

FUNGI  
MIKORIZA  
ARBUSKULA

Mempercepat Rehabilitasi  
Lahan Tambang

Suharno  
Rosye H.R. Tanjung  
Supeni Sufaati



GADJAH MADA UNIVERSITY PRESS

# PRAKATA

---

Puji dan syukur kami panjatkan ke hadirat Allah Swt., atas segala rahmat, taufik, dan hidayah-Nya sehingga kami dapat menyelesaikan buku ini sesuai target. Buku dengan judul *Fungi Mikoriza Arbuskula: Mempercepat Rehabilitasi Lahan Tambang* ini disusun dengan berbagai pertimbangan. Perkembangan industri pertambangan di Indonesia terjadi dengan pesat dan merata di hampir seluruh wilayah Indonesia sehingga perlu dilakukan *monitoring* dan evaluasi secara ketat untuk meminimalisasi kemungkinan terjadinya kerusakan lingkungan karena aktivitas tersebut. Banyak industri pertambangan yang mempunyai izin resmi (legal) dan dalam kendali pemerintah, tetapi tidak sedikit pula pertambangan yang dilakukan secara ilegal dan tanpa kendali pemerintah. Sesuai undang-undang yang berlaku, setiap pengusaha wajib mengendalikan lahan tambang maupun pascatambang dalam rehabilitasi. Rehabilitasi lahan dilakukan untuk mengembalikan rona atau penampakan suatu kawasan menjadi seperti semula atau setidaknya mirip dengan kondisi awal. Rehabilitasi juga dapat disesuaikan dengan perencanaan yang dibuat sebelum dilakukannya kegiatan penambangan. Sebelum dilakukan penambangan, pemrakarsa telah melakukan studi analisis mengenai dampak lingkungan. Dengan demikian, apabila telah habis masa kontraknya, rencana kegiatan atau aktivitas pascatambang dapat dilakukan dengan baik.

Di pihak lain, proses rehabilitasi membutuhkan waktu, tenaga, dan biaya yang cukup tinggi. Perkembangan bioteknologi dalam rehabilitasi lahan yang berkembang pesat diharapkan dapat berperan baik untuk kegiatan ini. Teknologi pemanfaatan mikroorganisme dalam rehabilitasi lahan dan bioremediasi dapat digunakan, termasuk pemanfaatan fungi mikoriza arbuskula (FMA). Oleh karena itu, dalam buku ini diberikan

sedikit gambaran tentang pemanfaatan FMA sehingga diharapkan dapat memberikan pencerahan kepada berbagai pihak.

Selain untuk pengetahuan umum, buku ini diterbitkan sebagai penunjang proses pembelajaran pada mata kuliah dasar sains di tingkat perguruan tinggi. Buku ini disusun agar dapat membantu mahasiswa untuk memperkaya pengetahuannya dalam perkuliahan, khususnya di bidang Ilmu Biologi Umum, Pengetahuan Lingkungan, Mikrobiologi Lingkungan, Mikologi, Fisiologi Tumbuhan, Ekofisiologi Tumbuhan, Taksonomi Fungi, Bioremediasi Lingkungan, Toksikologi Lingkungan, dan berbagai ilmu lain terkait. Walaupun demikian, buku ini tidak hanya dapat bermanfaat untuk kalangan mahasiswa, tetapi juga untuk berbagai organisasi pemerhati lingkungan, pencinta lingkungan, dan pelaku industri pertambangan. Atas pertimbangan itulah buku ini disusun berdasarkan kajian ilmiah, namun mudah dipahami oleh berbagai kalangan.

Terima kasih penulis sampaikan kepada para guru pembimbing kami, baik yang memberikan ilmu secara langsung maupun secara tidak langsung, termasuk melalui berbagai acara diskusi, baik formal maupun nonformal. Kepada rekan-rekan kami dari berbagai asosiasi, terima kasih atas masukan dan diskusi yang memberi kami inspirasi untuk menulis, khususnya kepada Asosiasi Mikoriza Indonesia (AMI-RI), Perhimpunan Mikologi Indonesia (Mikoina), Perhimpunan Biologi Indonesia (PBI), dan Masyarakat Biodiversitas Indonesia (MBI). Kepada pimpinan Universitas Cenderawasih, Dekan FMIPA Universitas Cenderawasih, dan rekan-rekan di Program Studi Biologi FMIPA Universitas Cenderawasih, yang telah mendukung penulisan buku ini, kami sampaikan terima kasih. Terima kasih pula kepada PT Freeport Indonesia atas segala dukungan selama kajian di lokasi tambang. Kepada penerbit UGM Press kami sampaikan terima kasih atas kepercayaan dan kesediaannya dalam menerbitkan buku ini.

Penulis menyadari bahwa buku ini belum tersusun dengan sempurna. Oleh karena itu, saran dan masukan sangat berharga sebagai koreksi guna penyempurnaan edisi berikutnya. Walaupun demikian, penulis tetap berharap semoga buku ini bermanfaat bagi para pembaca. Terima kasih.

Jayapura, Januari 2020

Penulis

# KATA PENGANTAR

## PERHIMPUNAN MIKOLOGI INDONESIA (MIKOINA)

Industri pertambangan merupakan salah satu pendorong ekonomi terbesar di Indonesia. Akan tetapi, industri ini juga merupakan salah satu sumber masalah lingkungan nasional yang cukup pelik untuk diatasi. Hilangnya tutupan vegetasi, pencemaran sumber air, *biodiversity loss* di area bekas tambang, serta degradasi fisik, kimia, dan biologis tanah merupakan sebagian dari masalah lingkungan akibat industri pertambangan. Berbagai usaha untuk memperbaiki produktivitas lahan bekas pertambangan telah banyak dilakukan, meliputi penggunaan teknologi remediasi berdasarkan teknik fisika-kimia, bioremediasi (penggunaan mikroorganisme), atau fitoteknologi (penggunaan vegetasi yang terkait dengan mikroorganisme simbiotik). Beberapa teknik tersebut cukup menjanjikan untuk dikembangkan dan diaplikasikan pada skala areal yang luas. Kombinasi antara fitoremediasi dan mikroremediasi menggunakan fungi mikoriza arbuskula (FMA) yang bersimbiosis dengan berbagai jenis tanaman dilaporkan oleh beberapa peneliti sangat berpotensi untuk diaplikasikan sebagai solusi ramah lingkungan yang berkelanjutan (*sustainable*).

Perkembangan teknik aplikasi FMA untuk remediasi lahan bekas tambang untuk menunjang pengelolaan lingkungan yang berkelanjutan di Indonesia masih memiliki beberapa kendala, salah satunya adalah kurangnya sumber buku acuan berbahasa Indonesia bagi mahasiswa, dosen, peneliti, industri pertambangan, dan praktisi lingkungan. Buku *Fungi Mikoriza Arbuskula: Mempercepat Rehabilitasi Lahan Tambang* ini telah membuka informasi dasar bagi mahasiswa, dosen, peneliti, industri pertambangan, dan praktisi lingkungan mengenai kondisi industri pertambangan di Indonesia dan dampak industri pertambangan terhadap berbagai ekosistem di Indonesia. Selain itu, teori-teori dasar mengenai FMA

dan perkembangannya, teknik mengenai cara isolasi dan identifikasi FMA, bagaimana FMA bersimbiosis dengan tanaman, bagaimana mekanisme FMA mampu menanggulangi masalah pencemaran tanah di lahan bekas tambang, dan bagaimana memperbanyak FMA dan mengaplikasikannya di lahan bekas tambang juga disajikan dengan cukup lengkap di dalam buku ini.

Diharapkan buku ini dapat disambut dengan baik di kalangan akademisi (mahasiswa dan dosen), peneliti, industri pertambangan, dan praktisi lingkungan di Indonesia sebagai bahan panduan untuk diaplikasikan di lapangan maupun sebagai bahan pelajaran di kampus-kampus, serta untuk merangsang inovasi lebih lanjut mengenai remediasi bekas lahan tambang menggunakan FMA sehingga tujuan pengelolaan lahan bekas tambang yang berkelanjutan di Indonesia dapat tercapai.

Cibinong, 30 Maret 2020

Dr. Iman Hidayat  
Ketua Perhimpunan Mikologi Indonesia (Mikoina)

# DAFTAR ISI

---

PRAKATA.....	V
KATA PENGANTAR.....	VII
PERHIMPUNAN MIKOLOGI INDONESIA (MIKOINA) .....	VII
DAFTAR ISI.....	IX
DAFTAR GAMBAR .....	XIII
DAFTAR TABEL.....	XIX
BAB I    PENDAHULUAN .....	1
BAB II    PERTAMBANGAN DI INDONESIA .....	5
A.    Ragam Pertambangan di Indonesia .....	5
B.    Dampak Kegiatan Pertambangan .....	6
C.    Dasar dan Kebijakan Menjaga Lingkungan .....	11
D.    Konsep Dasar Rehabilitasi Lahan Pertambangan Secara Ekologis.....	14
E.    Aspek Dasar dan Kebijakan .....	17
BAB III    REHABILITASI LAHAN TAMBANG .....	21
A.    Reklamasi Lahan Secara Mekanik .....	21
B.    Reklamasi Lahan Dengan Vegetasi .....	24
C.    Pentingnya Mikroorganisme dalam Reklamasi Lahan .....	28
D.    Mengenal Fungi Mikoriza .....	31
BAB IV    FUNGI MIKORIZA ARBUSKULA (FMA) .....	36
A.    Sejarah Perkembangan Penelitian FMA .....	37
B.    Karakteristik Umum FMA .....	40
1.    Hifa Ekstraradikal dan Intraradikal .....	41
2.    Struktur Arbuskula .....	42
3.    Struktur Vesikula .....	44

	4. Spora FMA .....	46
	C. Kedudukan Taksonomi FMA .....	48
BAB V	ISOLASI DAN IDENTIFIKASI FUNGI MIKORIZA ARBUSKULA .....	53
	A. Isolasi FMA .....	54
	1. Metode Pengamatan Keberadaan FMA .....	54
	2. Ekstraksi Spora FMA .....	59
	B. Pemurnian Isolat FMA .....	64
	C. Perbanyakkan Spora dan Propagul FMA .....	66
	D. Identifikasi Fungi Mikoriza Arbuskula .....	67
	1. Perkembangan Klasifikasi Keragaman FMA .....	67
	2. Dasar-dasar Identifikasi FMA .....	69
	3. Identifikasi secara Morfologi .....	69
	4. Identifikasi secara Molekuler .....	83
BAB VI	FMA DAN PERTUMBUHAN TANAMAN .....	97
	A. Hubungan FMA dan Tanaman .....	97
	B. Peran FMA dalam Pertumbuhan Tanaman .....	99
	C. Faktor-faktor yang Memengaruhi Perkembangan FMA .....	104
BAB VII	PENTINGNYA FMA DALAM REHABILITASI LAHAN .....	108
	A. FMA dan Pertumbuhan Tanaman dalam Rehabilitasi Lahan.....	108
	B. FMA dan Kontribusinya dalam Revegetasi Lahan ...	114
	C. FMA, Tumbuhan, dan Bahan Pencemar .....	115
	D. Uji Kompatibilitas dan Efektivitas Tanaman .....	117
BAB VIII	FMA, TANAMAN, DAN FITOREMEDIASI .....	121
BAB IX	FMA DAN MEKANISME FITOREMEDIASI .....	131
	A. Fungi Mikoriza Arbuskula dan Stabilisasi Tanah .....	131
	B. Stabilisasi Logam .....	134
	C. Mikorizoremediasi .....	136
	D. Hiperakumulasi Logam .....	137
	E. Mikorizosfer dan Fitoekstraksi Logam .....	139

	F.	Mikoriza dan Stabilisasi Logam .....	139
	G.	Mikoriza dan Fitovolatilisasi Logam .....	140
BAB X		PENYERAPAN LOGAM BERAT OLEH FMA .....	141
	A.	Penyerapan Logam Berat .....	141
	B.	Toleransi dan Adaptasi FMA pada Logam Berat .....	143
BAB XI		TEKNIK DASAR PRODUKSI DAN APLIKASI FMA ...	146
	A.	Produksi Inokulum FMA .....	146
	B.	Faktor-Faktor yang Memengaruhi Produksi Inokulum .....	159
	C.	Kontrol Kualitas Inokulum .....	161
	D.	Aplikasi FMA dalam Rehabilitasi Lahan .....	164
		DAFTAR PUSTAKA.....	167
		LAMPIRAN.....	183
		GLOSARIUM.....	211
		INDEKS .....	219
		PROFIL PENULIS .....	225





# DAFTAR GAMBAR

---

Gambar 1	Peta sebaran aktivitas tambang di dunia .....	6
Gambar 2	Salah satu perubahan permukaan lingkungan yaitu hilangnya lapisan permukaan dan struktur vegetasi di lingkungan sekitar aktivitas penambangan .....	7
Gambar 3	Salah satu kegiatan penambangan masyarakat yang berpotensi merusak lingkungan.....	8
Gambar 4	Gambaran perubahan permukaan lahan akibat aktivitas tambang dan hampan pasir sisa tambang ( <i>tailing</i> ) yang dialirkan melalui sungai .....	9
Gambar 5	Jumlah bendungan (dam) untuk pengendalian <i>tailing</i> dan tingkat kerusakannya di beberapa negara.....	10
Gambar 6	Hampan <i>tailing</i> dari aktivitas pertambangan emas di Timika, Papua.....	13
Gambar 7	Usaha penanganan pasir sisa tambang dengan revegetasi pada tanggul <i>tailing</i> .....	14
Gambar 8	Konsep utama sistem restorasi ekologis yang melibatkan mikrobial (FMA) dalam rehabilitasi lahan terdampak tambang .....	15
Gambar 9	Tanggul pembatas pergerakan aliran <i>tailing</i> setinggi 6 meter, sekaligus dimanfaatkan sebagai jalan/alat transportasi .....	21
Gambar 10	Revegetasi kawasan pengendapan <i>tailing</i> di <i>Modified Ajkwa Deposition Area</i> (ModADA) yang dilakukan di Timika, Papua.....	27

Gambar 11	Pendekatan yang disarankan untuk reklamasi dan remediasi ekosistem terganggu menggunakan bioteknologi mikrobia .....	28
Gambar 12	Pengelompokan mikoriza berdasarkan karakteristik morfologi kolonisasi pada akar tanaman.....	35
Gambar 13	Struktur umum yang dijumpai pada FMA yang menunjukkan adanya infeksi pada akar tanaman. S = spora, A = arbuskula, V = vesikula, HI = hifa intraradikal, HE = hifa ekstraradikal, Ap = Apresorium, dan E = epidermis akar.....	39
Gambar 14	Pertumbuhan hifa fungi yang mengkolonisasi akar <i>Trifolium subterraneum</i> dan mengalami perkembangan di dalam sel.....	41
Gambar 15	Keragaman arbuskula.....	42
Gambar 16	a) Mikroskopi dengan pewarnaan <i>fluorescent</i> terhadap aktivitas <i>asam fosfatase</i> pada akar tanaman <i>Plantago lanceolata</i> ; b) Dua buah arbuskula pada akar dengan pewarnaan <i>acid fuchsin</i> , diamati dengan <i>confocal laser scanning microscopy</i> ; c) Arbuskula pada akar <i>Smilacina racemosa</i> yang diwarnai dengan <i>chlorazol black E</i> .....	43
Gambar 17	A. Vesikula pada tanaman bawang merah ( <i>Allium</i> sp.); B. pada tanaman jagung manis ( <i>Zea mays</i> ); C. tanaman <i>Phyllanthus</i> sp.; D. tanaman <i>Polygonum cuspidatum</i> ; dan E. tanaman <i>Cirsium purpuratum</i> .....	45
Gambar 18	a. Vesikula <i>Glomus versiforme</i> pada akar <i>Allium porrum</i> ; b. pada akar tumbuhan <i>Fagopyrum esculentum</i> menunjukkan adanya mikrosklerotia (MS) (skala 25 $\mu$ m); c. genus <i>Scutellospora</i> membentuk struktur <i>auxillary cell</i> (AV) (skala 100 $\mu$ m); dan d. gambar skematis <i>auxillary cell</i> .....	45
Gambar 19	Pengelompokan fungi <i>Glomeromycota</i> , <i>Ascomycota</i> , dan <i>Basidiomycota</i> dalam suatu takson yang terlibat dalam simbiosis membentuk mikoriza.....	49

Gambar 20	Fosil spora <i>Glomeromycota</i> dari periode Ordovician era Paleozoic (skala 50 $\mu\text{m}$ ) .....	51
Gambar 21	Metode pengamatan kolonisasi FMA pada akar tanaman .....	56
Gambar 22	Metode perhitungan kolonisasi <i>gridline intersection</i> FMA pada akar tanaman .....	57
Gambar 23	Proses penyaringan bertingkat sampel tanah untuk memisahkan material berukuran besar dan spora FMA.	58
Gambar 24	Pengamatan hasil penyaringan spora FMA.....	58
Gambar 25	Metode penentuan titik sampling di lapangan. a. Contoh kawasan lokasi penelitian; b. Salah satu metode penentuan titik sampling; c. Titik sampling penelitian ..	59
Gambar 26	Cara penentuan titik sampling yang tidak tepat. Ket.: a. Contoh kawasan lokasi penelitian; b. Metode penentuan titik sampling yang tidak tepat .....	60
Gambar 27	Keragaman spora hasil ekstraksi dari lapangan .....	60
Gambar 28	<i>Trapping</i> FMA yang dilakukan dalam skala laboratorium memanfaatkan tanaman sorgum sebagai inang .....	64
Gambar 29	Peletakan spora tunggal pada akar tanaman inang. S = spora, AT = akar tanaman inang .....	65
Gambar 30	a. Tumbuhan <i>Desmodium heterocarpon</i> , dan <i>Sorghum bicolor</i> var <i>numbu</i> ; dan b. dan yang digunakan sebagai tumbuhan inang FMA.....	66
Gambar 31	Representasi pengelompokan <i>Glomeromycota</i> berdasarkan atas analisis morfologi dan molekuler. Ciri khas morfologi subseluler spora pada setiap genus .....	72
Gambar 32	Beberapa karakter yang dimiliki oleh genus FMA.....	73
Gambar 33	Kriteria penting dalam identifikasi FMA. a. perkembangan spora; b. susunan spora; c. ukuran dan bentuk spora .....	76
Gambar 34	Perkecambah dan karakteristik permukaan spora. a. perkecambah spora, b. lapisan dinding spora, c. warna spora .....	76

Gambar 35	a. reaksi pewarnaan spora dengan Melzer., b. tekstur permukaan spora .....	77
Gambar 36	Proses perkembangan selama pembentukan spora FMA .....	78
Gambar 37	Perbedaan tingkat hubungan antara DNA, RNA, protein, dan metabolit dengan teknik molekuler dalam studi organisme mikrobial tunggal atau pada tingkat komunitas .....	85
Gambar 38	Lokasi dan detail gen rDNA. IGS: <i>intergenic space</i> , SSU: <i>small subunit</i> , ITS: <i>internal transcribed spacer</i> , LSU: <i>large subunit</i> .....	86
Gambar 39	Alur kerja identifikasi FMA dengan teknik molekuler memanfaatkan spora sebagai sumber DNA .....	91
Gambar 40	Penskoran kolonisasi FMA (0–5) pada akar tanaman yang menunjukkan kategori kolonisasi .....	98
Gambar 41	Diagram skematik yang menjelaskan tentang metabolisme karbon organik (C), N, dan P pada proses simbiosis fungi mikoriza arbuskular.....	110
Gambar 42	Transpor nutrisi (unsur hara) tanaman melalui lintasan FMA dan peranan tanaman bagi pertumbuhan fungi. <i>Glc</i> : glukosa, <i>Fru</i> : fruktosa, <i>AA</i> : asam amino .....	111
Gambar 43	Respons pertumbuhan tanaman jagung yang diinokulasi FMA .....	119
Gambar 44	Gambaran umum peran FMA dalam menjangkau unsur hara dan bahan pencemar .....	122
Gambar 45	Peranan FMA dalam pembentukan agregasi dan sistem ekologi tanah .....	132
Gambar 46	Peran mikrobial (termasuk FMA) dalam bioremediasi logam berat.....	135
Gambar 47	Salah satu metode dalam produksi inokulum mikoriza	152

Gambar 48	Pengembangan strarter mikoriza pada tabung dan dapat dikembangkan dalam skala besar menggunakan kultur pot. Cara ini juga digunakan untuk meregenerasi mikoriza dalam jangka panjang.....	154
Gambar 49	Teknologi untuk membuat formulasi pupuk mikoriza dalam bentuk tablet dan bubuk yang dikemas lebih modern .....	158
Gambar 50	a. Salah satu produk pupuk mikoriza untuk tanaman berbunga. b. Pupuk mikoriza untuk tanaman pertanian dan tanaman berbunga.....	158
Gambar 51	Produksi spora FMA pada beberapa tanaman dengan perlakuan cahaya dan suhu.....	160
Gambar 52	Kolonisasi FMA pada beberapa jenis tanaman .....	160



# DAFTAR TABEL

---

Tabel 1	Fitur tanah terdegradasi dibandingkan ekosistem klimaks	3
Tabel 2	Konsentrasi lumpur dan pasta padat beberapa jenis tailing.....	9
Tabel 3	Karakteristik penting tipe mikoriza berdasarkan ciri-ciri simbiosisnya .....	33
Tabel 4	Status mikoriza dari empat kelompok besar tumbuhan terestrial .....	35
Tabel 5	Keragaman ukuran arbuskula dan hubungannya dengan struktur sel tumbuhan inang yang diinokulasi <i>Glomus fasciculatum</i> (rerata hingga satu siklus) .....	44
Tabel 6	Beberapa struktur FMA dan fungsinya .....	47
Tabel 7	Sebaran ukuran, model formasi, dan morfotipe spora dari berbagai genus FMA .....	48
Tabel 8	Perkiraan jumlah jenis FMA pada beberapa periode perkembangan waktu.....	67
Tabel 9	Karakteristik dasar dalam identifikasi berdasarkan ciri morfologi beberapa kelompok FMA hingga tingkat genus.....	70
Tabel 10	Klasifikasi <i>Glomeromycota</i> yang mengacu pada Schüßler & Walker (2010).....	74
Tabel 11	Detail perkembangan beberapa primer yang digunakan dalam studi menggunakan PCR dengan target kelompok FMA.....	87
Tabel 12	Penskoran untuk menunjukkan persentase kolonisasi FMA pada akar tanaman .....	98



Tabel 13	Tingkat kolonisasi (%) beberapa jenis tumbuhan uji .....	99
Tabel 14	Pengaruh inokulasi FMA pada tanaman <i>Manihot esculenta</i> .....	100
Tabel 15	Respons pertumbuhan tanaman terhadap total berat kering dan laju pertumbuhan relatif tanaman jagung yang diinokulasi FMA.....	118
Tabel 16	Keberadaan FMA dan kolonisasinya pada berbagai ragam lokasi pertambangan berdasarkan kajian literatur .....	124
Tabel 17	Peran miselium fungi dalam pembentukan agregat tanah dan stabilisasi .....	132
Tabel 18	Kelengkapan informasi data lapangan sebagai sumber koleksi FMA.....	147
Tabel 19	Tahapan penting yang melibatkan seleksi inokulan FMA.	148
Tabel 20	Karakteristik fungi yang penting dalam seleksi inokulan FMA.....	150
Tabel 21	Pengaruh sumber cahaya dan fotoperiode terhadap kolonisasi dan produksi spora pada tanaman <i>Sorghum sp.</i> yang diinokulasi <i>Glomus fasciculatus</i> .....	159
Tabel 22	Kandungan nutrien dalam suatu inokulum.....	162
Tabel 23	Standar MPN propagul dalam inokulum komersial .....	163