggi maupun rendah. Penyerapan hifa ekstradikal dan translokasi Cd menuju hifa intradikal selanjutnya disimpan di dalam struktur mikoriza

terutama pada arbuskula dan tidak ditransfer menuju tanaman (B. Chen *et al.*, 2018).

B. Kumulasi dan Penyerapan Logam Berat dengan Glomalin

Glomalin merupakan glikoprotein yang tidak larut dalam air dan tahan dengan suhu. Glomalin dibentuk oleh fungi mikoriza arbuskula melalui miselium dan dinding spora (Wang *et al.*, 2019). Senyawa organik glomalin (GRSP atau *glomalin related soil protein*) yang disekresikan oleh fungi mikoriza arbuskula berfungsi mengurangi bioavailabilitas logam berat (Ghasemi Siani *et al.*, 2017). GRSP bersifat bandel dan mampu bertahan lama di dalam tanah, serta berperan penting dalam penyimpanan C/N jangka panjang (Malekzadeh *et al.*, 2016). Jamur mikoriza arbuskular juga menunjukkan tingkat ketahanan yang sangat berbeda terhadap logam berat, dan beberapa spesies jamur dapat bertahan hidup dalam kondisi toksisitas logam yang paling keras sekalipun (Schneider *et al.*, 2013). Banyak riset telah menunjukkan bahwa GRSP berpotensi besar untuk mengkelat logam berat serta mengurangi bioavailabilitasnya dengan cara spesiasi logam di rizosfer (Malekzadeh *et al.*, 2016). Beberapa riset lain juga telah melaporkan bahwa 1 g glomalin yang disekresikan oleh beberapa strain jamur mikoriza arbuskular dapat mengkelat hingga 4,3 mg Cu, 0,08 mg Cd, dan 1,12 mg Pb dari tanah yang terkontaminasi logam berat (González-Chávez *et al.*, 2004).

Banyak hasil riset ilmiah yang telah memberikan bukti tentang kuatnya serapan atau khelasi logam berat yang dilakukan oleh Glomalin (Vodnik *et al.*, 2008; Chern *et al.*, 2007; Citterio *et al.*, 2005; Ghasemi Siani *et al.*, 2017). Fungi mikoriza arbuskula pada tanah yang terkontaminasi Cd meningkatkan konsentrasi glomalin sebagai mekanisme pelindung di rizosfer, mengurangi translokasi Cd menuju akar sorgum, serta membatasi kandungan Cd dalam jaringan tanaman (Babadi *et al.*, 2019). Kajian empiris dan riset ilmiah Nafady & Elgharably (2018) juga menunjukkan, bahwa jamur mikoriza arbuskular, khususnya *Glomus aggregatum* yang menunjukkan penurunan konsentrasi Cu, Cd, Zn dan Pb dengan signifikan pada pucuk dengan pelepasan glomalin (GRSP) yang

mengandung logam berat. Begitu pula hasil riset Hu *et al.* (2019) yang melaporkan bahwa simbiosis fungi mikoriza arbuskula menunjukkan peningkatan total GRSP di tanah dan penurunan akumulasi Pb dan Cd pada jagung karena serta adanya peningkatan pH tanah.

C. Akumulasi Logam Berat pada Struktur Fungi Mikoriza Arbuskula

Fungi mikoriza arbuskula mampu mengakumulasi logam berat melalui struktur jamur dalam mengurangi penyerapan logam berat oleh tanaman inang, menghasilkan lebih sedikit toksisitas, serta meningkatkan toleransi terhadap tanaman inang. Akumulasi logam berat oleh mikoriza arbuskula dilakukan oleh miselium intraradikal dan ekstraradikal (Wu *et al.*, 2019). Ini dianggap sebagai alat biologis yang sangat baik untuk homeostasis logam berat dalam ekosistem. Adsorpsi logam berat pada permukaan struktur jamur terjadi melalui adsorpsi dan kemudian reduksi logam berat dari satu bentuk menuju bentuk lain oleh partikel bermuatan positif seperti sistein, asam amino, gugus tiol dan glutathione (Joutey *et al.*, 2015). Pada intinya, AMF mampu mengurangi translokasi logam berat dalam sitoplasma tanaman inang melalui akumulasi logam berat pada permukaan hifa (Wu *et al.*, 2015).

Fungi mikoriza arbuskula juga dapat menghasilkan zat polimer ekstraseluler (EPS) sebagai partikel yang ditemukan di permukaan jamur. EPS memiliki gugus karboksil, fosfat, amino, dan hidroksil fungsional dan memiliki afinitas tinggi untuk penyerapan logam melalui mekanisme khelasi, deposisi permukaan, dan pertukaran ion (More *et al.*, 2014). Struktur jamur umumnya jauh lebih halus dibandingkan akar, serta memiliki kemampuan menyerap elemen dan mineral (Riaz *et al.*, 2021).

Logam berat seperti Cr³⁺ telah ditemukan mengendap pada permukaan jamur dan berpotensi mengikat kompleks dengan histidine atau karboksilat cair untuk kemudian diserap menuju dalam dinding sel (Wu *et al.*, 2015). Beberapa jamur mikoriza arbuskular juga telah dilaporkan mampu mempromosikan kompartemen metalisasi logam dengan struktur jamur intra-radikal, mengurangi toksisitas logam berat (Krzestowska, 2011). Bahkan baru-baru ini, Chen *et al.* (2018) melaporkan

bahwa arbuskula jamur dan hifa antar sel memiliki akumulasi Cd yang tinggi dan translokasi terbatas pada sel tanaman. González-Guerrero *et al.* (2008) juga melaporkan, bahwa Cd, Cu, dan Zn terdapat di dalam miselia ekstraradikal dan spora jamur dimana unsur-unsur beracun ini didistribusikan menuju dinding sel jamur dan vakuola jamur.

Hubungan menguntungkan fungi mikoriza arbuskular mampu meningkatkan ketahanan tanaman terhadap Cr, yang terlibat langsung dalam stabilisasi dan konversi Cr, dan fungsi tidak langsung melalui simbiosis fungi mikoriza arbuskula melalui penyerapan nutrisi dan kontrol fisiologis (Wu *et al.*, 2019). Hasil riset terbaru Wu *et al.* (2018) menemukan, bahwa Zn ternyata banyak terakumulasi pada akar jagung yang diinokulasikan dengan fungi mikoriza arbuskula yang tumbuh di tanah terkontaminasi Zn/Pb.

Logam berat disimpan pada dinding sel akar atau terakumulasi dalam sel akar yang kemudian membentuk ikatan kompleks dengan molekul organik seperti polifosfat, asam amino, metallothionein, atau fitokelatin (S. A.L. Andrade *et al.*, 2010). Salah satu hasil riset menunjukkan, bahwa mikoriza arbuskula yang diisolasi dari tanaman toleran *Viola calaminaria* memiliki efek yang signifikan pada akumulasi ion logam berat di akar tanaman dalam bentuk non-toksik, serta menghambat atau membatasi translokasi logam berat menuju pucuk (Tonin *et al.*, 2001). Logam berat juga dapat disimpan di dalam kompartemen seluler, yakni spora dan vesikel. Setelah penyimpanan, laju metabolisme akan berkurang dan efek logam berat pada metabolisme tanaman juga demikian berkurang dimana hal ini memiliki efek menguntungkan pada pertumbuhan tanaman dan mikoriza arbuskula (Ambrosini *et al.*, 2015). Mikoriza arbuskula mengakumulasi Cu dalam vesikel serta meningkatkan toleransi *tagetes erecta* L. Bahkan ketika akumulasi meningkat di akar, sistem ini menunjukkan memiliki potensi penggunaan sebagai fitostabilizer Cu di tanah tercemar (Castillo *et al.*, 2011).

Tanaman yang diinokulasi dengan mikoriza arbuskula mengurangi toksisitas logam berat. Berdasarkan kajian empiris dan riset ilmiah S. A.L.

Andrade *et al.* (2010) menunjukkan, bahwa tanaman yang diinokulasi dengan mikoriza pada lahan tercemar Cu dan Zn ternyata di dalamnya memiliki konsentrasi tinggi sehingga terjadi penurunan pertumbuhan pucuk dan akar. Kondisi ini menunjukkan tingginya fitotoksitas pada konsentrasi yang disebut fitokelatin. Namun demikian, toleransi Cd dengan inokulasi AMF dianggap berasal dari peningkatan akumulasi metabolit stres seperti gula, protein, prolin, dan glisin betaine, yang akhirnya mengarah pada peningkatan pertumbuhan (Abdelhameed & Metwally, 2019).

Inokulasi dengan mikoriza arbuskula secara signifikan meningkatkan aktivitas enzim antioksidan. Misalnya pada tanaman *Trigonella foenumgraecum* L. diinokulasi dengan mikoriza arbuskula, dimana kerusakan tanaman yang disebabkan oleh stres yang dipicu oleh logam semakin berkurang karena adanya peningkatan aktivitas enzim antioksidan (Abdelhameed & Metwally, 2019). Hal ini direkomendasikan menjadi strategi toleransi tanaman mikoriza trigonella terhadap cekaman Cd. Sesuai dengan penelitian dimana *Cassia italica* yang ditanam pada tanah dengan kandungan Cd yang tinggi yang diinokulasi dengan mikoriza arbuskula.

Penerapan mikoriza arbuskula pada tanaman juga menunjukkan peningkatan kandungan klorofil dan protein dan juga mengurangi serapan Cd (Hashem *et al.*, 2016). Tanaman yang diinokulasi dengan mikoriza arbuskula pada tanah keracunan logam berat mampu mengurangi peroksidasi membran, yang mungkin disebabkan karena peran mikoriza arbuskula dalam penyerapan fosfat dan aktivitas antioksidan. Mikoriza arbuskula dapat memicu peningkatan produksi GRSP-protein tanah yang dapat bergabung dengan berbagai macam logam berat. GRSP yang dihasilkan dalam jumlah besar merupakan komponen penting di dalam tanah dengan peran yang berbeda-beda, yakni untuk stabilitas agregat tanah, fiksasi dan siklus karbon, mencegah kehilangan air dan mengurangi racun (Gao *et al.*, 2019).

GRSP menjadi bagian dari mekanisme mikoriza arbuskula untuk pengentasan dalam proses remediasi. Keanekaragaman kandungan FMA

dan glomalin dianggap sebagai indikator yang baik untuk rehabilitasi tanah yang terkontaminasi Pb, Cu Zn, dan Cd (Lopes Leal *et al.*, 2016). Mikoriza arbuskula mampu melindungi tanaman dari kontaminasi logam berat dengan konsentrasi akumulasi yang tinggi dalam sistem radikal dan dapat mengurangi translokasi pada tunas (Tonin *et al.*, 2001).

D. Spesies FMA dalam Fitoremediasi

Perbedaan spesies mikoriza arbuskula menunjukkan tingkat keberhasilan fitoremediasi yang beragam. Aplikasi dan pengaruh berbagai spesies mikoriza arbuskula dapat dilihat pada Tabel dibawah ini.

Tabel 3. Rincian spesies fungi mikoriza arbuskula, jenis tanaman, dan mekanisme fitoremediasi

SPESES FMA	SPESES TANAMAN	JENIS LOGAM	MEKANISME	REFERENSI
Funneliformis mosseae	<i>Glycine max, Lens culinaris</i>	Ni, Zn	fitoekstraksi	(Jamal <i>et al.</i> , 2002)
	<i>Oryza sativa</i>	Klorotalonil	Pengentasan	(X. H. Zhang <i>et al.</i> , 2006)
	<i>Nicotiana tabacum</i>	Cd	fitostabilisasi	(Janoušková <i>et al.</i> , 2006)
	<i>Trifolium repens</i>	Mo, Cu Mn, As, Zn, Al, Ni, Cd	fitostabilisasi	(Azcón <i>et al.</i> , 2009)
	<i>Coreopsis drummondii</i>	Cu	fitostabilisasi	(Mirlean <i>et al.</i> , 2007)
	<i>Cajanus cajan</i>	Pb,Cd	fitostabilisasi	(Garg & Aggarwal, 2012)
	<i>Capsicum annum</i>	Cr	fitostabilisasi	(Ruscitti <i>et al.</i> , 2011)
	<i>Zea mays</i>	Pb, Cr, Cd, Ni	fitoekstraksi	(G. Singh <i>et al.</i> , 2019)
	<i>Robinia pseudoacacia</i>	Pb	fitostabilisasi	(Yang <i>et al.</i> , 2015)
Rhizophagus intraradices	<i>Agrostis capillaris, Zea</i>	Pb	Pengentasan	(Malcová <i>et al.</i> , 2003)

SPESES FMA	SPESES TANAMAN	JENIS LOGAM	MEKANISME	REFERENSI
	<i>mays</i>			
	<i>Sorghum bicolor</i>	Cu	fitostabilisasi	(Toler <i>et al.</i> , 2005)
	<i>Berkheya coddii</i>	Ni	fitoekstraksi	(Katarzyna Turnau & Mesjasz-Przybylowicz, 2003)
	<i>Zea mays</i>	Pb	fitostabilisasi	(Sudová & Vosátka, 2007)
	<i>Nicotiana tabacum</i>	Cd	fitostabilisasi	(Janoušková <i>et al.</i> , 2006)
	<i>Capsicum annum</i>	Cr	fitostabilisasi	(Ruscitti <i>et al.</i> , 2011)
	<i>Helianthus annuus</i>	Cd	fitostabilisasi	(Sara Adrián López De Andrade <i>et al.</i> , 2008)
	<i>Lonicera japonica</i>	Cd	Pengentasan	(Jiang <i>et al.</i> , 2016)
	<i>Robinia pseudoacacia</i>	Pb	Pengentasan	(Yang <i>et al.</i> , 2015)
	<i>Medicago sativa</i>	Cd	Pengentasan	(F. Zhang <i>et al.</i> , 2019)
	<i>Zea mays</i>	Cd	Pengentasan	(L. Liu <i>et al.</i> , 2018)
	<i>Zea mays</i>	Pb, Cd, Ni, Cr	fitoekstraksi	(G. Singh <i>et al.</i> , 2019)
Rhizophagus irregularis	<i>Medicago truncatula</i>	Pb	Pengentasan	(X. Zhang <i>et al.</i> , 2019)
	<i>Solanum nigrum</i>	Cd	fitostabilisasi	(G. Wang <i>et al.</i> , 2020)
Septoglomus deserticola	<i>Eucalyptus globulus</i>	As	fitoekstraksi	(C. Arriagada <i>et al.</i> , 2009)
	<i>Solanum melogena</i>	Cd, Zn	fitoekstraksi	(Mohammad & Mitra, 2013)
	<i>Ampelopteris prolifera</i>	Cr	fitoekstraksi	(J. Singh <i>et al.</i> , 2014)
	<i>Eucalyptus</i>	Zn	fitoekstraksi	(C. Arriagada

SPESES FMA	SPESES TANAMAN	JENIS LOGAM	MEKANISME	REFERENSI
	<i>globulus</i>			<i>et al., 2010)</i>
Claroideoglomus claroideum	<i>Medicago sativa</i>	Cd	Pengentasan	(Zhan <i>et al.</i> , 2019)
	<i>Nicotiana tabacum</i>	Cd	fitostabilisasi	(Janoušková <i>et al.</i> , 2006)
Rhizophagus aggregatus	<i>Zea mays</i>	Cd, Pb, Cr, Ni	fitoekstraksi	(G. Singh <i>et al.</i> , 2019)
	<i>Medicago sativa</i>	Cd	fitostabilisasi	(F. Zhang <i>et al.</i> , 2019)
Rhizophagus fasciculatus	<i>Zea mays</i>	Cd, Pb, Cr, Ni	fitoekstraksi	(G. Singh <i>et al.</i> , 2019)
Diversispora spurca	<i>Cynodon dactylon</i>	Pb, Cd, Zn	fitostabilisasi	(Zhan <i>et al.</i> , 2019)
Funneliformis geosporus	<i>Nicotiana tabacum</i>	Cd	fitostabilisasi	(Janoušková <i>et al.</i> , 2006)
Glomus versiforme	<i>Lonicera japonica</i>	Cd	fitostabilisasi	(Jiang <i>et al.</i> , 2016)

Sumber : (Solís-Ramos *et al.*, 2021)

BAB 8

MEKANISME BIOKIMIA

Simbiosis dengan tanaman inang difasilitasi oleh hifa yang tumbuh cepat yang dapat tumbuh di bawah kondisi toksik logam yang keras dan kondisi lingkungan yang penuh tekanan (Cabral *et al.*, 2015; Cui *et al.*, 2019). Selama simbiosis, FMA dapat menyebabkan beberapa perubahan pada tanaman inang untuk mengatasi lingkungan yang beracun tersebut. FMA secara tidak langsung menginduksi toleransi pada tanaman dengan meningkatkan penyerapan air dan nutrisi mineral, meningkatkan biomassa pucuk, mengubah morfologi akar dan mengurangi stres oksidatif yang disebabkan oleh logam berat.

A. Peningkatan Serapan Hara pada Tanaman Inang

Fosfor (P) menjadi salah satu unsur penting dalam produktivitas dan perkembangan tanaman (Chen *et al.*, 2019). Fosfor dalam tanah umumnya tidak bergerak dan tidak tersedia bagi akar tanaman (Holford, 1997). Akar tanaman menyerap P di sekitar akar, tetapi karena mendominasi area akar, P menjadi lebih tipis dan akar tanaman melebar untuk mengekstrak lebih banyak P dari zona Pi. Namun, tingkat perpanjangan akar tanaman cukup terbatas. FMA berperan dalam perluasan akar sehingga lebih banyak fosfor yang dapat dicapai. Selain itu, hifa jamur juga menghidrolisis zat organofosfat. Hifa intraseluler jamur mikoriza arbuskular menembus epidermis akar dan sel inang kortikal yang kemudian membentuk struktur khusus yakni arbuskula untuk bertukar nutrisi dengan inang (Bonfante & Genre, 2010).

Toksisitas logam umumnya menyebabkan pengurangan nutrisi mineral dalam tanah, yang pada akhirnya mempengaruhi tanaman. Asosiasi mikoriza dianggap membantu meningkatkan penyerapan nutrisi dan air (Debeljak *et al.*, 2018; Smith dan Baca, 2010b). Sebuah penelitian terbaru milik Cui *et al.* (2019) mengkonfirmasi, bahwa jamur mikoriza arbuskular dapat mengurangi toksisitas Cd pada tanaman kedelai. Jamur mikoriza arbuskular juga mampu memicu adanya pemisahan mineral kecambah dan akar. Jamur mikoriza arbuskular tidak hanya meningkatkan P, tetapi juga meningkatkan Mg.

Pembentukan koloni cendawan mikoriza secara nyata meningkatkan unsur hara fosfor (P) tanaman. Jamur mikoriza arbuskular menghambat penyerapan As dan mempertahankan akar As dengan mengatur ekspresi gen mikoriza dan gen MsPT4 transporter P yang diinduksi oleh metallothionein MsMT2 (Li *et al.*, 2018). Jamur mikoriza arbuskular dapat meningkatkan kandungan klorofil dan fosfor tanaman inang di bawah toksisitas Hg (50 g g^{-1}). FMA mempengaruhi penyerapan hara tanaman tergantung pada jenis inokulum jamur dan keberadaan Hg (Debeljak *et al.*, 2018).

Berdasarkan studi empiris dan ilmiah Chang *et al.* (2018), jamur mikoriza arbuskular meningkatkan serapan N, P, dan K pada tanaman jagung terkontaminasi Cd hingga penurunan 76,8%. Jamur mikoriza arbuskular dapat menurunkan toksisitas logam berat dengan menghambat translokasi logam berat menuju jaringan tanaman inang (Bai *et al.*, 2008).

B. Menginduksi Sistem Pertahanan Enzimatik dan Non Enzimatik

Logam berat menjadi salah satu faktor abiotik penyebab stres oksidatif pada tanaman. Spesies oksigen reaktif (ROS) banyak terjadi selama metabolisme tanaman dan proses perkembangan yang bertindak sebagai molekul pemberi sinyal. Selalu ada keseimbangan antara produksi dan penggunaan ROS dalam sel tanaman (Kamran *et al.*, 2020). Namun, dalam kondisi stres akibat toksisitas logam berat, ROS diproduksi dalam jumlah yang besar. Tanaman tidak dapat lepas dari kondisi iklim yang

merugikan, sehingga perubahan tersebut dirasakan dan diproses oleh tanaman Untuk mengaktifkan transmisi sinyal (ekspresi gula gen) melalui ROS (*signaling*). Beradaptasi cepat terhadap kondisi stres ini merupakan langkah pertama untuk mengatasi toksisitas logam berat (Z. Bin Luo *et al.*, 2016). Tanaman mengurangi konsentrasinya dengan cara yang beragam. Mekanisme antioksidan enzimatik dan non-enzimatik melibatkan kaskade berbagai enzim dan bertindak secara sinergis mengatasi peningkatan konsentrasi ROS yang disebabkan oleh logam berat pada tanaman (Kamran *et al.*, 2020).

Fungi mikoriza arbuskula terbukti mampu mengaktifkan mekanisme perlindungan pada tanaman inang (Devi *et al.*, 2019). Kontaminasi arsenik (As) merupakan tekanan lingkungan yang paling umum terjadi dan merupakan ancaman besar bagi kesehatan manusia. Dua spesies fungi mikoriza arbuskula yakni *Rhizoglyphus intraradices* dan *Glomus etunicatum* (Sharma *et al.*, 2017) telah diuji untuk menentukan efek induktifnya pada pengurangan stres oksidatif oleh ROS di dalam tanaman gandum. Mikoriza arbuskula menunjukkan tingkat aktivitas enzim antioksidan (SOD, POD dan CAT) dan molekul antioksidan yang lebih tinggi (prolin, karotenoid dan tokoferol) sehingga tingkat stres As yang tinggi terjadi pada tanaman mikoriza alih-alih tanaman non-mikoriza. GSH: GSSG (glutathione: disulfide glutathione) dan AsA: DHA (askorbat: dehydroascorbate) mengkompensasi H₂O₂ dan mengurangi peroksidasi lipid (Sharma *et al.*, 2017).

Sebagian besar peneliti melaporkan, bahwa mikoriza pada jagung mampu menurunkan konsentrasi Cu baik pada akar maupun pucuk jagung dibandingkan dengan tanaman non mikoriza. Penyerapan logam berat yang rendah dalam jaringan tanaman menghasilkan sedikit kerusakan terkait dengan peroksidasi lipid membran serta peningkatan sistem pertahanan (Merlos *et al.*, 2016).

Tanaman yang dikolonisasi dengan *Glomus versiforme* mampu mengurangi efek merusak dari toksisitas Cd di *Solanum photeinocarpum* dengan mempertahankan sistem antioksidan yang efisien serta mengurangi penyerapan Cd. (Tan *et al.*, 2015). Bahkan baru-baru ini,

Molina *et al.* (2020) telah melaporkan, bahwa *Glycine max* yang tumbuh di lingkungan yang terkontaminasi dengan Cd mengalami stres oksidatif yang parah. Ketika diinokulasi dengan mikoriza *Rhizophagus intraradices*, maka akan terjadi pengurangan kerusakan oksidatif dan kandungan Cd di bagian tanaman.

Mikoriza arbuskular mampu menginduksi aktivasi sistem kekebalan (CAT, POD, dan SOD) dan mengurangi peroksidasi lipid pada *Dysosma versipellis* di bawah tekanan Cu (J. Luo *et al.*, 2021). Liu *et al.* (2011) dalam hal ini juga menemukan, bahwa kondisi Cd yang tinggi pada tanah menunjukkan aktivitas CAT dan POD pada tanaman calendula lebih tinggi pada tanaman mikoriza daripada tanaman yang tidak diinokulasi. Azcón *et al.* (2009) juga melaporkan, bahwa inokulasi jamur mikoriza arbuskular di lingkungan yang terkontaminasi logam berat mampu meningkatkan aktivitas CAT dan APX yang signifikan pada tanaman *Trifolium repens*.

C. Peningkatan Biomassa Tanaman Inang

Tanaman memiliki banyak mekanisme untuk mengatasi tekanan lingkungan. Jamur mikoriza yang terlibat dalam akumulasi logam berat mampu menginduksi berbagai modifikasi tanaman inang. AMF telah terbukti mempengaruhi bioavailabilitas logam berat di tanaman inang, serta meretensinya di dalam akar. AMF mampu menahan logam di akar tanaman mikoriza serta membatasi translokasi menuju bagian udara (Janeeshma & Puthur, 2020). Kajian empiris dan riset ilmiah Liang *et al.* (2009) juga menunjukkan, bahwa penyerapan logam berat yang lebih rendah pada tanaman jagung yang diinokulasi dengan fungi mikoriza arbuskula terjadi karena retensi di akar. Baghaie *et al.* (2019) juga mengungkapkan, bahwa fungi mikoriza arbuskula dapat mengurangi penyerapan Cd dalam biji-bijian roti gandum dan sebagian besar Cd terakumulasi di akar tanaman.

Tanaman alfalfa yang diinokulasikan dengan mikoriza *Glomus intraradices* juga menunjukkan peningkatan signifikan biomassa tunas sebesar 1,7 kali lipat, dan meningkatkan distribusi Cd di dinding sel akar sebesar 37,2% (Wang *et al.*, 2012). Kajian empiris dan riset ilmiah Huang

et al. (2017) juga menunjukkan, bahwa fungi mikoriza arbuskula mampu meningkatkan proporsi logam berat berupa Pb yang tidak aktif di akar tanaman, sementara Pb fraksi larut menurun di bagian akar, batang, dan daun tanaman *Robinia pseudoacacia*. Fraksi Pb larut merupakan logam berat yang beracun bagi tanaman (He *et al.*, 2010). Distribusi selektif logam berbahaya menjadi strategi penting dalam detoksifikasi. Distribusi Cd di dinding sel menjadi salah satu mekanisme resistensi bagi toleransi tanaman terhadap logam berat. Dinding sel banyak mengandung ion bermuatan negatif, seperti pektin, selulosa, hemiselulosa dan protein (Genre *et al.*, 2009).

Cd organik maupun anorganik yang larut dalam air merupakan bentuk Cd yang paling beracun bagi tanaman. Akan tetapi, pektat, protein Cd terintegrasi, dan Cd fosfat tidak larut umumnya kurang berbahaya bagi tanaman (Weng *et al.*, 2012). Tanaman yang diinokulasi dengan fungi mikoriza arbuskula memiliki lebih banyak akumulasi Cd di akar dibanding pucuk dan memiliki proporsi bentuk tidak aktif Cd yang lebih tinggi di jaringan tanaman dari pada tanaman kontrol (Wang *et al.*, 2012).

D. Morfologi Akar dan Perubahan Rizosfer

Fungi mikoriza arbuskula mampu menginduksi perubahan morfologi inang agar mampu beradaptasi di dalam kondisi yang merugikan seperti toksisitas logam (Camenzind *et al.*, 2016). Perubahan ini berupa modifikasi pada rizosfer dan biomassa tanaman. Akar tanaman menjadi organ pertama dan terpenting dari spesies tanaman penting yang selalu bersentuhan dengan area yang terkontaminasi (Yan *et al.*, 2021). Karena itu, akar merupakan organ utama dalam penyerapan atau penghalang polutan (Alam *et al.*, 2019). Beberapa tanaman memiliki potensi besar untuk bertoleransi terhadap stres logam berat yang berasosiasi dengan fungi mikoriza arbuskula dengan stabilisasi logam berat di akar tanaman untuk mengurangi translokasi ion logam berat di pucuk dan daun (Abdelhameed & Metwally, 2019).

Akar tanaman dengan terpanjang serta jumlah ujung akar yang banyak memiliki kemampuan dalam menyediakan nutrisi, mineral, dan air

(Jastrow dan Miller, 1993; Mohammadi *et al.*, 2011). Pertumbuhan rambut dan permukaan akar berguna untuk memberikan area penyerapan nutrisi yang lebih besar di bawah tekanan abiotik (Pavithra & Yapa, 2018). Tanaman yang berasosiasi dengan jamur mikoriza arbuskular memproduksi banyak fitohormon untuk proliferasi dan perkembangan akar. Rambut akar bertindak sebagai filter yang selektif dalam menyerap beberapa logam sehingga mengurangi transfer logam berat menuju pucuk (Singh *et al.*, 2019). Jamur mikoriza arbuskular telah menunjukkan kemampuan untuk meningkatkan panjang akar dan luas permukaan pada tanaman yang tumbuh di daerah bekas tambang batu bara. Interaksi antara jamur mikoriza arbuskular dengan akar tanaman berakibat pada peningkatan kadar asam indoleasetat dan sitokinin pada akar untuk menjaga keseimbangan hormonal (Bi *et al.*, 2019). Sistem hormon yang seimbang bukan hanya mendorong pertumbuhan akar, melainkan juga biomassa tanaman di atas tanah. Fungi mikoriza arbuskula mampu menurunkan fluktuasi hormonal akibat cekaman abiotik (Abd Allah *et al.*, 2015). Kajian empiris dan riset ilmiah Yao *et al.* (2005) menunjukkan, bahwa asam indoleasetat mendorong pertumbuhan akar lateral.

Menurut kajian empiris dan riset ilmiah G. Singh *et al.* (2019), fungi mikoriza arbuskular memicu aktivitas enzim tanah seperti glukosidase, dehidrogenase, asam dan basa fosfatase. Semua itu disintesis untuk menciptakan pertumbuhan yang lebih baik bagi inang. Jamur yang tumbuh di sekitar akar mikoriza tanaman mampu memberikan penghalang fisik. Tidak hanya untuk penetrasi logam berat, tetapi juga untuk perbanyak patogen sehingga melindungi akar dari infeksi jamur dan nematoda patogen, serta meningkatkan aktivitas mikro bial di rizosfer.

BAB 9

APLIKASI FMA

PADA HIJAUAN MAKANAN TERNAK

Fungi mikoriza arbuskula memudahkan sekaligus melancarkan siklus nitrogen (N) dan fosfor (P) (Sepehri *et al.*, 2020). Jaringan miselium luas yang diproduksi oleh fungi mikoriza arbuskula mampu menjelajahi volume tanah yang lebih besar dibandingkan akar. Oleh sebab itu, simbiosis antara akar dengan mikoriza ternyata mampu meningkatkan efisiensi perolehan nutrisi (Efthymiou *et al.*, 2018).

Fungi mikoriza arbuskula juga mendorong pertumbuhan tanaman melalui mekanisme pengurangan berbagai tekanan lingkungan yang ekstrim, seperti keracunan logam berat, kekeringan, salinitas dan pemadatan tanah (F. Wang, 2017). Aplikasi fungi mikoriza arbuskula pada tanaman *Giant napier* dan *Hybrid napier* menunjukkan tanaman memiliki berat segar, berat kering, kandungan klorofil, serapan nitrogen, serta fosfor yang lebih tinggi dibandingkan tanpa inokulasi fungi mikoriza arbuskula Chahar (2014).

Aplikasi fungi mikoriza arbuskula pada rumput benggala juga dinilai mampu mengurangi penggunaan pupuk anorganik. Kajian empiris dan riset ilmiah Putra (2021) menunjukkan, bahwa penggunaan fungi mikoriza arbuskula sebanyak 5 gram per *polybag*, memberikan hasil pertumbuhan akar yang sama baiknya dengan tanaman yang diberikan pupuk NPK maupun tidak diberikan. Hal ini terjadi karena peran aktif fungi mikoriza arbuskula dalam optimalisasi penggunaan hara di dalam tanah. Fitrianto *et al.* (2014) juga menambahkan, bahwa pemberian fungi mikoriza arbuskula membantu proses penguraian unsur P yang terserap di dalam koloid tanah. Semakin banyak mikoriza yang tersedia di dalam media

tanam, maka sejalan dengan manfaat besar diperoleh bagi tanaman. Sebaliknya, semakin kecil jumlah mikoriza maka manfaat bagi tanaman juga relatif semakin kecil.

Tanaman yang diinokulasi dengan mikoriza arbuskula juga mampu beradaptasi pada lahan tercemar karena peran miselium ekstradikal (Ambrosini *et al.*, 2015). Mikoriza arbuskula mampu melumpuhkan uranium (U) dalam tanah melalui penyerapan dan pembentukan ikatan kompleks glikoprotein mikoriza arbuskula dan polifosfat intraseluler. Meskipun mikoriza dapat mentransfer uranium menuju inangnya, sebagian besar akan tetap berada pada miselium intradikal mikoriza sehingga hal ini membatasi translokasi uranium menuju tunas (Dupré de Boulois *et al.*, 2008).

Sara Adrián López De Andrade *et al.* (2008) mencoba mengamati tanaman bunga matahari yang diinokulasi dengan mikoriza arbuskula pada lahan dengan kondisi jumlah Cu di dalam tanah antara 50 dan 100 mg⁻¹. Hasil riset tersebut menunjukkan, bahwa sebagian besar Cu ternyata terakumulasi pada akar dan tidak ditransfer menuju tunas. Mikoriza arbuskula juga mampu meningkatkan penyerapan P untuk dibentuk senyawa metalfosfat yang kurang bergerak pada tanaman, sehingga mengurangi translokasi elemen berbahaya dari akar menuju tunas tanaman. Berdasarkan kajian empiris dan riset ilmiah Ambrosini *et al.* (2015), mikoriza arbuskula mampu mengakumulasi Cu pada akar tanaman.

Jumlah kandungan Cd tanah juga menentukan kinerja mikoriza arbuskula. Mikoriza arbuskula mampu meningkatkan atau menurunkan serapan Cd pada tunas tanaman, mengatur akumulasi Cd dalam jaringan tanaman. Aplikasi mikoriza arbuskula pada tanaman sorgum yang ditanam pada lahan yang terkontaminasi Cd menunjukkan, bahwa mikoriza ternyata berperan sebagai kunci dalam mengatur translokasi Cd di rhizobox dan konsentrasi pada jaringan tanaman dalam jumlah yang tepat. Logam Cd sebagian besar disimpan pada akar tanaman, hifa jamur, dan miselium, serta efek toksik menuju tanaman dapat dicegah (Brundrett & Tedersoo, 2020).

DAFTAR PUSTAKA

- Abd Allah, E. F., Hashem, A., Alqarawi, A. A., Bahkali, A. H., & Alwhibi, M. S. (2015). Enhancing growth performance and systemic acquired resistance of medicinal plant *Sesbania sesban* (L.) Merr using arbuscular mycorrhizal fungi under salt stress. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 22(3), 274–283. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2015.03.004>
- Abdelhameed, R. E., & Metwally, R. A. (2019). Alleviation of cadmium stress by arbuscular mycorrhizal symbiosis. *International Journal of Phytoremediation*, 21(7). <https://doi.org/10.1080/15226514.2018.1556584>
- Abhilash, P. C., Powell, J. R., Singh, H. B., & Singh, B. K. (2012). Plant-microbe interactions: Novel applications for exploitation in multipurpose remediation technologies. In *Trends in Biotechnology* (Vol. 30, Issue 8). <https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2012.04.004>
- Alam, M. Z., Anamul Hoque, M., Ahammed, G. J., & Carpenter-Boggs, L. (2019). Arbuscular mycorrhizal fungi reduce arsenic uptake and improve plant growth in *Lens culinaris*. *PLoS ONE*, 14(5). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0211441>
- Alford, É. R., Pilon-Smits, E. A. H., & Paschke, M. W. (2010). Metallophytes-a view from the rhizosphere. In *Plant and Soil* (Vol. 337, Issue 1). <https://doi.org/10.1007/s11104-010-0482-3>
- Ali, H., & Khan, E. (2018). What are heavy metals? Long-standing controversy over the scientific use of the term ‘heavy metals’—proposal of a comprehensive definition. In *Toxicological and Environmental Chemistry* (Vol. 100, Issue 1). <https://doi.org/10.1080/02772248.2017.1413652>
- Ali, H., Khan, E., & Sajad, M. A. (2013). Phytoremediation of heavy metals- Concepts and applications. In *Chemosphere* (Vol. 91, Issue 7). <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2013.01.075>

- Ali, H., Naseer, M., & Sajad, M. A. (2012). Phytoremediation of heavy metals by *Trifolium alexandrinum*. *Agris On-Line Papers in Economics and Informatics*, 2(3). <https://doi.org/10.6088/ijes.002020300031>
- Al-Khafaji, M. S., Al-Ani, F. H., & Ibrahim, A. F. (2018). Removal of Some Heavy Metals from Industrial Wastewater by *Lemna Minor*. *KSCCE Journal of Civil Engineering*, 22(4). <https://doi.org/10.1007/s12205-017-1112-x>
- Alkorta, I., Hernández-Allica, J., Becerril, J. M., Amezaga, I., Albizu, I., & Garbisu, C. (2004). Recent findings on the phytoremediation of soils contaminated with environmentally toxic heavy metals and metalloids such as zinc, cadmium, lead, and arsenic. In *Reviews in Environmental Science and Biotechnology* (Vol. 3, Issue 1). <https://doi.org/10.1023/B:RESB.0000040059.70899.3d>
- Ambrosini, V. G., Voges, J. G., Canton, L., Couto, R. da R., Ferreira, P. A. A., Comin, J. J., de Melo, G. W. B., Brunetto, G., & Soares, C. R. F. S. (2015). Effect of arbuscular mycorrhizal fungi on young vines in copper-contaminated soil. *Brazilian Journal of Microbiology*, 46(4). <https://doi.org/10.1590/S1517-838246420140622>
- Andrade, S. A.L., Silveira, A. P. D., & Mazzafera, P. (2010). Arbuscular mycorrhiza alters metal uptake and the physiological response of *Coffea arabica* seedlings to increasing Zn and Cu concentrations in soil. *Science of the Total Environment*, 408(22). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2010.07.064>
- Arriagada, C. A., Herrera, M. A., & Ocampo, J. A. (2007). Beneficial effect of saprobe and arbuscular mycorrhizal fungi on growth of *Eucalyptus globulus* co-cultured with *Glycine max* in soil contaminated with heavy metals. *Journal of Environmental Management*, 84(1). <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2006.05.005>
- Arriagada, C., Aranda, E., Sampedro, I., Garcia-Romera, I., & Ocampo, J. A. (2009). Contribution of the saprobic fungi *Trametes versicolor* and *Trichoderma harzianum* and the arbuscular mycorrhizal fungi

- Glomus deserticola* and *G. claroideum* to arsenic tolerance of *Eucalyptus globulus*. *Bioresource Technology*, 100(24). <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.07.010>
- Arriagada, C., Pereira, G., García-Romera, I., & Ocampo, J. A. (2010). Improved zinc tolerance in *Eucalyptus globulus* inoculated with *Glomus deserticola* and *Trametes versicolor* or *Coriolopsis rigida*. *Soil Biology and Biochemistry*, 42(1). <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2009.10.011>
- Arshadi, M., Abdolmaleki, M. K., Mousavinia, F., Foroughifard, S., & Karimzadeh, A. (2017). Nano modification of NZVI with an aquatic plant *Azolla filiculoides* to remove Pb(II) and Hg(II) from water: Aging time and mechanism study. *Journal of Colloid and Interface Science*, 486. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2016.10.002>
- Asghari, H. R., & Cavagnaro, T. R. (2011). Arbuscular mycorrhizas enhance plant interception of leached nutrients. *Functional Plant Biology*, 38(3), 219–226. <https://doi.org/10.1071/FP10180>
- Azcón, R., Perálvarez, M. del C., Biró, B., Roldán, A., & Ruíz-Lozano, J. M. (2009). Antioxidant activities and metal acquisition in mycorrhizal plants growing in a heavy-metal multicontaminated soil amended with treated lignocellulosic agrowaste. *Applied Soil Ecology*, 41(2). <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2008.10.008>
- Babadi, M., Zalaghi, R., & Taghavi, M. (2019). A non-toxic polymer enhances sorghum-mycorrhiza symbiosis for bioremediation of Cd. *Mycorrhiza*, 29(4). <https://doi.org/10.1007/s00572-019-00902-5>
- Bae, Y. Y., Choi, Y. M., Kim, M. J., Kim, K. H., Kim, B. C., & Rhee, M. S. (2011). Application of supercritical carbon dioxide for microorganism reductions in fresh pork. *Journal of Food Safety*, 31(4). <https://doi.org/10.1111/j.1745-4565.2011.00328.x>
- Baghaie, A. H., Aghili, F., & Jafarinia, R. (2019). Soil-indigenous arbuscular mycorrhizal fungi and zeolite addition to soil synergistically increase grain yield and reduce cadmium uptake of bread wheat (through improved nitrogen and phosphorus nutrition and

- immobilization of Cd in roots). *Environmental Science and Pollution Research*, 26(30). <https://doi.org/10.1007/s11356-019-06237-0>
- Bai, J., Lin, X., Yin, R., Zhang, H., Junhua, W., Xueming, C., & Yongming, L. (2008). The influence of arbuscular mycorrhizal fungi on As and P uptake by maize (*Zea mays* L.) from As-contaminated soils. *Applied Soil Ecology*, 38(2). <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2007.10.002>
- Ballantyne, K. N., Van Oorschot, R. A. H., Mitchell, R. J., Bandelt, H. J., Salas, A., Barbaro, a., Staiti, N., Cormaci, P., Saravo, L., Belardinilli, F., Capalbo, C., Buffone, A., Petroni, M., Colicchia, V., Ferraro, S., Zani, M., Nicolussi, A., D’Inzeo, S., Coppa, A., ... Kayser, M. (2015). The HlrPlex system for simultaneous prediction of hair and eye color from DNA. *Forensic Science International: Genetics*.
- Balergue, C., Puech-Pags, V., Bécard, G., & Rochange, S. F. (2011). The regulation of arbuscular mycorrhizal symbiosis by phosphate in pea involves early and systemic signalling events. *Journal of Experimental Botany*, 62(3), 1049–1060. <https://doi.org/10.1093/jxb/erq335>
- Baum, C., El-Tohamy, W., & Gruda, N. (2015). Increasing the productivity and product quality of vegetable crops using arbuscular mycorrhizal fungi: A review. *Scientia Horticulturae*, 187, 131–141. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2015.03.002>
- Beauregard, M. S., Hamel, C., Atul-Nayyar, & St-Arnaud, M. (2010). Long-term phosphorus fertilization impacts soil fungal and bacterial diversity but not AM fungal community in alfalfa. *Microbial Ecology*, 59, 379–389. <https://doi.org/10.1007/s00248-009-9583-z>
- Bernardini, A., Salvatori, E., Guerrini, V., Fusaro, L., Canepari, S., & Manes, F. (2016). Effects of high Zn and Pb concentrations on *Phragmites australis* (Cav.) Trin. Ex. Steudel: Photosynthetic performance and metal accumulation capacity under controlled conditions. *International Journal of Phytoremediation*, 18(1).

- <https://doi.org/10.1080/15226514.2015.1058327>
- Bhargava, A., Carmona, F. F., Bhargava, M., & Srivastava, S. (2012). Approaches for enhanced phytoextraction of heavy metals. In *Journal of Environmental Management* (Vol. 105). <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2012.04.002>
- Bi, Y., Zhang, J., Song, Z., Wang, Z., Qiu, L., Hu, J., & Gong, Y. (2019). Arbuscular mycorrhizal fungi alleviate root damage stress induced by simulated coal mining subsidence ground fissures. *Science of the Total Environment*, 652. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.10.249>
- Blaudez, D., Jacob, C., Turnau, K., Colpaert, J. V., Ahonen-Jonnarth, U., Finlay, R., Botton, B., & Chalot, M. (2000). Differential responses of ectomycorrhizal fungi to heavy metals in Vitro. *Mycological Research*, 104(11). <https://doi.org/10.1017/S0953756200003166>
- Bonfante, P., & Genre, A. (2010). Mechanisms underlying beneficial plant - Fungus interactions in mycorrhizal symbiosis. In *Nature Communications* (Vol. 1, Issue 4). <https://doi.org/10.1038/ncomms1046>
- Brundrett, M. C., & Tedersoo, L. (2018). Evolutionary history of mycorrhizal symbioses and global host plant diversity. In *New Phytologist* (Vol. 220, Issue 4). <https://doi.org/10.1111/nph.14976>
- Brundrett, M. C., & Tedersoo, L. (2020). Resolving the mycorrhizal status of important northern hemisphere trees. In *Plant and Soil* (Vol. 454, Issues 1–2). <https://doi.org/10.1007/s11104-020-04627-9>
- Brunner, I., Herzog, C., Dawes, M. A., Arend, M., & Sperisen, C. (2015). How tree roots respond to drought. *Frontiers in Plant Science*, 6(JULY). <https://doi.org/10.3389/fpls.2015.00547>
- Bundschuh, J., Maity, J. P., Nath, B., Baba, A., Gunduz, O., Kulp, T. R., Jean, J. S., Kar, S., Yang, H. J., Tseng, Y. J., Bhattacharya, P., & Chen, C. Y. (2013). Naturally occurring arsenic in terrestrial geothermal systems of western Anatolia, Turkey: Potential role in contamination of freshwater resources. *Journal of Hazardous Materials*, 262. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2013.01.039>

- Camenzind, T., Homeier, J., Dietrich, K., Hempel, S., Hertel, D., Krohn, A., Leuschner, C., Oelmann, Y., Olsson, P. A., Suárez, J. P., & Rillig, M. C. (2016). Opposing effects of nitrogen versus phosphorus additions on mycorrhizal fungal abundance along an elevational gradient in tropical montane forests. *Soil Biology and Biochemistry*, *94*. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2015.11.011>
- Castillo, O. S., Dasgupta-Schubert, N., Alvarado, C. J., Zaragoza, E. M., & Villegas, H. J. (2011). The effect of the symbiosis between *Tagetes erecta* L. (marigold) and *Glomus intraradices* in the uptake of Copper(II) and its implications for phytoremediation. *New Biotechnology*, *29*(1). <https://doi.org/10.1016/j.nbt.2011.05.009>
- Cavagnaro, T. R. (2014). Impacts of compost application on the formation and functioning of arbuscular mycorrhizas. *Soil Biology and Biochemistry*, *78*, 38–44. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2014.07.007>
- Cavagnaro, T. R., Bender, S. F., Asghari, H. R., & Van Der Heijden, M. G. A. (2015). The role of arbuscular mycorrhizas in reducing soil nutrient loss. *Plant Science*, *20*(5), 283–290. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2015.03.004>
- Cempel, M., & Nikel, G. (2006). Nickel: A review of its sources and environmental toxicology. In *Polish Journal of Environmental Studies* (Vol. 15, Issue 3).
- Chang, Q., Diao, F. wei, Wang, Q. fan, Pan, L., Dang, Z. hua, & Guo, W. (2018). Effects of arbuscular mycorrhizal symbiosis on growth, nutrient and metal uptake by maize seedlings (*Zea mays* L.) grown in soils spiked with Lanthanum and Cadmium. *Environmental Pollution*, *241*. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.06.003>
- Chen, B., Nayuki, K., Kuga, Y., Zhang, X., Wu, S., & Ohtomo, R. (2018). Uptake and intraradical immobilization of cadmium by arbuscular mycorrhizal fungi as revealed by a stable isotope tracer and synchrotron radiation μ x-ray fluorescence analysis. *Microbes and Environments*, *33*(3). <https://doi.org/10.1264/jsme2.ME18010>
- Chen, B., Roos, P., Borggaard, O. K., Zhu, Y. G., & Jakobsen, I. (2005).

- Mycorrhiza and root hairs in barley enhance acquisition of phosphorus and uranium from phosphate rock but mycorrhiza decreases root to shoot uranium transfer. *New Phytologist*, 165(2). <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2004.01244.x>
- Chen, H., Yang, X., Wang, P., Wang, Z., Li, M., & Zhao, F. J. (2018). Dietary cadmium intake from rice and vegetables and potential health risk: A case study in Xiangtan, southern China. *Science of the Total Environment*, 639. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.05.050>
- Chen, J., & Yang, Z. M. (2012). Mercury toxicity, molecular response and tolerance in higher plants. In *BioMetals* (Vol. 25, Issue 5). <https://doi.org/10.1007/s10534-012-9560-8>
- Chen, S., Zhang, S., Yan, Z., Peng, Y., & Chen, Q. (2019). Differences in main processes to transform phosphorus influenced by ammonium nitrogen in flooded intensive agricultural and steppe soils. *Chemosphere*, 226. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.03.123>
- Chen, W., Zheng, R., Baade, P. D., Zhang, S., Zeng, H., Bray, F., Jemal, A., Yu, X. Q., & He, J. (2016). Cancer statistics in China, 2015. *CA: A Cancer Journal for Clinicians*, 66(2). <https://doi.org/10.3322/caac.21338>
- Chen, X., Wu, C., Tang, J., & Hu, S. (2005). Arbuscular mycorrhizae enhance metal lead uptake and growth of host plants under a sand culture experiment. *Chemosphere*, 60(5). <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2005.01.029>
- Chern, E. C., Tsai, D. W., & Ogunseitan, O. A. (2007). Deposition of glomalin-related soil protein and sequestered toxic metals into watersheds. *Environmental Science and Technology*, 41(10). <https://doi.org/10.1021/es0628598>
- Choi, Y., & Song, J. (2016). Sustainable development of abandoned mine areas using renewable energy systems: A case study of the photovoltaic potential assessment at the tailings dam of abandoned Sangdong mine, Korea. In *Sustainability (Switzerland)*

- (Vol. 8, Issue 12). <https://doi.org/10.3390/su8121320>
- Chu, Q., Sha, Z., Osaki, M., & Watanabe, T. (2017). Contrasting Effects of Cattle Manure Applications and Root-Induced Changes on Heavy Metal Dynamics in the Rhizosphere of Soybean in an Acidic Haplic Fluvisol: A Chronological Pot Experiment. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 65(15). <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.6b05813>
- Citterio, S., Prato, N., Fumagalli, P., Aina, R., Massa, N., Santagostino, A., Sgorbati, S., & Berta, G. (2005). The arbuscular mycorrhizal fungus *Glomus mosseae* induces growth and metal accumulation changes in *Cannabis sativa* L. *Chemosphere*, 59(1). <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2004.10.009>
- Clemens, S. (2001). Developing tools for phytoremediation: Towards a molecular understanding of plant metal tolerance and accumulation. *International Journal of Occupational Medicine and Environmental Health*, 14(3).
- Colpaert, J. V., Vandenkoornhuysen, P., Adriaensen, K., & Vangronsveld, J. (2000). Genetic variation and heavy metal tolerance in the ectomycorrhizal basidiomycete *Suillus luteus*. *New Phytologist*, 147(2). <https://doi.org/10.1046/j.1469-8137.2000.00694.x>
- Colpaert, J. V., Wevers, J. H. L., Krznanic, E., & Adriaensen, K. (2011). How metal-tolerant ecotypes of ectomycorrhizal fungi protect plants from heavy metal pollution. *Annals of Forest Science*, 68(1). <https://doi.org/10.1007/s13595-010-0003-9>
- Corrêa, a., Cruz, C., & Ferrol, N. (2015). Nitrogen and carbon/nitrogen dynamics in arbuscular mycorrhiza: the great unknown. In *Mycorrhiza*. <https://doi.org/10.1007/s00572-015-0627-6>
- Courtney, R., Mullen, G., & Harrington, T. (2009). An evaluation of revegetation success on bauxite residue. *Restoration Ecology*, 17(3). <https://doi.org/10.1111/j.1526-100X.2008.00375.x>
- Cozzolino, V., Pigna, M., Di Meo, V., Caporale, A. G., & Violante, A. (2010). Effects of arbuscular mycorrhizal inoculation and phosphorus supply on the growth of *Lactuca sativa* L. and arsenic and

- phosphorus availability in an arsenic polluted soil under non-sterile conditions. *Applied Soil Ecology*, 45(3), 262–268. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2010.05.001>
- Dabonne, S., Koffi, B. P., Kouadio, E. J., Koffi, A. G., Due, E. A., & Kouame, L. P. (2010). Traditional Utensils : Potential Sources of Poisoning by Heavy Metals Traditional Utensils : Potential Sources of Poisoning by Heavy Metals. *British Journal of Pharmacology and Toxicology*.
- De Andrade, Sara Adrián López, Da Silveira, A. P. D., Jorge, R. A., & De Abreu, M. F. (2008). Cadmium accumulation in sunflower plants influenced by arbuscular mycorrhiza. *International Journal of Phytoremediation*, 10(1). <https://doi.org/10.1080/15226510701827002>
- de Fátima Pedroso, D., Barbosa, M. V., dos Santos, J. V., Pinto, F. A., Siqueira, J. O., & Carneiro, M. A. C. (2018). Arbuscular Mycorrhizal Fungi Favor the Initial Growth of *Acacia mangium*, *Sorghum bicolor*, and *Urochloa brizantha* in Soil Contaminated with Zn, Cu, Pb, and Cd. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 101(3). <https://doi.org/10.1007/s00128-018-2405-6>
- Debeljak, M., van Elteren, J. T., Špruk, A., Izmer, A., Vanhaecke, F., & Vogel-Mikuš, K. (2018). The role of arbuscular mycorrhiza in mercury and mineral nutrient uptake in maize. *Chemosphere*, 212. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.08.147>
- Declerck, S., De Boulois, H. D., Bivort, C., & Delvaux, B. (2003). Extraradical mycelium of the arbuscular mycorrhizal fungus *Glomus lamellosum* can take up, accumulate and translocate radiocaesium under root-organ culture conditions. *Environmental Microbiology*, 5(6). <https://doi.org/10.1046/j.1462-2920.2003.00445.x>
- Devi, P., & Kumar, P. (2020). Concept and Application of Phytoremediation in the Fight of Heavy Metal Toxicity. *J. Pharm. Sci. & Res.*, 12(6).
- Devi, T. S., Gupta, S., & Kapoor, R. (2019). Arbuscular mycorrhizal fungi in

- alleviation of cold stress in plants. In *Advancing Frontiers in Mycology and Mycotechnology: Basic and Applied Aspects of Fungi*. https://doi.org/10.1007/978-981-13-9349-5_17
- Dhalaria, R., Kumar, D., Kumar, H., Nepovimova, E., Kuca, K., Islam, M. T., & Verma, R. (2020). Arbuscular mycorrhizal fungi as potential agents in ameliorating heavy metal stress in plants. In *Agronomy* (Vol. 10, Issue 6). <https://doi.org/10.3390/agronomy10060815>
- Dietz, K.-J., Baier, M., & Krämer, U. (1999). Free Radicals and Reactive Oxygen Species as Mediators of Heavy Metal Toxicity in Plants. In *Heavy Metal Stress in Plants*. https://doi.org/10.1007/978-3-662-07745-0_4
- Dogan, M., Karatas, M., & Aasim, M. (2018). Cadmium and lead bioaccumulation potentials of an aquatic macrophyte *Ceratophyllum demersum* L.: A laboratory study. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 148. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2017.10.058>
- Dupré de Boulois, H., Joner, E. J., Leyval, C., Jakobsen, I., Chen, B. D., Roos, P., Thiry, Y., Rufyikiri, G., Delvaux, B., & Declerck, S. (2008). Impact of arbuscular mycorrhizal fungi on uranium accumulation by plants. *Journal of Environmental Radioactivity*, 99(5). <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2007.10.009>
- Efthymiou, A., Jensen, B., & Jakobsen, I. (2018). The roles of mycorrhiza and *Penicillium* inoculants in phosphorus uptake by biochar-amended wheat. *Soil Biology and Biochemistry*, 127. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2018.09.027>
- Fashola, M. O., Ngole-Jeme, V. M., & Babalola, O. O. (2016). Heavy metal pollution from gold mines: Environmental effects and bacterial strategies for resistance. In *International Journal of Environmental Research and Public Health* (Vol. 13, Issue 11). <https://doi.org/10.3390/ijerph13111047>
- Feddermann, N., Finlay, R., Boller, T., & Elfstrand, M. (2010). Functional diversity in arbuscular mycorrhiza - the role of gene expression, phosphorous nutrition and symbiotic efficiency. In *Fungal Ecology*

- (Vol. 3, Issue 1, pp. 1–8).
<https://doi.org/10.1016/j.funeco.2009.07.003>
- Finlay, R. D. (2008). Ecological aspects of mycorrhizal symbiosis: With special emphasis on the functional diversity of interactions involving the extraradical mycelium. *Journal of Experimental Botany*, 59(5). <https://doi.org/10.1093/jxb/ern059>
- Fitrianto, Hermanto, & Kriswanto, H. (2014). Studi Pemanfaatan Mikoriza Arbuskular dan Efisiensi Pupuk Phospat terhadap Pertumbuhan dan Produksi Tanaman Kacang Hijau (*Phaseolus radiatus* L) Pada Tanah PMK Study Utilization Efficiency arbuscular mycorrhiza and phosphate fertilizer on the Growth and. *Porsiding Seminar Nasional Lahan Suboptimal, September*, 1–9.
- Gao, W. Q., Wang, P., & Wu, Q. S. (2019). Functions and application of glomalin-related soil proteins: A review. In *Sains Malaysiana* (Vol. 48, Issue 1). <https://doi.org/10.17576/jsm-2019-4801-13>
- Garg, N., & Aggarwal, N. (2012). Effect of mycorrhizal inoculations on heavy metal uptake and stress alleviation of *Cajanus cajan* (L.) Millsp. genotypes grown in cadmium and lead contaminated soils. *Plant Growth Regulation*, 66(1). <https://doi.org/10.1007/s10725-011-9624-8>
- Genre, A., Ortu, G., Bertoldo, C., Martino, E., & Bonfante, P. (2009). Biotic and abiotic stimulation of root epidermal cells reveals common and specific responses to arbuscular mycorrhizal fungi. *Plant Physiology*, 149(3). <https://doi.org/10.1104/pp.108.132225>
- Ghasemi Siani, N., Fallah, S., Pokhrel, L. R., & Rostamnejadi, A. (2017). Natural amelioration of Zinc oxide nanoparticle toxicity in fenugreek (*Trigonella foenum-gracum*) by arbuscular mycorrhizal (*Glomus intraradices*) secretion of glomalin. *Plant Physiology and Biochemistry*, 112. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2017.01.001>
- Ghosh, M., & Singh, S. P. (2005). Asian Journal on Energy and Environment A Review on Phytoremediation of Heavy Metals and Utilization of It's by Products. *As. J. Energy Env*, 6(604).

- Gonzalez-Chavez, C., Harris, P. J., Dodd, J., & Meharg, A. A. (2002). Arbuscular mycorrhizal fungi confer enhanced arsenate resistance on *Holcus lanatus*. *New Phytologist*, 155(1). <https://doi.org/10.1046/j.1469-8137.2002.00430.x>
- González-Chávez, M. C., Carrillo-González, R., Wright, S. F., & Nichols, K. A. (2004). The role of glomalalin, a protein produced by arbuscular mycorrhizal fungi, in sequestering potentially toxic elements. *Environmental Pollution*, 130(3). <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2004.01.004>
- González-Guerrero, M., Melville, L. H., Ferrol, N., Lott, J. N. A., Azcón-Aguilar, C., & Peterson, R. L. (2008). Ultrastructural localization of heavy metals in the extraradical mycelium and spores of the arbuscular mycorrhizal fungus *Glomus intraradices*. *Canadian Journal of Microbiology*, 54(2). <https://doi.org/10.1139/W07-119>
- Gu, H. H., Zhou, Z., Gao, Y. Q., Yuan, X. T., Ai, Y. J., Zhang, J. Y., Zuo, W. Z., Taylor, A. A., Nan, S. Q., & Li, F. P. (2017). The influences of arbuscular mycorrhizal fungus on phytostabilization of lead/zinc tailings using four plant species. *International Journal of Phytoremediation*, 19(8). <https://doi.org/10.1080/15226514.2017.1284751>
- Guerin, T. F., Horner, S., McGovern, T., & Davey, B. (2002). An application of permeable reactive barrier technology to petroleum hydrocarbon contaminated groundwater. *Water Research*, 36(1). [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(01\)00233-0](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(01)00233-0)
- Gupta, M. M., & Abbott, L. K. (2021). Exploring economic assessment of the arbuscular mycorrhizal symbiosis. In *Symbiosis* (Vol. 83, Issue 2). <https://doi.org/10.1007/s13199-020-00738-0>
- Gupta, Manju M., Aggarwal, A., & Asha. (2018). *From Mycorrhizosphere to Rhizosphere Microbiome: The Paradigm Shift*. https://doi.org/10.1007/978-3-319-75910-4_20
- Hancock, L. M. S., Ernst, C. L., Charneskie, R., & Ruane, L. G. (2012). Effects of cadmium and mycorrhizal fungi on growth, fitness, and cadmium accumulation in flax (*Linum usitatissimum*; Linaceae).

- American Journal of Botany*, 99(9), 1445–1452.
<https://doi.org/10.3732/ajb.1100497>
- Harms, H., Schlosser, D., & Wick, L. Y. (2011). Untapped potential: Exploiting fungi in bioremediation of hazardous chemicals. In *Nature Reviews Microbiology* (Vol. 9, Issue 3).
<https://doi.org/10.1038/nrmicro2519>
- Harrison, M. J. (2005). Signaling in the arbuscular mycorrhizal symbiosis. *Annual Review of Microbiology*, 59, 19–42.
<https://doi.org/10.1146/annurev.micro.58.030603.123749>
- Hashem, A., Abd-Allah, E. F., Alqarawi, A. A., & Egamberdieva, D. (2016). Bioremediation of adverse impact of cadmium toxicity on *Cassia italica* Mill by arbuscular mycorrhizal fungi. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 23(1).
<https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2015.11.007>
- Hauptvogel, M., Kotrla, M., Prčík, M., Pauková, Ž., Kováčik, M., & Lošák, T. (2020). Phytoremediation potential of fast-growing energy plants: Challenges and perspectives – A review. In *Polish Journal of Environmental Studies* (Vol. 29, Issue 1).
<https://doi.org/10.15244/pjoes/101621>
- He, M., Ke, C. H., & Wang, W. X. (2010). Effects of cooking and subcellular distribution on the bioaccessibility of trace elements in two marine fish species. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 58(6). <https://doi.org/10.1021/jf100227n>
- Helber, N., Wippel, K., Sauer, N., Schaarschmidt, S., Hause, B., & Requena, N. (2011). A Versatile Monosaccharide Transporter That Operates in the Arbuscular Mycorrhizal Fungus *Glomus* sp Is Crucial for the Symbiotic Relationship with Plants. In *The Plant Cell* (Vol. 23, Issue 10, pp. 3812–3823). <https://doi.org/10.1105/tpc.111.089813>
- Ho Man, L., Wang, Z. W., Ye, Z. H., Yung, K. L., Peng, X. L., & Cheung, K. C. (2013). Interactions between arbuscular mycorrhizae and plants in phytoremediation of metal-contaminated soils: A review. *Pedosphere*, 23(5). [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(13\)60049-1](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(13)60049-1)

- Holford, I. C. R. (1997). Soil phosphorus: Its measurement, and its uptake by plants. *Australian Journal of Soil Research*, 35(2). <https://doi.org/10.1071/S96047>
- Hu, Z. H., Zhuo, F., Jing, S. H., Li, X., Yan, T. X., Lei, L. L., Lu, R. R., Zhang, X. F., & Jing, Y. X. (2019). Combined application of arbuscular mycorrhizal fungi and steel slag improves plant growth and reduces Cd, Pb accumulation in *Zea mays*. *International Journal of Phytoremediation*, 21(9). <https://doi.org/10.1080/15226514.2019.1577355>
- Huang, L., Zhang, H., Song, Y., Yang, Y., Chen, H., & Tang, M. (2017). Subcellular compartmentalization and chemical forms of lead participate in lead tolerance of *Robinia pseudoacacia* L. with *Funneliformis mosseae*. *Frontiers in Plant Science*, 8. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.00517>
- Jabeen, R., Ahmad, A., & Iqbal, M. (2009). Phytoremediation of heavy metals: Physiological and molecular mechanisms. *Botanical Review*, 75(4). <https://doi.org/10.1007/s12229-009-9036-x>
- Jaelani, L. M., Nurgiantoro, & Putri, R. A. (2018). Analysis of land cover change due to gold mining in Bombana using Sentinel 1A radar data. *International Journal of Geoinformatics*, 14(2).
- Jamal, A., Ayub, N., Usman, M., & Khan, A. G. (2002). Arbuscular mycorrhizal fungi enhance zinc and nickel uptake from contaminated soil by soybean and lentil. *International Journal of Phytoremediation*, 4(3). <https://doi.org/10.1080/15226510208500083>
- Janeeshma, E., & Puthur, J. T. (2020). Direct and indirect influence of arbuscular mycorrhizae on enhancing metal tolerance of plants. In *Archives of Microbiology* (Vol. 202, Issue 1). <https://doi.org/10.1007/s00203-019-01730-z>
- Janoušková, M., Pavlíková, D., & Vosátka, M. (2006). Potential contribution of arbuscular mycorrhiza to cadmium immobilisation in soil. *Chemosphere*, 65(11). <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2006.07.007>

- Janoušková, M., Pavlíková, D., Macek, T., & Vosátka, M. (2005). Influence of arbuscular mycorrhiza on the growth and cadmium uptake of tobacco with inserted metallothionein gene. *Applied Soil Ecology*, 29(3). <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2004.12.006>
- Javot, H., Pumplín, N., & Harrison, M. J. (2007). Phosphate in the arbuscular mycorrhizal symbiosis: transport properties and regulatory roles. *Plant, Cell & Environment*, 30(3), 310–322. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3040.2006.01617.x>
- Jayne, B., & Quigley, M. (2014). Influence of arbuscular mycorrhiza on growth and reproductive response of plants under water deficit: a meta-analysis. *Mycorrhiza*, 24, 109–119.
- Jiang, Q. Y., Zhuo, F., Long, S. H., Zhao, H. Di, Yang, D. J., Ye, Z. H., Li, S. S., & Jing, Y. X. (2016). Can arbuscular mycorrhizal fungi reduce Cd uptake and alleviate Cd toxicity of *Lonicera japonica* grown in Cd-added soils? *Scientific Reports*, 6. <https://doi.org/10.1038/srep21805>
- Joner, E. J., Roos, P., Jansa, J., Frossard, E., Leyval, C., & Jakobsen, I. (2004). No significant contribution of arbuscular mycorrhizal fungi to transfer of radiocesium from soil to plants. *Applied and Environmental Microbiology*, 70(11). <https://doi.org/10.1128/AEM.70.11.6512-6517.2004>
- Joutey, N. T., Sayel, H., Bahafid, W., & Ghachtouli, N. El. (2015). Mechanisms of hexavalent chromium resistance and removal by microorganisms. *Reviews of Environmental Contamination and Toxicology*, 233. https://doi.org/10.1007/978-3-319-10479-9_2
- Kamran, M., Parveen, A., Ahmar, S., Malik, Z., Hussain, S., Chattha, M. S., Saleem, M. H., Adil, M., Heidari, P., & Chen, J. T. (2020). An overview of hazardous impacts of soil salinity in crops, tolerance mechanisms, and amelioration through selenium supplementation. In *International Journal of Molecular Sciences* (Vol. 21, Issue 1). <https://doi.org/10.3390/ijms21010148>
- Kelly, C. N., Morton, J. B., & Cumming, J. R. (2005). Variation in aluminum resistance among arbuscular mycorrhizal fungi. *Mycorrhiza*, 15(3).

- <https://doi.org/10.1007/s00572-004-0321-6>
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2016.11.021>
- Khan, S., Hesham, A. E. L., Qiao, M., Rehman, S., & He, J. Z. (2010). Effects of Cd and Pb on soil microbial community structure and activities. *Environmental Science and Pollution Research*, 17(2). <https://doi.org/10.1007/s11356-009-0134-4>
- Kiers, E. T., Duhamel, M., Beesetty, Y., Mensah, J. A., Franken, O., Verbruggen, E., Fellbaum, C. R., Kowalchuk, G. A., Hart, M. M., Bago, A., Palmer, T. M., West, S. A., Vandenkoornhuyse, P., Jansa, J., & Bücking, H. (2011). Reciprocal rewards stabilize cooperation in the mycorrhizal symbiosis. *Science (New York, N.Y.)*, 333(6044), 880–882. <https://doi.org/10.1126/science.1208473>
- Kim, R. Y., Yoon, J. K., Kim, T. S., Yang, J. E., Owens, G., & Kim, K. R. (2015). Bioavailability of heavy metals in soils: definitions and practical implementation—a critical review. *Environmental Geochemistry and Health*, 37(6). <https://doi.org/10.1007/s10653-015-9695-y>
- Kim, S., Lim, H., & Lee, I. (2010). Enhanced heavy metal phytoextraction by *Echinochloa crus-galli* using root exudates. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 109(1). <https://doi.org/10.1016/j.jbiosc.2009.06.018>
- Klironomos, J. J. (2000). Host-specificity and functional diversity among arbuscular mycorrhizal fungi. *Microbial Biosystems: New Frontiers*.
- Kodre, A., Arčon, I., Debeljak, M., Potisek, M., Likar, M., & Vogel-Mikuš, K. (2017). Arbuscular mycorrhizal fungi alter Hg root uptake and ligand environment as studied by X-ray absorption fine structure. *Environmental and Experimental Botany*, 133. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2016.09.006>
- Kosuta, S., & Hamel, C. (2000). The fate and mobility of copper from chemical root control barriers in soil and leachate. *Environmental*

- Pollution*, 110(1). [https://doi.org/10.1016/S0269-7491\(99\)00275-4](https://doi.org/10.1016/S0269-7491(99)00275-4)
- Kosuta, Sonja, Hamel, C., Dalpé, Y., & St-Arnaud, M. (2002). Copper Release from Chemical Root-Control Baskets in Hardwood Tree Production. *Journal of Environmental Quality*, 31(3). <https://doi.org/10.2134/jeq2002.9100>
- Krisnayanti, B. D., Anderson, C. W. N., Utomo, W. H., Feng, X., Handayanto, E., Mudarisna, N., Ikram, H., & Khususiah. (2012). Assessment of environmental mercury discharge at a four-year-old artisanal gold mining area on Lombok Island, Indonesia. *Journal of Environmental Monitoring*, 14(10). <https://doi.org/10.1039/c2em30515a>
- Krupa, P., & Piotrowska-Seget, Z. (2003). Positive aspects of interaction between plants and mycorrhizal fungi originating from soils polluted with cadmium. *Polish Journal of Environmental Studies*, 12(6).
- Krzyszowska, M. (2011). The cell wall in plant cell response to trace metals: Polysaccharide remodeling and its role in defense strategy. In *Acta Physiologiae Plantarum* (Vol. 33, Issue 1). <https://doi.org/10.1007/s11738-010-0581-z>
- Kumar Yadav, K., Gupta, N., Kumar, A., Reece, L. M., Singh, N., Rezanian, S., & Ahmad Khan, S. (2018). Mechanistic understanding and holistic approach of phytoremediation: A review on application and future prospects. In *Ecological Engineering* (Vol. 120). <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2018.05.039>
- Lax, P., Becerra, A. G., Soteras, F., Cabello, M., & Doucet, M. E. (2011). Effect of the arbuscular mycorrhizal fungus *Glomus intraradices* on the false root-knot nematode *Nacobbus aberrans* in tomato plants. *Biology and Fertility of Soils*, 47(5), 591–597. <https://doi.org/10.1007/s00374-010-0514-4>
- Lebeau, T., Braud, A., & Jézéquel, K. (2008). Performance of bioaugmentation-assisted phytoextraction applied to metal contaminated soils: A review. In *Environmental Pollution* (Vol.

- 153, Issue 3). <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2007.09.015>
- Leifheit, E. F., Veresoglou, S. D., Lehmann, A., Morris, E. K., & Rillig, M. C. (2013). Multiple factors influence the role of arbuscular mycorrhizal fungi in soil aggregation—a meta-analysis. *Plant and Soil*, 374(1–2), 523–537. <https://doi.org/10.1007/s11104-013-1899-2>
- Leung, H. M., Wu, F. Y., Cheung, K. C., Ye, Z. H., & Wong, M. H. (2010). Synergistic effects of arbuscular mycorrhizal fungi and phosphate rock on heavy metal uptake and accumulation by an arsenic hyperaccumulator. *Journal of Hazardous Materials*, 181(1–3). <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2010.05.042>
- Leung, H. M., Ye, Z. H., & Wong, M. H. (2006). Interactions of mycorrhizal fungi with *Pteris vittata* (As hyperaccumulator) in As-contaminated soils. *Environmental Pollution*, 139(1). <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2005.05.009>
- Leung, H. M., Ye, Z. H., & Wong, M. H. (2007). Survival strategies of plants associated with arbuscular mycorrhizal fungi on toxic mine tailings. *Chemosphere*, 66(5). <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2006.06.037>
- Leung, Ho Man, Wu, F. Y., Cheung, K. C., Ye, Z. H., & Wong, M. H. (2010). The effect of arbuscular mycorrhizal fungi and phosphate amendment on arsenic uptake, accumulation and growth of *pteris vittata* in as-contaminated soil. *International Journal of Phytoremediation*, 12(4). <https://doi.org/10.1080/15226510903051740>
- Leyval, C., Turnau, K., & Haselwandter, K. (1997). Effect of heavy metal pollution on mycorrhizal colonization and function: Physiological, ecological and applied aspects. *Mycorrhiza*, 7(3). <https://doi.org/10.1007/s005720050174>
- Li, J., Sun, Y., Jiang, X., Chen, B., & Zhang, X. (2018). Arbuscular mycorrhizal fungi alleviate arsenic toxicity to *Medicago sativa* by influencing arsenic speciation and partitioning. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 157.

- <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2018.03.073>
- Li, Y. M., Chaney, R., Brewer, E., Roseberg, R., Angle, J. S., Baker, A., Reeves, R., & Nelkin, J. (2003). Development of a technology for commercial phytoextraction of nickel: Economic and technical considerations. *Plant and Soil*, 249(1). <https://doi.org/10.1023/A:1022527330401>
- Liang, C. C., Li, T., Xiao, Y. P., Liu, M. J., Zhang, H. B., & Zhao, Z. W. (2009). Effects of inoculation with arbuscular mycorrhizal fungi on maize grown in multi-metal contaminated soils. *International Journal of Phytoremediation*, 11(8). <https://doi.org/10.1080/15226510902787310>
- Limmer, M., & Burken, J. (2016). Phytovolatilization of Organic Contaminants. In *Environmental Science and Technology* (Vol. 50, Issue 13). <https://doi.org/10.1021/acs.est.5b04113>
- Lin, K., Limpens, E., Zhang, Z., Ivanov, S., Saunders, D. G. O., Mu, D., Pang, E., Cao, H., Cha, H., Lin, T., Zhou, Q., Shang, Y., Li, Y., Sharma, T., van Velzen, R., de Ruijter, N., Aanen, D. K., Win, J., Kamoun, S., ... Huang, S. (2014). Single Nucleus Genome Sequencing Reveals High Similarity among Nuclei of an Endomycorrhizal Fungus. *PLoS Genetics*, 10(1). <https://doi.org/10.1371/journal.pgen.1004078>
- Liu, L. Z., Gong, Z. Q., Zhang, Y. L., & Li, P. J. (2011). Growth, Cadmium Accumulation and Physiology of Marigold (*Tagetes erecta* L.) as Affected by Arbuscular Mycorrhizal Fungi. *Pedosphere*, 21(3). [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(11\)60132-X](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(11)60132-X)
- Liu, L., Li, J., Yue, F., Yan, X., Wang, F., Bloszies, S., & Wang, Y. (2018). Effects of arbuscular mycorrhizal inoculation and biochar amendment on maize growth, cadmium uptake and soil cadmium speciation in Cd-contaminated soil. *Chemosphere*, 194. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.12.025>
- Liu, Y., Zhu, Y. G., Chen, B. D., Christie, P., & Li, X. L. (2005). Yield and arsenate uptake of arbuscular mycorrhizal tomato colonized by *Glomus mosseae* BEG167 in As spiked soil under glasshouse conditions. *Environment International*, 31(6).

<https://doi.org/10.1016/j.envint.2005.05.041>

- Lone, M. I., He, Z. L., Stoffella, P. J., & Yang, X. E. (2008). Phytoremediation of heavy metal polluted soils and water: Progresses and perspectives. In *Journal of Zhejiang University: Science B* (Vol. 9, Issue 3). <https://doi.org/10.1631/jzus.B0710633>
- Lopes Leal, P., Varón-López, M., Gonçalves de Oliveira Prado, I., Valentim dos Santos, J., Fonsêca Sousa Soares, C. R., Siqueira, J. O., & de Souza Moreira, F. M. (2016). Enrichment of arbuscular mycorrhizal fungi in a contaminated soil after rehabilitation. *Brazilian Journal of Microbiology*, 47(4). <https://doi.org/10.1016/j.bjm.2016.06.001>
- Lorestani, B., Cheraghi, M., & Yousefi, N. (2012). The Potential of Phytoremediation Using Hyperaccumulator Plants: A Case Study at a Lead-Zinc Mine Site. *International Journal of Phytoremediation*, 14(8). <https://doi.org/10.1080/15226514.2011.619594>
- Luo, J., Li, X., Jin, Y., Traore, I., Dong, L., Yang, G., & Wang, Y. (2021). Effects of Arbuscular Mycorrhizal Fungi *Glomus mosseae* on the Growth and Medicinal Components of *Dysosma versipellis* Under Copper Stress. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 107(5). <https://doi.org/10.1007/s00128-019-02780-1>
- Luo, Z. Bin, He, J., Polle, A., & Rennenberg, H. (2016). Heavy metal accumulation and signal transduction in herbaceous and woody plants: Paving the way for enhancing phytoremediation efficiency. In *Biotechnology Advances* (Vol. 34, Issue 6). <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2016.07.003>
- Ma, Y., Oliveira, R. S., Freitas, H., & Zhang, C. (2016). Biochemical and molecular mechanisms of plant-microbe-metal interactions: Relevance for phytoremediation. *Frontiers in Plant Science*, 7. <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.00918>
- Ma, Y., Rajkumar, M., Oliveira, R. S., Zhang, C., & Freitas, H. (2019). Potential of plant beneficial bacteria and arbuscular mycorrhizal fungi in phytoremediation of metal-contaminated saline soils.

- Journal of Hazardous Materials*, 379.
<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.120813>
- Mahar, A., Wang, P., Ali, A., Awasthi, M. K., Lahori, A. H., Wang, Q., Li, R., & Zhang, Z. (2016). Challenges and opportunities in the phytoremediation of heavy metals contaminated soils: A review. In *Ecotoxicology and Environmental Safety* (Vol. 126).
<https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2015.12.023>
- Maiti, R., JL, H., A, G., & D, L. (2015). Plant Based Bioremediation and Mechanisms of Heavy Metal Tolerance of Plants: A Review. *Proceedings of Indian National Science Academy*, 70(1B).
- Majumdar, R., Lebar, M., Mack, B., Minocha, R., Minocha, S., Carter-Wientjes, C., Sickler, C., Rajasekaran, K., & Cary, J. W. (2018). The *Aspergillus flavus* spermidine synthase (spds) gene, is required for normal development, aflatoxin production, and pathogenesis during infection of maize kernels. *Frontiers in Plant Science*, 9.
<https://doi.org/10.3389/fpls.2018.00317>
- Malcová, R., Vosátka, M., & Gryndler, M. (2003). Effects of inoculation with *Glomus intraradices* on lead uptake by *Zea mays* L. and *Agrostis capillaris* L. *Applied Soil Ecology*, 23(1).
[https://doi.org/10.1016/S0929-1393\(02\)00160-9](https://doi.org/10.1016/S0929-1393(02)00160-9)
- Malekzadeh, E., Aliasgharzad, N., Majidi, J., Abdolalizadeh, J., & Aghebati-Maleki, L. (2016). Contribution of glomalin to Pb sequestration by arbuscular mycorrhizal fungus in a sand culture system with clover plant. *European Journal of Soil Biology*, 74.
<https://doi.org/10.1016/j.ejsobi.2016.03.003>
- Malik, R. N., Husain, S. Z., & Nazir, I. (2010). Heavy metal contamination and accumulation in soil and wild plant species from industrial area of Islamabad, Pakistan. *Pakistan Journal of Botany*, 42(1).
- Mallick, I., Bhattacharyya, C., Mukherji, S., Dey, D., Sarkar, S. C., Mukhopadhyay, U. K., & Ghosh, A. (2018). Effective rhizoinoculation and biofilm formation by arsenic immobilizing halophilic plant growth promoting bacteria (PGPB) isolated from mangrove rhizosphere: A step towards arsenic rhizoremediation.

- Science of the Total Environment*, 610–611.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.07.234>
- Manab, D., & Maiti, S. K. (2007). Metal Mine Waste and Phytoremediation: A Review. *Asian Journal of Water, Environment and Pollution*, 4(1).
- Manousaki, E., & Kalogerakis, N. (2011). Halophytes present new opportunities in phytoremediation of heavy metals and saline soils. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 50(2).
<https://doi.org/10.1021/ie100270x>
- Medina, A., Vassilev, N., Barea, J. M., & Azcón, R. (2005). Application of *Aspergillus niger*-treated agrowaste residue and *Glomus mosseae* for improving growth and nutrition of *Trifolium repens* in a Cd-contaminated soil. *Journal of Biotechnology*, 116(4).
<https://doi.org/10.1016/j.jbiotec.2004.12.009>
- Merlos, M. A., Zitka, O., Adam, V., Azcón-Aguilar, C., & Ferrol, N. (2016). The arbuscular mycorrhizal fungus *Rhizophagus irregularis* differentially regulates the copper response of two maize cultivars differing in copper tolerance. *Plant Science*, 253.
<https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2016.09.010>
- Mesjasz-Przybyłowics, J., Nakonieczny, M., Migula, P., Augustyniak, M., Tarnawska, M., Reimold, W. U., Koeberl, C., Przybyłowicz, W., & Głowacka, E. (2004). Uptake of cadmium, lead, nickel and zinc from soil and water solutions by the nickel hyperaccumulator *berkheya coddii*. *Acta Biologica Cracoviensia Series Botanica*, 46.
- Milić, D., Luković, J., Ninkov, J., Zeremski-Škorić, T., Zorić, L., Vasin, J., & Milić, S. (2012). Heavy metal content in halophytic plants from inland and maritime saline areas. *Central European Journal of Biology*, 7(2).
<https://doi.org/10.2478/s11535-012-0015-6>
- Miransari, M. (2011). Hyperaccumulators, arbuscular mycorrhizal fungi and stress of heavy metals. In *Biotechnology Advances* (Vol. 29, Issue 6).
<https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2011.04.006>
- Mirlean, N., Roisenberg, A., & Chies, J. O. (2007). Metal contamination of vineyard soils in wet subtropics (southern Brazil). *Environmental*

- Pollution*, 149(1). <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2006.12.024>
- Mohammad, A., & Mittra, B. (2013). Effects of inoculation with stress-adapted arbuscular mycorrhizal fungus *Glomus deserticola* on growth of *Solanum melongena* L. and *Sorghum sudanese* Staph. seedlings under salinity and heavy metal stress conditions. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 59(2). <https://doi.org/10.1080/03650340.2011.610029>
- Molina, A. S., Lugo, M. A., Pérez Chaca, M. V., Vargas-Gil, S., Zirulnik, F., Leporati, J., Ferrol, N., & Azcón-Aguilar, C. (2020). Effect of arbuscular mycorrhizal colonization on cadmium-mediated oxidative stress in *Glycine max* (L.) Merr. *Plants*, 9(1). <https://doi.org/10.3390/plants9010108>
- Morar, F., Iantovics, L. B., & Gligor, A. (2018). Analysis of Phytoremediation Potential of Crop Plants in Industrial Heavy Metal Contaminated Soil in the Upper Mures River Basin. *Journal of Environmental Informatics ISEIS Journal of Environmental Informatics*, 31(1).
- More, T. T., Yadav, J. S. S., Yan, S., Tyagi, R. D., & Surampalli, R. Y. (2014). Extracellular polymeric substances of bacteria and their potential environmental applications. In *Journal of Environmental Management* (Vol. 144). <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2014.05.010>
- Moreno-Jiménez, E., Gamarra, R., Carpena-Ruiz, R. O., Millán, R., Peñalosa, J. M., & Esteban, E. (2006). Mercury bioaccumulation and phytotoxicity in two wild plant species of Almadén area. *Chemosphere*, 63(11). <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2005.09.043>
- Morgan, J. A. W., Bending, G. D., & White, P. J. (2005). Biological costs and benefits to plant-microbe interactions in the rhizosphere. *Journal of Experimental Botany*, 56(417). <https://doi.org/10.1093/jxb/eri205>
- Mudipalli, A. (2008). Metals (micro nutrients or toxicants) & global health. In *Indian Journal of Medical Research* (Vol. 128, Issue 4).

- Mullai, P., Yogeswari, M. K., Saravanakumar, K., & Kathiresan, K. (2014). Phytoremediation of heavy metals using *avicennia marina* and *rhizophora mucronata* in the uppanar river. *International Journal of ChemTech Research*, 6(12).
- Mwegoha, W. J. S. (2008). The use of phytoremediation technology for abatement soil and groundwater pollution in Tanzania: Opportunities and challenges. *Journal of Sustainable Development in Africa*, 10(1).
- Mykolenko, S., Liedienov, V., Kharytonov, M., Makieieva, N., Kuliush, T., Queralt, I., Marguí, E., Hidalgo, M., Pardini, G., Gispert, M., Wali, A., Colinet, G., Ksibi, M., Muntau, H., Quevauviller, P., Griepink, B., Dukši, I., Vincek, D., Horváth, M., ... Jiménez, M. N. (2013). Phytoremediation of metal enriched mine waste: a review. *Global Journal of Environmental Research*, 70(4).
- Nafady, N. A., & Elgharably, A. (2018). Mycorrhizal symbiosis and phosphorus fertilization effects on *Zea mays* growth and heavy metals uptake. *International Journal of Phytoremediation*, 20(9). <https://doi.org/10.1080/15226514.2018.1438358>
- Nuccio, E. E., Hodge, A., Pett-Ridge, J., Herman, D. J., Weber, P. K., & Firestone, M. K. (2013). An arbuscular mycorrhizal fungus significantly modifies the soil bacterial community and nitrogen cycling during litter decomposition. *Environmental Microbiology*, 15(6), 1870–1881. <https://doi.org/10.1111/1462-2920.12081>
- Ouziad, F., Hildebrandt, U., Schmelzer, E., & Bothe, H. (2005). Differential gene expressions in arbuscular mycorrhizal-colonized tomato grown under heavy metal stress. *Journal of Plant Physiology*, 162(6). <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2004.09.014>
- Padmavathamma, P. K., & Li, L. Y. (2007). Phytoremediation technology: Hyper-accumulation metals in plants. In *Water, Air, and Soil Pollution* (Vol. 184, Issues 1–4). <https://doi.org/10.1007/s11270-007-9401-5>
- Pagano, M. C., & Rosa, L. H. (2015). Fungal molecular taxonomy: an overview. *Fungal Biomolecules: Sources, Applications and Recent*

- Developments*, 313.
- Pavithra, D., & Yapa, N. (2018). Arbuscular mycorrhizal fungi inoculation enhances drought stress tolerance of plants. *Groundwater for Sustainable Development*, 7. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2018.03.005>
- Peer, W. A., Baxter, I. R., Richards, E. L., Freeman, J. L., & Murphy, A. S. (2006). Phytoremediation and hyperaccumulator plants. In *Topics in Current Genetics* (Vol. 14). https://doi.org/10.1007/4735_100
- Prasad, M. N. V. (2003). Phytoremediation of Metal-Polluted Ecosystems: Hype for Commercialization. In *Russian Journal of Plant Physiology* (Vol. 50, Issue 5). <https://doi.org/10.1023/A:1025604627496>
- Putra, B. (2021). Pertumbuhan Akar Rumput Benggala (*Panicum maximum*) Akibat Pemberian. *Musamus Journal of Livestock Science*, 4(2), 18–25. <http://ejournal.unmus.ac.id/index.php/live/article/view/3953>
- Rabie, G. H. (2005). Contribution of arbuscular mycorrhizal fungus to red kidney and wheat plants tolerance grown in heavy metal-polluted soil. *African Journal of Biotechnology*, 4(4). <https://doi.org/10.4314/ajb.v4i4.15103>
- Rafati, M., Khorasani, N., Moattar, F., Shirvany, A., Moraghebi, F., & Hosseinzadeh, S. (2011). Phytoremediation potential of populus alba and morus alba for cadmium, chromium and nickel absorption from polluted soil. *International Journal of Environmental Research*, 5(4).
- Ranieri, E., Moustakas, K., Barbaferi, M., Ranieri, A. C., Herrera-Melián, J. A., Petrella, A., & Tommasi, F. (2020). Phytoextraction technologies for mercury- and chromium-contaminated soil: a review. In *Journal of Chemical Technology and Biotechnology* (Vol. 95, Issue 2). <https://doi.org/10.1002/jctb.6008>
- Ravindran, K. C., Venkatesan, K., Balakrishnan, V., Chellappan, K. P., & Balasubramanian, T. (2007). Restoration of saline land by halophytes for Indian soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 39(10).

- <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2007.02.005>
- Redecker, D., Kodner, R., & Graham, L. E. (2000). Glomalean fungi from the Ordovician. *Science*, 289(5486). <https://doi.org/10.1126/science.289.5486.1920>
- Requena, N., Serrano, E., Ocón, A., & Breuninger, M. (2007). Plant signals and fungal perception during arbuscular mycorrhiza establishment. In *Phytochemistry* (Vol. 68, Issue 1). <https://doi.org/10.1016/j.phytochem.2006.09.036>
- Riaz, M., Kamran, M., Fang, Y., Wang, Q., Cao, H., Yang, G., Deng, L., Wang, Y., Zhou, Y., Anastopoulos, I., & Wang, X. (2021). Arbuscular mycorrhizal fungi-induced mitigation of heavy metal phytotoxicity in metal contaminated soils: A critical review. In *Journal of Hazardous Materials* (Vol. 402). <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.123919>
- Rosenfeld, C. E., Chaney, R. L., & Martínez, C. E. (2018). Soil geochemical factors regulate Cd accumulation by metal hyperaccumulating *Noccaea caerulescens* (J. Presl & C. Presl) F.K. Mey in field-contaminated soils. *Science of the Total Environment*, 616–617. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.11.016>
- Ruscitti, M., Arango, M., Ronco, M., & Beltrano, J. (2011). Inoculation with mycorrhizal fungi modifies praline metabolism and increases chromium tolerance in pepper plants (*Capsicum annum* L.). *Brazilian Journal of Plant Physiology*, 23(1). <https://doi.org/10.1590/S1677-04202011000100004>
- SAKAI, Y., MA, Y., XU, C., WU, H., ZHU, W., & YANG, J. (2012). Phytodesalination of a Salt-Affected Soil with Four Halophytes in China. *沙漠研究 : 日本沙漠学会誌*, 22(1).
- Sarkar, A., Asaeda, T., Wang, Q., & Rashid, M. H. (2015). Arbuscular mycorrhizal influences on growth, nutrient uptake, and use efficiency of *Miscanthus sacchariflorus* growing on nutrient-deficient river bank soil. *Flora - Morphology, Distribution, Functional Ecology of Plants*, 212, 46–54. <https://doi.org/10.1016/j.flora.2015.01.005>

- Sarkar, M., Rahman, A. K. M. L., & Bhoumik, N. C. (2017). Remediation of chromium and copper on water hyacinth (*E. crassipes*) shoot powder. *Water Resources and Industry*, 17. <https://doi.org/10.1016/j.wri.2016.12.003>
- Sarwar, N., Imran, M., Shaheen, M. R., Ishaque, W., Kamran, M. A., Matloob, A., Rehim, A., & Hussain, S. (2017). Phytoremediation strategies for soils contaminated with heavy metals: Modifications and future perspectives. In *Chemosphere* (Vol. 171). <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2016.12.116>
- Schneider, J., Stürmer, S. L., Guilherme, L. R. G., De Souza Moreira, F. M., & Soares, C. R. F. D. S. (2013). Arbuscular mycorrhizal fungi in arsenic-contaminated areas in Brazil. *Journal of Hazardous Materials*, 262. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2012.09.063>
- Selvam, A., & Mahadevan, A. (2002). Effect of ash pond soil and amendments on the growth and arbuscular mycorrhizal colonization of *Allium cepa* and germination of *Arachis hypogaea*, *Lycopersicon esculentum*, and *Vigna mungo* seeds. *Soil and Sediment Contamination*, 11(5). <https://doi.org/10.1080/20025891107032>
- Selvaraj, T., Chellappan, P., Jeong, Y. J., & Kim, H. (2005). Occurrence and quantification of vesicular-arbuscular mycorrhizal (VAM) fungi in industrial polluted soils. *Journal of Microbiology and Biotechnology*, 15(1).
- Sepehri, A., Sarrafzadeh, M. H., & Avateffazeli, M. (2020). Interaction between *Chlorella vulgaris* and nitrifying-enriched activated sludge in the treatment of wastewater with low C/N ratio. *Journal of Cleaner Production*, 247. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119164>
- Sharma, S., Anand, G., Singh, N., & Kapoor, R. (2017). Arbuscular mycorrhiza augments arsenic tolerance in wheat (*Triticum aestivum* L.) by strengthening antioxidant defense system and thiol metabolism. *Frontiers in Plant Science*, 8. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.00906>

- Sheoran, V., Sheoran, A. S., & Poonia, P. (2011). Role of hyperaccumulators in phytoextraction of metals from contaminated mining sites: A review. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 41(2). <https://doi.org/10.1080/10643380902718418>
- Sheoran, Vimla, Sheoran, A. S., & Poonia, P. (2016). Factors Affecting Phytoextraction: A Review. In *Pedosphere* (Vol. 26, Issue 2). [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(15\)60032-7](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(15)60032-7)
- Singh, G., Pankaj, U., Chand, S., & Verma, R. K. (2019). Arbuscular Mycorrhizal Fungi-Assisted Phytoextraction of Toxic Metals by Zea mays L. From Tannery Sludge. *Soil and Sediment Contamination*, 28(8). <https://doi.org/10.1080/15320383.2019.1657381>
- Singh, J., Kumar, M., & Vyas, A. (2014). Healthy Response from Chromium Survived Pteridophytic Plant-Ampelopteris prolifera with the Interaction of Mycorrhizal Fungus-Glomus deserticola. *International Journal of Phytoremediation*, 16(5). <https://doi.org/10.1080/15226514.2013.798619>
- Smith, S. E., & Smith, F. A. (2012). Fresh perspectives on the roles of arbuscular mycorrhizal fungi in plant nutrition and growth. In *Mycologia* (Vol. 104, Issue 1, pp. 1–13). <https://doi.org/10.3852/11-229>
- Smith, Sally E., & Read, D. (2008). Mycorrhizal Symbiosis. In *Mycorrhizal Symbiosis*. <https://doi.org/10.1016/B978-012370526-6.50019-2>
- Solís-Ramos, L. Y., Coto-López, C., & Andrade-Torres, A. (2021). Role of arbuscular mycorrhizal symbiosis in remediation of anthropogenic soil pollution. In *Symbiosis* (Vol. 84, Issue 3). <https://doi.org/10.1007/s13199-021-00774-4>
- Sricoth, T., Meeinkuirt, W., Pichtel, J., Taepayoon, P., & Saengwilai, P. (2018). Synergistic phytoremediation of wastewater by two aquatic plants (*Typha angustifolia* and *Eichhornia crassipes*) and potential as biomass fuel. *Environmental Science and Pollution Research*, 25(6). <https://doi.org/10.1007/s11356-017-0813-5>
- Sudová, R., & Vosátka, M. (2007). Differences in the effects of three

- arbuscular mycorrhizal fungal strains on P and Pb accumulation by maize plants. *Plant and Soil*, 296(1–2).
<https://doi.org/10.1007/s11104-007-9291-8>
- Sun, Y. B., Sun, G. H., Zhou, Q. X., Xu, Y. M., Wang, L., Liang, X. F., Sun, Y., & Qing, X. (2011). Induced-phytoextraction of heavy metals from contaminated soil irrigated by industrial wastewater with Marvel of Peru (*Mirabilis jalapa* L.). *Plant, Soil and Environment*, 57(8).
<https://doi.org/10.17221/148/2011-pse>
- Tan, S. Y., Jiang, Q. Y., Zhuo, F., Liu, H., Wang, Y. T., Li, S. S., Ye, Z. H., & Jing, Y. X. (2015). Effect of inoculation with *Glomus versiforme* on cadmium accumulation, antioxidant activities and phytochelatin of *Solanum photeinocarpum*. *PLoS ONE*, 10(7).
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0132347>
- 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. In *International Journal of Chemical Engineering*.
<https://doi.org/10.1155/2011/939161>
- Tchounwou, P. B., Yedjou, C. G., Patlolla, A. K., & Sutton, D. J. (2012). Heavy metal toxicity and the environment. In *EXS* (Vol. 101).
https://doi.org/10.1007/978-3-7643-8340-4_6
- Tian, W., Zhang, C. Q., Qiao, P., & Milne, R. (2011). Diversity of culturable ericoid mycorrhizal fungi of *Rhododendron decorum* in Yunnan, China. *Mycologia*, 103(4). <https://doi.org/10.3852/10-296>
- Toler, H. D., Morton, J. B., & Cumming, J. R. (2005). Growth and metal accumulation of mycorrhizal sorghum exposed to elevated copper and zinc. *Water, Air, and Soil Pollution*, 164(1–4).
<https://doi.org/10.1007/s11270-005-2718-z>
- Tonin, C., Vandenkoornhuyse, P., Joner, E. J., Straczek, J., & Leyval, C. (2001). Assessment of arbuscular mycorrhizal fungi diversity in the rhizosphere of *Viola calaminaria* and effect of these fungi on heavy metal uptake by clover. *Mycorrhiza*, 10(4).
<https://doi.org/10.1007/s005720000072>

- Török, A., Gulyás, Z., Szalai, G., Kocsy, G., & Majdik, C. (2015). Phytoremediation capacity of aquatic plants is associated with the degree of phytochelatin polymerization. *Journal of Hazardous Materials*, 299. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2015.06.042>
- Turnau, K., Anielska, T., & Jurkiewicz, A. (2005). Mycothallic/mycorrhizal symbiosis of chlorophyllous gametophytes and sporophytes of a fern, *Pellaea viridis* (Forsk.) Prantl (Pellaeaceae, Pteridales). *Mycorrhiza*, 15(2). <https://doi.org/10.1007/s00572-004-0306-5>
- Turnau, Katarzyna, & Mesjasz-Przybylowicz, J. (2003). Arbuscular mycorrhiza of *Berkheya coddii* and other Ni-hyperaccumulating members of Asteraceae from ultramafic soils in South Africa. *Mycorrhiza*, 13(4). <https://doi.org/10.1007/s00572-002-0213-6>
- Vamerali, T., Bandiera, M., & Mosca, G. (2010). Field crops for phytoremediation of metal-contaminated land. A review. In *Environmental Chemistry Letters* (Vol. 8, Issue 1). <https://doi.org/10.1007/s10311-009-0268-0>
- Van Tichelen, K. K., Colpaert, J. V., & Vangronsveld, J. (2001). Ectomycorrhizal protection of *Pinus sylvestris* against copper toxicity. *New Phytologist*, 150(1). <https://doi.org/10.1046/j.1469-8137.2001.00081.x>
- Vangronsveld, J., Herzig, R., Weyens, N., Boulet, J., Adriaensen, K., Ruttens, A., Thewys, T., Vassilev, A., Meers, E., Nehnevajova, E., van der Lelie, D., & Mench, M. (2009). Phytoremediation of contaminated soils and groundwater: Lessons from the field. *Environmental Science and Pollution Research*, 16(7). <https://doi.org/10.1007/s11356-009-0213-6>
- Viraraghavan, T., & Srinivasan, A. (2011). Fungal biosorption and biosorbents. In *Microbial Biosorption of Metals*. https://doi.org/10.1007/978-94-007-0443-5_6
- Vishnoi, S. R., & Srivastava, P. N. (2008). Phytoremediation - Green for environmental clean. *Proceedings of Taal2007: The 12th World Lake Conference*, 342005.
- Vodnik, D., Grčman, H., Maček, I., van Elteren, J. T., & Kovačević, M.

- (2008). The contribution of glomalin-related soil protein to Pb and Zn sequestration in polluted soil. *Science of the Total Environment*, 392(1).
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2007.11.016>
- Vos, C., Schouteden, N., van Tuinen, D., Chatagnier, O., Elsen, A., De Waele, D., Panis, B., & Gianinazzi-Pearson, V. (2013). Mycorrhiza-induced resistance against the root-knot nematode *Meloidogyne incognita* involves priming of defense gene responses in tomato. *Soil Biology and Biochemistry*, 60, 45–54.
<https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2013.01.013>
- Vos, Christine, Claerhout, S., Mkandawire, R., Panis, B., de Waele, D., & Elsen, A. (2012). Arbuscular mycorrhizal fungi reduce root-knot nematode penetration through altered root exudation of their host. *Plant and Soil*, 354(1–2), 335–345.
<https://doi.org/10.1007/s11104-011-1070-x>
- Vosátka, M., Rydlová, J., Sudová, R., & Vohník, M. (2006). Mycorrhizal Fungi as Helping Agents in Phytoremediation of Degraded and contaminated Soils. In *Phytoremediation Rhizoremediation*.
https://doi.org/10.1007/978-1-4020-4999-4_17
- Vuorinen, I., Hamberg, L., Müller, M., Seiskari, P., & Pennanen, T. (2014). Development of growth media for solid substrate propagation of ectomycorrhizal fungi for inoculation of Norway spruce (*Picea abies*) seedlings. *Mycorrhiza*, 311–324.
<https://doi.org/10.1007/s00572-014-0611-6>
- Wahl, M., ShahnazL., Dobretsov, S., Saha, M., Symanowski, F., DavidK., Lachnit, T., Vasel, M., & Weinberger, F. (2010). Ecology of antifouling resistance in the bladder wrack *Fucus vesiculosus*: Patterns of microfouling and antimicrobial protection. *Marine Ecology Progress Series*, 411. <https://doi.org/10.3354/meps08644>
- Wang, A. S., Angle, J. S., Chaney, R. L., Delorme, T. A., & Reeves, R. D. (2006). Soil pH effects on uptake of Cd and Zn by *Thlaspi caerulescens*. *Plant and Soil*, 281(1–2).
<https://doi.org/10.1016/j.cam.2004.11.052>

- Wang, F. (2017). Occurrence of arbuscular mycorrhizal fungi in mining-impacted sites and their contribution to ecological restoration: Mechanisms and applications. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 47(20). <https://doi.org/10.1080/10643389.2017.1400853>
- Wang, F. Y., Lin, X. G., & Yin, R. (2007). Role of microbial inoculation and chitosan in phytoextraction of Cu, Zn, Pb and Cd by *Elsholtzia splendens* - a field case. *Environmental Pollution*, 147(1). <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2006.08.005>
- Wang, G., Wang, L., Ma, F., You, Y., Wang, Y., & Yang, D. (2020). Integration of earthworms and arbuscular mycorrhizal fungi into phytoremediation of cadmium-contaminated soil by *Solanum nigrum* L. *Journal of Hazardous Materials*, 389. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.121873>
- Wang, Q., Mei, D., Chen, J., Lin, Y., Liu, J., Lu, H., & Yan, C. (2019). Sequestration of heavy metal by glomalin-related soil protein: Implication for water quality improvement in mangrove wetlands. *Water Research*, 148. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2018.10.043>
- Wang, W., Shi, J., Xie, Q., Jiang, Y., Yu, N., & Wang, E. (2017). Nutrient Exchange and Regulation in Arbuscular Mycorrhizal Symbiosis. In *Molecular Plant* (Vol. 10, Issue 9). <https://doi.org/10.1016/j.molp.2017.07.012>
- Wang, Yaodong, & Greger, M. (2004). Clonal Differences in Mercury Tolerance, Accumulation, and Distribution in Willow. *Journal of Environmental Quality*, 33(5). <https://doi.org/10.2134/jeq2004.1779>
- Wang, Yuanpeng, Huang, J., & Gao, Y. (2012). Arbuscular mycorrhizal colonization alters subcellular distribution and chemical forms of cadmium in *Medicago sativa* L. and resists cadmium toxicity. *PLoS One*, 7(11). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0048669>
- Weng, B., Xie, X., Weiss, D. J., Liu, J., Lu, H., & Yan, C. (2012). *Kandelia obovata* (S., L.) Yong tolerance mechanisms to Cadmium:

- Subcellular distribution, chemical forms and thiol pools. *Marine Pollution Bulletin*, 64(11).
<https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2012.07.047>
- Werner, A., & Karolewski, P. (2004). The effects of toxic metals, content of nutrients and inoculation with mycorrhizal fungi on the level of phenolics in roots and growth of Scots pine seedlings. *Acta Physiologiae Plantarum*, 26(2). <https://doi.org/10.1007/s11738-004-0007-x>
- Whitelaw, M. A. (1999). Growth Promotion of Plants Inoculated with Phosphate-Solubilizing Fungi. *Advances in Agronomy*, 69(C). [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(08\)60948-7](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(08)60948-7)
- Wiardani, I. (2010). *Budidaya Jamur Konsumsi*. Penerbit Andi.
- Wu, Q., Wang, S., Thangavel, P., Li, Q., Zheng, H., Bai, J., & Qiu, R. (2011). Phytostabilization potential of *Jatropha curcas* L. in polymetallic acid mine tailings. *International Journal of Phytoremediation*, 13(8). <https://doi.org/10.1080/15226514.2010.525562>
- Wu, S. C., Wong, C. C., Shu, W. S., Khan, A. G., & Wong, M. H. (2011). Mycorrhizo-remediation of lead/zinc mine tailings using vetiver: A field study. *International Journal of Phytoremediation*, 13(1). <https://doi.org/10.1080/15226511003671353>
- Wu, S., Vosátka, M., Vogel-Mikus, K., Kavčič, A., Kelemen, M., Šepec, L., Pelicon, P., Skála, R., Valero Powder, A. R., Teodoro, M., Michálková, Z., & Komárek, M. (2018). Nano Zero-Valent Iron Mediated Metal(loid) Uptake and Translocation by Arbuscular Mycorrhizal Symbioses. *Environmental Science and Technology*, 52(14). <https://doi.org/10.1021/acs.est.7b05516>
- Wu, S., Zhang, X., Chen, B., Wu, Z., Li, T., Hu, Y., Sun, Y., & Wang, Y. (2016). Chromium immobilization by extraradical mycelium of arbuscular mycorrhiza contributes to plant chromium tolerance. *Environmental and Experimental Botany*, 122. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2015.08.006>
- Wu, S., Zhang, X., Huang, L., & Chen, B. (2019). Arbuscular mycorrhiza and plant chromium tolerance. In *Soil Ecology Letters* (Vol. 1, Issues 3–

- 4). <https://doi.org/10.1007/s42832-019-0015-9>
- Wu, S., Zhang, X., Sun, Y., Wu, Z., Li, T., Hu, Y., Su, D., Lv, J., Li, G., Zhang, Z., Zheng, L., Zhang, J., & Chen, B. (2015). Transformation and Immobilization of Chromium by Arbuscular Mycorrhizal Fungi as Revealed by SEM-EDS, TEM-EDS, and XAFS. *Environmental Science and Technology*, 49(24). <https://doi.org/10.1021/acs.est.5b03659>
- Wuana, R. A., & Okieimen, F. E. (2011). Heavy Metals in Contaminated Soils: A Review of Sources, Chemistry, Risks and Best Available Strategies for Remediation. *ISRN Ecology*, 2011. <https://doi.org/10.5402/2011/402647>
- Yadav, R., Arora, P., Kumar, S., & Chaudhury, A. (2010). Perspectives for genetic engineering of poplars for enhanced phytoremediation abilities. *Ecotoxicology*, 19(8). <https://doi.org/10.1007/s10646-010-0543-7>
- Yan, L., Riaz, M., Liu, J., Liu, Y., Zeng, Y., & Jiang, C. (2021). Boron reduces aluminum deposition in alkali-soluble pectin and cytoplasm to release aluminum toxicity. *Journal of Hazardous Materials*, 401. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.123388>
- Yang, Y., Han, X., Liang, Y., Ghosh, A., Chen, J., & Tang, M. (2015). The combined effects of arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) and lead (Pb) stress on Pb accumulation, plant growth parameters, photosynthesis, and antioxidant enzymes in robinia pseudoacacia L. *PLoS ONE*, 10(12). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0145726>
- Yao, Q., Zhu, H. H., & Chen, J. Z. (2005). Growth responses and endogenous IAA and iPAs changes of litchi (*Litchi chinensis* Sonn.) seedlings induced by arbuscular mycorrhizal fungal inoculation. *Scientia Horticulturae*, 105(1). <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2005.01.003>
- Yu, X. Z., Peng, X. Y., & Xing, L. Q. (2010). Effect of temperature on phytoextraction of hexavalent and trivalent chromium by hybrid willows. *Ecotoxicology*, 19(1). <https://doi.org/10.1007/s10646-009-0386-2>

- Zhan, F., Li, B., Jiang, M., Li, T., He, Y., Li, Y., & Wang, Y. (2019). Effects of arbuscular mycorrhizal fungi on the growth and heavy metal accumulation of bermudagrass [*Cynodon dactylon* (L.) Pers.] grown in a lead–zinc mine wasteland. *International Journal of Phytoremediation*, 21(9). <https://doi.org/10.1080/15226514.2019.1577353>
- Zhang, F., Liu, M., Li, Y., Che, Y., & Xiao, Y. (2019). Effects of arbuscular mycorrhizal fungi, biochar and cadmium on the yield and element uptake of *Medicago sativa*. *Science of the Total Environment*, 655. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.11.317>
- Zhang, X. H., Zhu, Y. G., Lin, A. J., Chen, B. D., Smith, S. E., & Smith, F. A. (2006). Arbuscular mycorrhizal fungi can alleviate the adverse effects of chlorothalonil on *Oryza sativa* L. *Chemosphere*, 64(10). <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2006.01.034>
- Zhang, X., Zhang, H., Lou, X., & Tang, M. (2019). Mycorrhizal and non-mycorrhizal *Medicago truncatula* roots exhibit differentially regulated NADPH oxidase and antioxidant response under Pb stress. *Environmental and Experimental Botany*, 164. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2019.04.015>
- Zhao, R., Guo, W., Bi, N., Guo, J., Wang, L., Zhao, J., & Zhang, J. (2015). Arbuscular mycorrhizal fungi affect the growth, nutrient uptake and water status of maize (*Zea mays* L.) grown in two types of coal mine spoils under drought stress. *Applied Soil Ecology*, 88, 41–49. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2014.11.016>
- Zhou, H., Zhou, X., Zeng, M., Liao, B. H., Liu, L., Yang, W. T., Wu, Y. M., Qiu, Q. Y., & Wang, Y. J. (2014). Effects of combined amendments on heavy metal accumulation in rice (*Oryza sativa* L.) planted on contaminated paddy soil. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 101(1). <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2014.01.001>

INDEKS

- agroekosistem, 38
amalgamasi, 2
auksin, 26
biosintetik, 23
biosorben, 31
deforestasi, 2
dehalogenase, 18
Detoksifikasi, 22
eksplorasi, 1
endomikoriza, 5, 6
esensial, 10, 12, 20, 22
fisikokimia, 22, 28, 40
fitoabsorpsi, 13
fitoakumulasi, 13, 39
Fitodegradasi, 18
Fitodesalinasi, 20
Fitoekstraksi, ix, 13, 15, 33
Fitofiltrasi, 16
Fitohormon, 26
Fitoremidiasi, v
Fitostabilisasi, ix, 16, 32
Fitovolatilisasi, 17
fosfatase, 8, 18, 54
glikoprotein, 8, 31, 42, 56
glomalin, 8, 31, 41, 42, 46, 63, 67,
68, 77, 87, 88
heterogen, 25
imobilisasi, 11, 25, 28, 30
kation, 10, 15, 25, 26
kompartementalisasi, 23
konversi, 18, 23, 26, 44
metaloid, 13, 15, 38
miselium ekstradikal, 32, 56
nitrilase, 18
nitroeduktase, 18
peroksidase, 18
redoks, 17, 26
Revegetasi, 28
Rhizodegradasi, 19
rhizofiltrasi, 16
rhizosfer, 15, 16, 18, 19
Sekuestrasi, 21, 23
siderophores, 41
sitokinin, 26, 54
tailing, 1, 28
toksisitas, 17, 31, 34, 42, 43, 44,
50, 51, 53
transpirasi, 27
vegetasi, vii, 12, 30
vesikula, 5
VOC, 17, 18
xenobiotik, 40

PROFIL PENULIS

PENULIS 1



Nama : **Bela Putra, S.Pt., M.Sc.**
NIP/NIK : 20160701271
Tempat dan Tanggal Lahir : Kota Baru Santan, 05-06-1988
Jenis Kelamin : Laki-laki
Status Perkawinan : Kawin
Agama : Islam
Golongan / Pangkat : III b / **Penata Muda TK 1**
Jabatan Fungsional Akademik : Asisten Ahli
Perguruan Tinggi : Universitas Muara Bungo
Alamat : Kampus B, Jalan Diponegoro No. 27
Rimbo Tengah Muara Bungo – Jambi
Telp./Faks. : (0747) 323310
Alamat Rumah : Jl. Sei Buluh Blok C, Kelurahan Sungai
Mengkuang, Kec Rimbo Tenga, Kab.
Bungo.
Telp./Faks. : 085263297067
Alamat e-mail : belaputramsc@gmail.com

RIWAYAT PENDIDIKAN PERGURUAN TINGGI				
Tahun Lulus	Jenjang	Perguruan Tinggi	Jurusan/Bidang Studi	Keterangan
2011	S1	Universitas Andalas Padang	Nutrisi dan Ilmu Makanan Ternak	Lulusan terbaik
2015	S2	Universitas Gadjah Mada	Ilmu Peternakan	Cumlaude

PELATIHAN PROFESIONAL		
Tahun	Pelatihan	Penyelenggara
2017	Pelatihan sosialisasi implementasi Rencana Induk Riset Nasional (RIRN) dan agenda Riset Nasional (ARN)	Ristek Dikti
2017	Workshop penguatan pengelolaan jurnal dengan tema "menuju jurnal nasional yang terakreditasi dan bereputasi internasional"	LPPM UNJA
2016	Workshop penerapan blended learning di perguruan tinggi berbasis resource sharing untuk dosen di lingkungan kopertis wilayah X	Kopertis X
2016	Pelatihan motivasi, layanan dan pengarsipan staf dan Dosen	Universitas Muara Bungo
2016	Pelatihan Applied Approach (AA)	Kopertis X
2018	Pelatihan Verifikator SINTA	Ristek Dikti
2018	Workshop Toefl	Universitas Muara Bungo
2018	Pelatihan Strategi Penelitian Nasional	Universitas Muara Bungo

PENGALAMAN MENGAJAR			
Mata Kuliah	Jenjang	Institusi/Jurusan/Program	Tahun ... s.d. ...
Pengantar Ilmu Peternakan	S1	Universitas Muara Bungo	2016-2019
Landasan Tanaman Makanan Ternak	S1	Universitas Muara Bungo	2016-2018
Abotoir dan Teknologi Pematangan Ternak	S1	Universitas Muara Bungo	2016-2017
Produksi Hijauan Pakan	S1	Universitas Muara Bungo	2016-2019
Manajemen Pembibitan	S1	Universitas Muara Bungo	2017-

PENGALAMAN MENGAJAR			
Mata Kuliah	Jenjang	Institusi/Jurusan/Program	Tahun ... s.d. ...
Ternak			2018
Manajemen Usaha ternak potong dan kerja	S1	Universitas Muara Bungo	2017-2018
Produksi Ternak potong dan kerja	S1	Universitas Muara Bungo	2017-2019
Bahan pakan dan formulasi ransum	S1	Universitas Muara Bungo	2017-2019
Produksi Ternak Perah	S1	Universitas Muara Bungo	2017
Biologi Pertanian	S1	Universitas Muara Bungo	2017-2019
Ilmu Ilmiah Dasar	S1	Universitas Muara Bungo	2017-2019

PRODUK BAHAN AJAR			
Mata Kuliah	Program pendidikan	Jenis Bahan Ajar (Cetak Non Cetak)	Sem /Tahun Akademik
Produksi Ternak potong dan kerja	S1	Cetak	
Bahan pakan dan formulasi ransum	S1	Cetak	
Biologi Pertanian	S1	Cetak	
Produksi Hijauan Pakan	S1	Cetak	
Potensi Dedak Padi	S1	Cetak ber ISBN	

PENGALAMAN PENELITIAN			
Tahun	Judul Penelitian	Ketua/Anggota/Mandiri	Sumber Dana
2021	Aplikasi teknologi fitoremediasi berbasis mikoriza arbuskula untuk meningkatkan produktivitas rumput gajah mini (pennisetum purpureum cv. Mott) pada lahan bekas tambang emas di kecamatan rantau pandan kabupaten	Ketua	RISTEK BRIN Total Dana :145.000.000

PENGALAMAN PENELITIAN			
Tahun	Judul Penelitian	Ketua/Anggota/Mandiri	Sumber Dana
	bungo		
2016	Uji pertumbuhan kecambah alfalfa pada tanah regosol	Mandiri	LPPM Universitas Muara Bungo
2018	Pengaruh Pemberian Pupuk NPK terhadap pertumbuhan rumput setaria pada tanah bekas tambang batu bara di kecamatan rantau pandan Kabupaten Bungo.	Mandiri	LPPM Universitas Muara Bungo

KONFERENSI/SEMINAR/LOKAKARYA/SIMPOSIUM		
Tahun	Judul Kegiatan	Penyelenggara
2018	Peserta konferensi “Ketahanan Pangan Kabupaten Bungo”	Pemda Kabupaten Bungo-Jambi
2013	Peserta Seminar Hasil Penelitian Dosen Pemula “Efektifitas Pemberian Kapur, Kcl Dan Urine Sapi Terhadap Karakter Agronomi Kacang Hijau Di Ultisol”	Universitas Muara Bungo

KEGIATAN PROFESIONAL/PENGABDIAN KEPADA MASYARAKAT	
Tahun	Kegiatan
2020	Aplikasi teknologi budidaya rumput gajah mini berbasis sumber daya lokal” Seluruh kegiatan dibiayai oleh Ristek Dikti dengan anggaran 25.000.000
Februari 2016	Pembuatan Kulit Manggis menjadi minuman tradisional, bertempat di Kelurahan Buat Kecamatan Bathin III Ulu Kabupaten Bungo, Jambi
Juli 2017	Pembuatan Pupuk KOMPOS dari kotoran Kerbau dengan menggunakan fermentasi EM-4. Bertempat di Panti Asuhan Aisyah. Kelurahan Sei Binjai Kec. Batin III. Kab Bungo
Agustus 2016	Pembinaan Warga Petani-Peternak dalam Penyiapan Generasi Yang gemilang, Kelompok Tani Bumbung Jaya, Desa Sei Arang, Kec. Bungo Dani. Kab Bungo

KEGIATAN PROFESIONAL/PENGABDIAN KEPADA MASYARAKAT	
Tahun	Kegiatan
Februari 2018	Pelatihan ternak ayam petelur, bekerja sama dengan dinas peternakan Kabupaten Merangin, bertempat di Desa Maurus Jaya, Merangin.
April 2018	Bimbingan Masyarakat Kelompok tani tentang Pengelolaan Sistem perandangan ayam broiler, di Ngaol Kabupaten Merangin.
2020	Implementasi teknologi budidaya dan pengolahan rumput gajah mini (pennisetum purpureum cv. Mott) berbasis sumber daya lokal menuju desa mandiri pakan ternak

JABATAN DALAM PENGELOLAAN INSTITUSI		
Jabatan	Institusi (Univ. Fak. Jurusan.Lab. Studio, Manajemen sistem Informasi Akademik dll)	Tahun ... s.d. ...
Kasubid. Publikasi dan pengarsipan	Universitas Muara Bungo	2016-2017
Kasubid. Penelitian	Universitas Muara Bungo	2017-sekarang
Verifikator Internal Sinta	Universitas Muara Bungo	2018-sekarang
Chief Editor Jurnal	Stock Peternakan	2018-sekarang

PERAN DALAM KEGIATAN KEMAHASISWAAN			
Tahun	Jenis>Nama Kegiatan	Peran	Tempat
2017-2018	Membimbing mahasiswa PKM	Pembimbing/pengarah	Universitas Muara Bungo
2018-sekarang	Pembimbing kegiatan Kerohanian UMB	Pembimbing/Penanggung jawab	Universitas Muara Bungo
2018-sekarang	Membimbing Skripsi	Pembimbing 1 atau 2	Universitas Muara Bungo
2016-sekarang	Membimbing PKL	Pembimbing	Fakultas Pertanian UMB
2017-2018	Membimbing Kukerta	pembimbing	Universitas Muara Bungo
2016	Membimbing kegiatan olimpiade matematika	Pembimbing	Universitas Muara Bungo

Saya menyatakan bahwa semua keterangan dalam Curriculum Vitae ini adalah benar dan apabila terdapat kesalahan, saya bersedia mempertanggungjawabkannya.

Muara Bungo, 9 September 2021

DTO

PENULIS 2

Nama	Dr. Ir. LILI WARLY, M.Agr. (Profesor)
NIDN/NIDK	0028086003
Pangkat/Jabatan	-/Guru Besar
E-mail	liliwarly_uapdg@yahoo.co.id
ID Sinta	5996960
h-Index	7

Publikasi di Jurnal Internasional terindeks

No	Judul Artikel	Peran (First author, Corresponding author, atau co-author)	Nama Jurnal, Tahun terbit, Volume, Nomor, P-ISSN/E-ISSN	URL artikel (jika ada)
1	Biodegradation of Lignin by White Rot Fungi (<i>Pleurotus ostreatus</i>) to Decrease the Fibre Components in the Palm Midrib		Pakistan Journal of Nutrition, 2018, 17, 2, 1680-5194	https://scialert.net
2	Evaluation of Fiber Content Based on Palm Plantation which Has Fermentation with Probiotic MOIYL		Variabel, 2018, 1, 1, 2593- 302X	https://www.research
3	Interaction Effects of Cattle Feed Supplement and Concentrate on Rumen Fermentability and Fiber Fraction Degradability in Low-Quality Forage	corresponding author	Scholars Journal of Agriculture and Veterinary Sciences (SJA VS), 2018, 5, 6, e-ISSN 2348–1854; p-ISSN 2348–8883	http://saspjournals .
4	Effect of Cassava Leaf Meal Supplementation on In vitro Digestibility of Ammoniated Palm Leaf Enriched with Sulphur and Phosphorus Minerals	co-author	Pakistan Journal of Nutrition, 2017, 16, 4, 1680-5194	http://docsdrive.com
5	Effect of Cassava Leaf Meal Supplementation on In vitro Digestibility of Ammoniated Palm Leaf Enriched with Sulphur and Phosphorus Minerals		Pakistan Journal of Nutrition, 2017, 16, 4, 1680-5194	https://scialert.net

No	Judul Artikel	Peran (First author, Corresponding author, atau co-author)	Nama Jurnal, Tahun terbit, Volume, Nomor, P-ISSN/E-ISSN	URL artikel (jika ada)
6	Nutrient Digestibility and Apparent Bioavailability of Minerals in Beef Cattle Fed with Different Levels of Concentrate and Oil-palm Fronds		Pakistan Journal of Nutrition, 2017, 16, 3, 1680-5194	http://eprints.unsri
7	Optimizing the production of Beef Cattle Utilizing Palm Oil Leaf Sheet Ammoniation Supplemented by Sulfur Minerals, Phosphorus and Cassava leaf flour		Pakistan Journal of Nutrition, 2017, 16, 11, 1680-5194	https://scialert.net
8	Optimizing the Production of Beef Cattle Utilizing Palm Oil Leaf Sheet Ammoniation Supplemented by Sulfur Minerals, Phosphorus and Cassava Leaf Flour	co-author	Pakistan Journal of Nutrition, 2017, 16, 11, 1680-5194	http://docsdrive.com
9	Supplementation of Solid Ex- Decanter on Performance of Cattle Fed Palm Fruit By-Products		Pakistan Journal of Nutrition, 2015, 14, 11, 1680-5194	-
10	Supplementation of Solid Ex- Decanter on Performance of Cattle Fed Plam Fruit By-Products.	first author	Pakistan Journal of Nutrition, 2015, 14, 11, 1680-5194	http://docsdrive.com
11	Quality Improvement of Oil Palm Waste-Based Feed Product Through Indigenous Microbial Fermentation to Reach Sustainable Agricul		International journal on Advanced Science engineering information technology, 2014, 4, 4, 2088-5334	-
12	Quality Improvement of Oil Palm Waste-Based Feed Product Through Indigenous Microbial Fermentation to Reach		Jurnal Internasional, 2014, 4, 4, 2088-5334	http://dx.doi.org/10

No	Judul Artikel	Peran (First author, Corresponding author, atau co-author)	Nama Jurnal, Tahun terbit, Volume, Nomor, P-ISSN/E-ISSN	URL artikel (jika ada)
	Sustainable Agriculture			
13	Quality Improvement of Oil Palm Waste-Based Feed Product Through Indigenous Microbial Fermentation to Reach Sustainable Agriculture		Jurnal Internasional, 2014, 4, 4, 2088-5334	http://dx.doi.org/10
14	Toward Probiotic Food Product from Meat Through Isolation and Identification Lactic Acid Bacteria As Probiotic Culture Starter		Jurnal Internasional, 2014, 4, 2, 2088-5334	http://dx.doi.org/10
15	Toward Probiotic Food Product from Meat Through Isolation and Identification Lactic Acid Bacteria As Probiotic Culture Starter		INTERNATIONAL JOURNAL ON ADVANCED SCIENCE ENGINEERING INFORMATION TECHNOLOGY, 2014, 4, 2, 2088-5334	-
16	Palm Leaf Processing as Ruminant Feeds		Pakistan Journal of Nutrition, 2013, 12, 3, 1680-5194	www.pjbs.org/pjnonli
17	Potency of indigenous bacteria from oil palm waste in degrades lignocellulose as a sources of inoculum fermented to high fibre feed		pakistan journal of nutrition, 2013, 12, 9, 1680-5194	-
18	S and P Mineral Supplementation of Ammoniated Palm Leaves as Ruminant Feed		Pakistan Journal of Nutrition, 2013, 12, 10, 1680-5194	http://search.proque
19	Dry matter and macromineral disappearance of axonopus,		Stored product and postharvest research, 2011,	
	pinnesetum purpureum and brachiare decumben in west sumatera,		10, 10, 21410-6567	

No	Judul Artikel	Peran (First author, Corresponding author, atau co-author)	Nama Jurnal, Tahun terbit, Volume, Nomor, P-ISSN/E-ISSN	URL artikel (jika ada)
	Indonesia			
20	Mineral status of forages and grazing goats in West Sumatra, Indonesia : 1. Macro mineral.	first author	Journal of Food, Agriculture & Environment, 2006, 4, 2, Online ISSN: 1459-0263 Print ISSN: 1459-0255	https://www.wflpubli
21	Mineral status of forages and grazing goats in West Sumatra, Indonesia : 2. Micro mineral.	first author	Journal of Food, Agriculture & Environment, 2006, 4, 2, Online ISSN: 1459-0263 Print ISSN: 1459-0255	https://www.wflpubli
22	Studies on the utilization of rice straw by sheep. III. Effect of soybean meal and barley supplementation on voluntary intake, digestibility and ruminal fermentation	first author	Asian Australasian Journal of Animal Sciences, 1994, 7, 2, 10112367	https://www.ajas.inf
23	Studies on the utilization of rice straw by sheep. IV. Effect of soybean meal and barley supplementation on eating and rumination behavior.	first author	Asian Australasian Journal of Animal Sciences, 1994, 7, 2, 10112367	www.ajas.info/upload
24	Studies on the utilization of rice straw by sheep. IV. Effect of soybean meal and barley supplementation on eating and rumination behavior. Asian-Australasian Journal of Animal Sciences.	first author	Asian Australasian Journal of Animal Sciences, 1994, 7, 2, 10112367	https://www.ajas.inf
25	Study on the utilization of rice straw by sheep. 1. The effect of soybean meal supplementation on	first author	Asian Australasian Journal of Animal Sciences, 1992, 5, 4, 10112367	http://www.ajas.inf

No	Judul Artikel	Peran (First author, Corresponding author, atau co-author)	Nama Jurnal, Tahun terbit, Volume, Nomor, P-ISSN/E-ISSN	URL artikel (jika ada)
	the voluntary intake of rice straw and ruminal fermentation.			
26	Study on the utilization of rice straw by sheep. 2. The effect of soybean meal supplementation on the eating and rumination behavior. Asian- Australasian Journal of Animal Sciences.	first author	Asian Australasian Journal of Animal Sciences, 1992, 5, 4, 10112367	https://www.ajas.inf

Publikasi di Jurnal Nasional Terakreditasi Peringkat 1 dan 2

No	Judul Artikel	Peran (First author, Corresponding author, atau co-author)	Nama Jurnal, Tahun terbit, Volume, Nomor, P-ISSN/E-ISSN	URL artikel (jika ada)
1	Milk Quality of Dairy goat by Giving Feed Supplements Antioxidant Source		Journal of the Indonesian tropical animal agriculture, 2011, 36, 3, 2087-8273	www.jppt.undip.ac.id
2	Kecernaan Ransum Domba berbasis daun sawit		Media Peternakan, 2010, 33, 3, 0126-0472	-
	teramoniasi yang disuplementasi Sulfur, Phospor dan daun Ubi kayu.			

Prosiding seminar/konferensi internasional terindeks

No	Judul Artikel	Peran (First author, Corresponding author, atau co-author)	Nama Jurnal, Tahun terbit, Volume, Nomor, P-ISSN/E-ISSN	URL artikel (jika ada)
----	---------------	--	---	------------------------

Buku

No	Judul Buku	Tahun Penerbitan	ISBN	Penerbit	URL (jika ada)
----	------------	------------------	------	----------	----------------

Perolehan KI

No	Judul KI	Tahun Perolehan	Jenis KI	Nomor	Status KI (terdaftar/granted)	URL (jika ada)
----	----------	-----------------	----------	-------	-------------------------------	----------------

PENULIS 3

Nama	EVITAYANI, S.Pt., M.Agr., Ph.D.
NIDN/NIDK	0029107302
Pangkat/Jabatan	-/Lektor
E-mail	evitayani@ansci.unand.ac.id/evitayani.unand@gmail.com
ID Sinta	5984260
h-Index	6

Publikasi di Jurnal Internasional terindeks

No	Judul Artikel	Peran (First author, Corresponding author, atau co-author)	Nama Jurnal, Tahun terbit, Volume, Nomor, P-ISSN/E-ISSN	URL artikel (jika ada)
1	Physical properties and nutritive values of shell meal derived from different shellfish species and habitats		International Journal of Poultry Science, 2018, 17, 3, 1682-8356	http://docsdrive.com
2	Physical Properties and Nutritive Values of Shell Meal Derived from Different Shellfish Species and Habitats		International Journal of Poultry Science, 2018, 17, 3, 1682-8356	https://scialert.net
3	Nutrient Digestibility and Apparent Bioavailability of Minerals in Beef Cattle Fed with Different Levels of Concentrate and Oil-palm Fronds		Pakistan Journal of Nutrition, 2017, 16, 3, 1680-5194	http://eprints.unsri
4	Supplementation of Solid Ex-Decanter on		Pakistan Journal of Nutrition, 2015, 14, 11, 1680-5194	-

No	Judul Artikel	Peran (First author, Corresponding author, atau co-author)	Nama Jurnal, Tahun terbit, Volume, Nomor, P-ISSN/E-ISSN	URL artikel (jika ada)
	Performance of Cattle Fed Palm Fruit By- Products			
5	Palm Leaf Processing as Ruminant Feeds		Pakistan Journal of Nutrition, 2013, 12, 3, 1680-5194	www.pjbs.org/pjnonli
6	S and P Mineral Supplementation of Ammoniated Palm Leaves as Ruminant Feed		Pakistan Journal of Nutrition, 2013, 12, 10, 1680-5194	http://search.proque
7	Dry matter and macromineral disappearance of axonopus, pinnesetum purpureum and brachiare decumben in west sumatera, Indonesia		Stored product and postharvest research, 2011, 10, 10, 21410-6567	-
8	Dry matter and macro mineral disappearance of selected grass in West Sumatra, Indonesia	first author	Journal of Stored Products and Postharvest Research, 2011, 2, 5, 21410- 6567	http://www.academicj
9	Macro mineral distribution of forages in South Sumatra during rainy and dry seasons	first author	Journal of Food, Agriculture & Environment, 2006, 4, 2, , 2006, . 4, 2, Online ISSN: 1459-0263 Print ISSN: 1459-0255	www.world-food.net

No	Judul Artikel	Peran (First author, Corresponding author, atau co-author)	Nama Jurnal, Tahun terbit, Volume, Nomor, P-ISSN/E-ISSN	URL artikel (jika ada)
10	Micro mineral solubility of forages in South Sumatra, Indonesia	first author	Journal of Food, Agriculture & Environment – JFEA, 2006, 4, 2, 1459-0263	https://www.wtipubli
11	Comparative rumen degradability of some legume forages between wet and dry season in West Sumatra, Indonesia	first author	Asia Australasian Journal of animal Science, 2004, 17, 8, 1011-2367	https://www.ajas.inf
12	Seasonal changes in nutritive value of some grasses species in West Sumatera, Indonesia	first author	Asia Australasian Journal of animal Science, 2004, 17, 12, 1011-2367	https://www.ajas.inf
13	Study on nutritive value of tropical forages in North Sumatera, Indonesia	first author	Asia Australasian Journal of animal Science, 2004, 17, 11, 1011-2367	https://www.ajas.inf

Publikasi di Jurnal Nasional Terakreditasi Peringkat 1 dan 2

No	Judul Artikel	Peran (First author, Corresponding author, atau co-author)	Nama Jurnal, Tahun terbit, Volume, Nomor, P-ISSN/E-ISSN	URL artikel (jika ada)
----	---------------	--	---	------------------------

Prosiding seminar/konferensi internasional terindeks

No	Judul Artikel	Peran (First author, Corresponding author, atau co-author)	Nama Jurnal, Tahun terbit, Volume, Nomor, P-ISSN/E-ISSN	URL artikel (jika ada)
1	Bisozyme Effect on the growth of Elephant Grass (<i>Pennisetum Purpureum</i>) cv. Taiwan in Ultisol Soil For Second Harvesting	corresponding author	The 1 st InternASIONAL CONFERENCE ON ANIMAL PRODUCTION FOR FOOD SUSTAINABILITY (icapfs), 2018, , , 978-602-6953-42-1	http://conference.fat
2	Reclamation of Former coal mined land by Analysis of Fiber Fractions Digestibility of Elephant Grass (<i>Pennisetum Purpureum</i>) cv. Taiwan With Different Doses Nitrogen mixed Fungi Mycorrhizae of Arbuskula	first author	The 1 st InternASIONAL CONFERENCE ON ANIMAL PRODUCTION FOR FOOD SUSTAINABILITY (icapfs), 2018, , , 978-602-6953-42-1	http://conference.fat
3	Macro minerals (Ca, P, Mg and K) Concentration Mixed of Elephant Grass (<i>Pennisetum purpureum</i>) CV	first author	The 1 st InternASIONAL CONFERENCE ON ANIMAL PRODUCTION FOR FOOD	http://conference.fat

No	Judul Artikel	Peran (First author, Corresponding author, atau co-author)	Nama Jurnal, Tahun terbit, Volume, Nomor, P-ISSN/E-ISSN	URL artikel (jika ada)
	Taiwan and Legume Indigofera Zollingeriana with different doses of Nitrogen fertilizer		SUSTAINABILITY (icapfs), 2018, , , 978-602-6953-42-1	

Buku

No	Judul Buku	Tahun Penerbitan	ISBN	Penerbit	URL (jika ada)
----	------------	------------------	------	----------	----------------

Perolehan KI

No	Judul KI	Tahun Perolehan	Jenis KI	Nomor	Status KI (terdaftar/granted)	URL (jika ada)
1	FORMULASI RANSUM DOMBA DENGAN SUPLEMENTASI SELENIUM (Se) DAN VITAMIN E	2018	Paten Sederhana		Terdaftar	-
2	FORMULASI RANSUM DOMBA TERDIRI DARI RUMPUT LAPANGAN, KONSENTRAT LOKAL DENGAN SUPLEMENTASI SELENIUM (Se) DAN VITAMIN E	2018	Paten Sederhana		Terdaftar	-

No	Judul KI	Tahun Perolehan	Jenis KI	Nomor	Status KI (terdaftar/granted)	URL (jika ada)
3	FORMULASI RANSUM DOMBA TERDIRI DARI RUMPUT LAPANGAN, KONSENTRAT LOKAL DENGAN SUPLEMENTASI SELENIUM (Se) DAN VITAMIN E	2018	Paten Sederhana		Terdaftar	-

PENULIS 4



Nama Lengkap : **BOPALYON PEDI UTAMA, S.Pt., M.Si.**
Jenis Kelamin : Laki-Laki
Tempat Tgl Lahir : TJ. Pauh Mudik, Kerinci : 05-07-1988
Agama : Islam
Alamat Lengkap : Jln. Dr. Tazar RT.06/000 Kelurahan Buluran
Kenali Kecamatan Telanai Pura, Kota Jambi.
(KTP)
Perumahan Kayla 5 Blok D7 RT.18/RW.05
Kecamatan Rimbo Tengah Kabupaten Bungo
(Alamat Sekarang).
No Telepon/ HP/WA : 0852-6687-5555

Pendidikan

- a) SD /Sederajat Tahun : SD Negeri No. 162/VI Ngaol I Tahun 1994-2000
- b) SMP/Sederajat Tahun : SLTP Negeri 1 Tabir – Merangin Tahun 2000-2003
- c) SMA/Sederajat Tahun : SMU Negeri 1 Tabir Merangin 2003-2006
- d) Strata I
 - Nama Program Studi : Sosial Ekonomi Peternakan
 - Nama Fakultas : Peternakan
 - Nama Universitas : Universitas Jambi

Tahun Lulus : 2011
 Judul Skripsi : Studi Komperatif Aspek Ekonomis
 Dari Hasil Pemeliharaan Ternak Sapi
 Peserta Program Aksi Perbibitan Di
 Provinsi Jambi

e) Strata II

Nama Program Studi : Magister Ilmu Peternakan
 Konsentrasi : Sosial Ekonomi Peternakan/
 Agribisnis Peternakan
 Fakultas : Peternakan
 Nama Universitas : Universitas Jambi
 Tahun Lulus : 2016
 Judul Tesis : Neraca Perdagangan Komoditas
 Ternak Sapi Potong di Provinsi Jambi

Pangkat /Golongan Sekarang : Penata / III C
 Terhitung Mulai Tanggal : 01 Agustus 2021

Karya Tulis/ Jurnal /Buku /Tesis/ Disertasi

NO	JUDUL	TAHUN
1	KARAKTERISTIK SIFAT FISIK DAN KIMIA BUNGKIL KELAPA KERING DAN BUNGKIL KELAPA DIKUKUS	2019
2	ANALISIS KELAYAKAN FINANSIAL USAHA PETERNAKAN SAPI POTONG	2020
3	ANALISIS PENDAPATAN USAHA PETERNAKAN PUYUH "TERNAK JAYA FARM" DI DESA LUBUK KECAMATAN MANGGIS KABUPATEN BUNGO	2020
4	ANALISIS PENDAPATAN PENGGANTIAN SEBAGIAN RANSUM KOMERSIL DENGAN TEPUNG DAUN INDIGOFERA SP TERHADAP AYAM BROILER	2021
5	ANALISIS POTENSI WILAYAH PENGEMBANGAN TERNAK SAPI DI KECAMATAN PELEPAT ILIR KABUPATEN BUNGO	2021

Riwayat Jabatan

NO	NAMA JABATAN	TAHUN
1	Kasubbag TU Pusat Penjamin Mutu Internal	2018
2	Kasubbag TU Lembaga Penjamin Mutu Internal	2021
3		
4		
5		
6		
7		
8		
9		
10		

Muara Bungo, 26 April 2021

Yang Bersangkutan

Bopalyon Padi Utama, S.Pt., M.Si.
NIDN 1005078803

Kondisi lahan pasca tambang adalah tingginya logam berat yang dapat mengancam ekologi. Salah satu usaha pemulihan lahan bekas tambang adalah melalui teknologi fitoremediasi. Konsep teknologi fitoremediasi adalah memanfaatkan tanaman hijau sebagai agen perbaikan tanah. Teknologi pemanfaatan mikroorganisme dalam usaha bioremediasi dapat dilakukan. Salah satu yang dapat digunakan adalah fungi mikoriza arbuskula (FMA). Oleh karena itu buku ini menyajikan sedikit gambaran konsep fitoremediasi dengan pemanfaatan fungi mikoriza arbuskula dengan harapan dapat menjadi bagian referensi dan pencerahan kepada masyarakat luas.

Fitoremediasi Lahan Tambang Emas

Berbasis Fungi Mikoriza Arbuskula
untuk Pengembangan Hijauan

Penerbit Deepublish (CV BUDI UTAMA)

Jl. Kaliurang Km 9,3 Yogyakarta 55581

Telp/Fax : (0274) 4533427

Anggota IKAPI (076/DIY/2012)

✉ cs@deepublish.co.id

📘 Penerbit Deepublish

📱 @penerbitbuku_deepublish

🌐 www.penerbitdeepublish.com



Kategori : Lingkungan

ISBN 978-623-02-3794-2



9 786230 237942