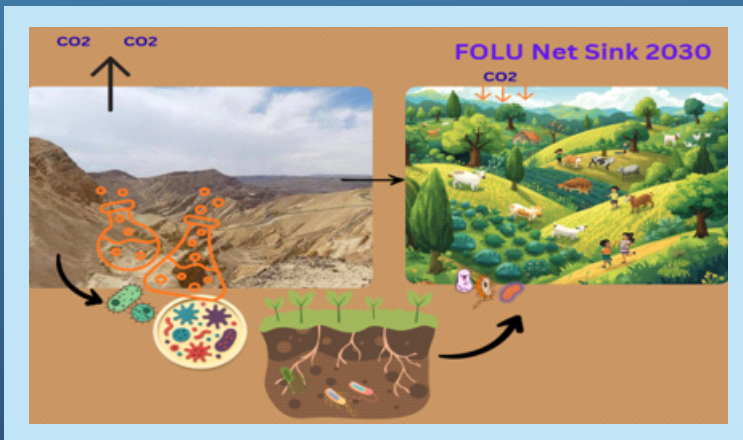


## ORASI ILMIAH: RISET DAN INOVASI

# OPTIMASI FUNGSI KOMUNITAS MIKROBA TANAH UNTUK RESTORASI LAHAN TERDEGRADASI DALAM Mendukung *FOLU NET SINK 2030*

## ORASI ILMIAH PROFESOR RISET ILMU KEHUTANAN BIDANG RESTORASI EKOSISTEM KEPAKARAN EKOLOGI MIKROBIOM DAN EKOLOGI RESTORASI



**ENNY WIDYATI**

**BADAN RISET DAN INOVASI NASIONAL**

**OPTIMASI FUNGSI KOMUNITAS MIKROBA  
TANAH UNTUK RESTORASI LAHAN  
TERDEGRADASI DALAM MENDUKUNG  
*FOLU NET SINK 2030***

Buku ini tidak diperjualbelikan.

Diterbitkan pertama pada 2026 oleh Penerbit BRIN

Tersedia untuk diunduh secara gratis: [penerbit.brin.go.id](http://penerbit.brin.go.id)



Buku ini di bawah lisensi Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International (CC BY-NC-SA 4.0).

Lisensi ini mengizinkan Anda untuk berbagi, mengopi, mendistribusikan, dan mentransmisi karya untuk penggunaan personal dan bukan tujuan komersial, dengan memberikan atribusi sesuai ketentuan. Karya turunan dan modifikasi harus menggunakan lisensi yang sama.

Informasi detail terkait lisensi CC BY-NC-SA 4.0 tersedia melalui tautan:  
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>



**MENUJU KETAHANAN KAWASAN  
PESISIR-PELABUHAN MELALUI INTEGRASI  
HIDRODINAMIKA, KECERDASAN  
BUATAN DAN INOVASI ADAPTIF**

**ORASI ILMIAH PROFESOR RISET  
ILMU KEHUTANAN  
BIDANG RESTORASI EKOSISTEM  
KEPAKARAN EKOLOGI MIKROBIOM  
DAN EKOLOGI RESTORASI**

**OLEH:  
APRIJANTO**

Penerbit BRIN

Buku ini tidak diperjualbelikan.

© 2026 Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN)  
Pusat Riset Ekologi, Organisasi Riset Hayati dan Lingkungan

Katalog dalam Terbitan (KDT)

Optimasi Fungsi Komunitas Mikroba Tanah untuk Restorasi Lahan Terdegradasi dalam Mendukung *FOLU Net Sink 2030*/Enny Widyati-Jakarta: Penerbit BRIN, 2026.

xvi + 93 hlm.; 14,8 x 21 cm

ISSN 3090-8485

- |  |                              |
|--|------------------------------|
| 1. Bioremediasi  | 2. <i>FOLU Net Sink 2030</i> |
| 3. <i>Microbial Ecosystem Engineering</i><br>(REKKOSMIK) | 4. Kecerdasan Buatan         |

631.45

*Copy editor* : Meita Safitri

*Proofreader* : Meita Safitri

Penata Isi : Meita Safitri

Desainer Sampul : Meita Safitri

Edisi pertama : Juni 2026



Diterbitkan oleh:

Penerbit BRIN, Anggota Ikapi  
Direktorat Repositori, Multimedia, dan Penerbitan Ilmiah  
Gedung B.J. Habibie Lt. 8, Jl. M.H. Thamrin No.8,  
Kb. Sirih, Kec. Menteng, Kota Jakarta Pusat,  
Daerah Khusus Ibukota Jakarta 10340

Whatsapp: +62 811-1064-6770

*E-mail*: [penerbit@brin.go.id](mailto:penerbit@brin.go.id)

*Website*: [penerbit.brin.go.id](http://penerbit.brin.go.id)

 PenerbitBRIN

 @Penerbit\_BRIN

 @penerbit.brin

## DAFTAR ISI

BIODATA RINGKAS .....	xi
PRAKATA PENGUKUHAN .....	xiii
I. PENDAHULUAN .....	1
II. DINAMIKA REHABILITASI LAHAN DI INDONESIA DAN PERMASALAHANNYA.....	5
A. Perkembangan IPTEK Rehabilitasi Lahan; Dinamika Masa Lalu, Kondisi Saat Ini, dan Arah Masa Depan.....	5
1. Perspektif Masa Lalu: Rehabilitasi Dimaknai Sebagai Penghijauan Lahan.....	6
2. Perspektif Masa Kini: Integrasi Teknologi Lingkungan dan Pendekatan Ekosistem .....	7
3. Perspektif Masa Depan: Restorasi Berbasis Sistem Cerdas dan Ekologi Terpadu.....	9
B. Faktor Penyebab Rendahnya Keberhasilan Rehabilitasi Lahan di Indonesia .....	9
1. Ameliorasi Tanah Belum Menjadi Fondasi Rehabilitasi.....	10
2. Ketidakesesuaian Jenis Tanaman dengan Kondisi Tapak ( <i>Species-Site Mismatch</i> ) .....	14
3. Produksi Bibit Tanaman Belum Dilengkapi Inovasi Inokulasi Mikroba.....	16
4. Keterbatasan Anggaran dan Ketidakefisienan Pendanaan.....	17
5. Pelibatan Masyarakat Sangat Terbatas.....	19
III. REKKOSMIK UNTUK RESTORASI LAHAN DAN <i>FOLU NET SINK 2030</i> .....	21
A. Peran Mikroba Tanah Sebagai Pendorong Keberhasilan Rehabilitasi Lahan Terdegradasi .....	21
1. Mikroba Tanah Sebagai Agen Bioremediasi dan Bioameliorasi.....	21

2. Mikroba Meningkatkan Ketahanan Bibit pada Kondisi Ekstrem.....	23
3. Mikroba Mendukung Efektivitas Fitoremediasi .....	23
B. Implikasi Hilangnya Vegetasi Terhadap Dinamika dan Fungsi Mikroba Tanah.....	24
1. Penebangan Mengganggu Komunitas Mikroba Rhizosfer ....	25
2. Monokulturisasi Mengubah Struktur Komunitas Mikroba ...	26
3. Penambangan Terbuka Menghancurkan Sistem Biologis Tanah .....	27
C. Relevansi Rehabilitasi Lahan Berbasis Mikroba Terhadap <i>FOLU Net Sink 2030</i> .....	29
D. Tantangan Implementasi, Strategi Akselerasi, dan Arah Riset Masa Depan.....	30
1. Tantangan Aplikasi Mikroba untuk Percepatan FOLU Net Sink 2030.....	31
2. Strategi Akselerasi Dalam Kerangka FOLU Net Sink 2030 .....	33
3. Arah Riset Masa Depan .....	35
IV. LANDASAN ILMIAH REKKOSMIK .....	37
Pilar 1. Teori Relasi Fungsional Tumbuhan-Mikrobiom dalam Adaptasi Lingkungan Ekstrem .....	38
Pilar 2. Keruntuhan Fungsi Mikroba Tanah sebagai Diagnosis Kegagalan Restorasi.....	40
Pilar 3. Inovasi Bioremediasi Air Asam Tambang Berbasis Bakteri Pereduksi Sulfat sebagai Solusi Tapak .....	41
Pilar 4. Model Rehabilitasi 3F ( <i>Food-Feed-Fuel</i> ) Berbasis Mikroba dan Bioekonomi Komunitas .....	43
V. KERANGKA STRATEGIS RESTORASI EKOSISTEM BERBASIS REKKOSMIK UNTUK <i>FOLU NET SINK 2030</i> .....	47
A. Jalur Kausal dan Kontribusi REKKOSMIK .....	48
B. Transformasi Paradigma Restorasi: dari Revegetasi Menuju Rekonstruksi Sistem Biologis Tanah .....	50

C. REKKOSMIK sebagai Instrumen Restorasi Lanskap dan Ketahanan Iklim .....	51
D. Integrasi Dalam Sistem Restorasi Ekosistem Nasional dan Bioekonomi Masyarakat.....	53
E. Implikasi Global dan Legacy Ilmiah REKKOSMIK.....	55
VI. KESIMPULAN .....	57
VII. PENUTUP.....	59
UCAPAN TERIMA KASIH .....	61
DAFTAR PUSTAKA.....	65
DAFTAR CAPAIAN DALAM BIDANG IPTEK, RISET, DAN INOVASI.....	73
DAFTAR RIWAYAT HIDUP .....	85

Buku ini tidak diperjualbelikan.

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1	Pohon masalah rehabilitasi lahan terdegradasi di Indonesia.....	2
Gambar 2.1	Lahan yang mengalami air asam tambang (atas), isolat <i>A. ferrooxidans</i> dari tanah bekas tambang (kanan bawah) dan isolat BPS yang diisolasi dari sludge (kiri bawah).....	13
Gambar 3.1	Dinamika komunitas mikroba rhizosfer dapat berubah karena hilangnya vegetasi.....	25
Gambar 5.1	Jalur kausal MEE dalam mendukung FOLU Net Sink 2030.....	49
Gambar 5.2	Diagram alur pengembangan REKKOSMIK untuk optimasi restorasi lahan terdegradasi dan capaian <i>FOLU Net Sink 2030</i> .....	54

Buku ini tidak diperjualbelikan.

## DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Penurunan ketersediaan logam (ppm) dalam tanah bekas tambang batubara dengan perlakuan ameliorasi.....	11
Tabel 2.2	Serapan logam dalam <i>Acacia crassicaarpa</i> (mg/g biomassa) dengan bantuan mikoriza.....	12
Tabel 3.1	Efisiensi perbaikan sifat tanah (%) <i>tailing</i> setelah 15 hari ameliorasi dengan sludge industry kertas.....	22
Tabel 3.2	Peningkatan pertumbuhan (%) dan serapan hara <i>Acacia crassicaarpa</i> pada tanah bekas tambang batubara....	32

Buku ini tidak diperjualbelikan.

## BIODATA RINGKAS



Dr. Dra. Enny Widyati lahir di Klaten pada 6 Mei 1968 merupakan anak ke-2 dari Bapak Soekarno Mardi Wikarno dan Ibu Sudarmi, menikah dengan Drs. Budi Hermansyah dikaruniai dua orang anak, yaitu Agam Noor Kharisma dan Bagus Pribadi.

Berdasarkan Keputusan Presiden Republik Indonesia Nomor 7/M 2020 tanggal 24 Januari 2020 yang bersangkutan diangkat sebagai Peneliti Ahli Utama dan berdasarkan Keputusan Presiden Republik Indonesia Nomor 10/M Tahun 2022 tanggal 16 Maret 2022 yang bersangkutan diangkat sebagai Peneliti Ahli Utama di Badan Riset dan Inovasi Nasional.

Berdasarkan Keputusan Kepala Badan Riset dan Inovasi Nasional Nomor 132/I/HK/2026 tanggal 25 Mei 2026 yang bersangkutan dapat melakukan orasi pengukuhan Profesor Riset.

Menamatkan Sekolah Dasar Negeri Trotok, tahun 1980, Sekolah Menengah Pertama Negeri Bayat, tahun 1983, dan Sekolah Menengah Atas Negeri I Klaten, tahun 1986. Memperoleh gelar Sarjana Biologi Lingkungan dari Universitas Gadjah Mada tahun 1991, dan gelar Doktor (*fast track*) bidang Ilmu Pengetahuan Kehutanan dari Institut Pertanian Bogor tahun 2006.

Mengikuti beberapa pelatihan yang terkait dengan bidang kompetensinya, antara lain: Landscape Function and People di Katsersart (2010), Optimizing Performance of Producer

Organization (Farmers) (2010), Pelatihan dan Sertifikasi Reviewer di BSD Banten (2014), Training on Reviewing Forestry Science to Policy di Salt Lake City, USA (2014) dan Pelatihan dan Sertifikasi Reviewer (advance) di BSD, Banten (2017).

Jabatan fungsional peneliti diawali sebagai Peneliti Pertama golongan III/a (2003), Peneliti Muda III/c (2008), Peneliti Madya IV/a (2011), dan memperoleh jabatan Peneliti Ahli Utama golongan IVd bidang Biologi Tanah dan Kesuburan Tanah tahun 2020.

Menghasilkan 57 karya tulis ilmiah (KTI),S baik yang ditulis sendiri maupun bersama penulis lain dalam bentuk buku, bagian dari buku, jurnal, dan prosiding. Sebanyak 21 KTI ditulis dalam bahasa Inggris. Menghasilkan 5 buah kekayaan intelektual dalam bentuk paten sederhana dan hak cipta.

Ikut serta dalam pembinaan kader ilmiah, yaitu sebagai pembimbing jabatan fungsional peneliti junior sebanyak 19 orang pada Balai Litbang Kehutanan Palembang, Aek Nauli, Makassar, Mataram, Pusat Riset Ekologi dan Ethnobiologi, dan Pusat Riset Hortikultura, pembimbing skripsi (S-1) sebanyak 21 orang pada Institut Pertanian Bogor, Universitas Pakuan, dan Universitas Brawijaya.

Aktif dalam organisasi profesi ilmiah, yaitu sebagai anggota PERMI (2002–2008), HITI (2002–2016), MKTI (2004–2012), Perhapi (2007–2014), MAFI (2011–2019) dan Himpenindo/PPI (2018–sekarang).

Menerima tanda penghargaan Satya Lencana Karya Satya X Tahun (2009), Satya Lencana Karya Satya XX Tahun (2020) dari Presiden Republik Indonesia.

## PRAKATA PENGUKUHAN

*Bismillaahirrahmaanirrahiim.*

*Assalaamu 'alaikum warahmatullaahi wabarakaatuh.*

*Salam sejahtera untuk kita semua.*

Majelis Pengukuhan Profesor Riset, Kepala Instansi yang mulia dan hadirin yang saya hormati.

Pertama-tama marilah kita panjatkan puji dan syukur ke hadirat Allah Swt. atas segala rahmat, nikmat, dan karunia-Nya sehingga dalam kesempatan ini kita dapat berkumpul dan bersama-sama hadir pada acara orasi ilmiah pengukuhan Profesor Riset di Badan Riset dan Inovasi Nasional.

Pada kesempatan yang berbahagia ini, dengan segala kerendahan hati, izinkan saya pada tanggal 24 Juni 2026 menyampaikan orasi ilmiah dengan judul:

"OPTIMASI FUNGSI KOMUNITAS MIKROBA TANAH  
UNTUK RESTORASI LAHAN TERDEGRADASI  
DALAM Mendukung *FOLU NET SINK 2030*"

Orasi ini merupakan refleksi dari perjalanan riset yang saya tekuni selama lebih dari dua dasawarsa dalam bidang ilmu tanah dan mikrobiologi tanah, khususnya dalam upaya pemulihan lahan terdegradasi. Pengalaman melakukan penelitian di berbagai tipe ekosistem, mulai dari lahan hutan alam hingga lahan pascatambang dengan kondisi ekstrem, memperlihatkan satu benang merah yang konsisten, bahwa keberhasilan restorasi tidak semata ditentukan oleh tanaman yang ditanam di permukaan tanah, melainkan oleh kehidupan yang bekerja di dalam tanah.

Orasi ini dibangun dari serangkaian temuan empiris yang menunjukkan bahwa degradasi lahan selalu diikuti oleh keruntuhan fungsi mikrobiologis tanah. Sebaliknya, pemulihan tanah hanya dapat berlangsung efektif ketika komunitas mikroba fungsional kembali berperan sebagai penggerak utama siklus hara, perbaikan struktur tanah, dan peningkatan ketahanan tanaman. Temuan-temuan tersebut mendorong perlunya perubahan paradigma dari rehabilitasi yang bersifat struktural menuju restorasi yang berbasis proses ekologis.

Berdasarkan sintesis berbagai hasil penelitian, orasi ini dirumuskan sebagai sebuah kerangka Microbial Ecosystem Engineering yaitu pendekatan rekayasa ekosistem berbasis mikrobioma tanah (selanjutnya disingkat REKKOSMIK) yang menempatkan komunitas mikroba sebagai inti strategi pemulihan tanah terdegradasi. REKKOSMIK dikembangkan untuk menjembatani kesenjangan antara hasil riset dan praktik lapangan, sehingga restorasi lahan tidak hanya bersifat simbolik, tetapi mampu menghasilkan pemulihan fungsi ekosistem yang berkelanjutan.

Sungguh besar harapan saya orasi ini dapat menjadi kontribusi ilmiah yang bermanfaat bagi pengembangan ilmu restorasi lahan, sekaligus menjadi pijakan konseptual bagi generasi peneliti berikutnya dalam merumuskan pendekatan restorasi yang lebih tepat, kontekstual, dan berbasis bukti ilmiah.

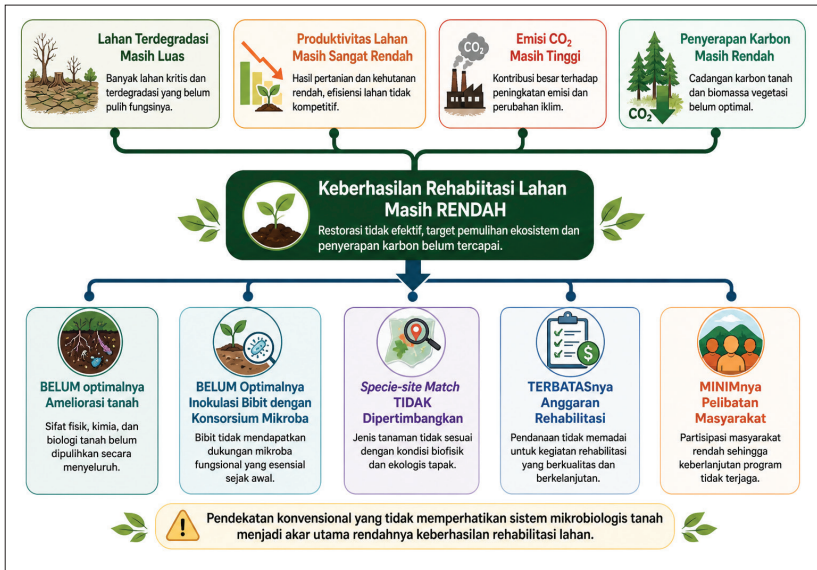
*Wassalaamu 'alaikum warahmatullaahi wabarakaatuh.*

## I. PENDAHULUAN

Selama lebih dari empat dekade, rehabilitasi lahan di Indonesia berlangsung dalam sebuah paradoks besar; jutaan bibit telah ditanam, tetapi pemulihan ekosistem belum berlangsung secara optimal. Sejak berdirinya Departemen Kehutanan tahun 1984, pemerintah menargetkan rehabilitasi seluas 18,7 juta ha. Namun capaian rehabilitasi rata-rata hingga saat ini masih berada di bawah 300.000 ha per tahun (Nawir, 2008). Hingga tahun 2023, Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan (KLHK) mencatat masih terdapat sekitar 14 juta ha hutan terdegradasi. Kondisi ini menunjukkan bahwa persoalan rehabilitasi lahan tidak semata terletak pada aspek penanaman, melainkan pada efektivitas pendekatan pemulihan ekosistem yang digunakan.

Dalam konteks perubahan iklim global, Indonesia memiliki peran yang strategis. Melalui *First Nationally Determined Contribution* (NDC), Indonesia menargetkan penurunan emisi gas rumah kaca sebesar 29% secara mandiri dan hingga 41% dengan dukungan internasional pada tahun 2030 (target direvisi menjadi lebih ambisius, masing-masing sebesar 31,89% dan 43,20% dalam *Enhanced NDC*) (UNFCCC, 2022). Indonesia menempatkan sektor *Forestry and Other Land Use* (FOLU) sebagai tulang punggung mitigasi emisi nasional, 60% kontribusi NDC tersebut ditargetkan berasal dari sektor FOLU (KLHK, 2022). Target ini kemudian diterjemahkan lebih operasional dalam bentuk agenda *FOLU Net Sink 2030*, yaitu kondisi ketika tingkat serapan karbon dari hutan dan lahan melampaui emisinya, dengan sasaran -140 Mt CO<sub>2</sub>e pada tahun 2030 dan meningkat menjadi -340 Mt CO<sub>2</sub>e pada tahun 2050 (KLHK, 2023).

Pencapaian target *FOLU Net Sink 2030* sangat bergantung pada kemampuan meningkatkan serapan karbon melalui rehabilitasi hutan, restorasi lahan terdegradasi, pengendalian deforestasi, serta pengelolaan hutan lestari. Dalam konteks ini, restorasi ekosistem tidak hanya berfungsi sebagai kegiatan pemulihan lingkungan, tetapi sebagai instrumen utama pengendali neraca karbon nasional. Namun demikian, capaian rehabilitasi yang masih rendah menunjukkan bahwa tantangan utama tidak terletak pada ketersediaan program, melainkan pada efektivitas pendekatan yang digunakan. Kondisi ini mengindikasikan adanya kesenjangan antara target makro *FOLU Net Sink 2030* dan praktik restorasi di tingkat tapak, yang berimplikasi langsung pada kemampuan Indonesia dalam mencapai target penurunan emisi secara keseluruhan.



Ilustrasi: Widyati (2026)

**Gambar 1.1** Pohon masalah rehabilitasi lahan terdegradasi di Indonesia

Permasalahan rehabilitasi lahan di Indonesia bersifat sistemik dan tidak berdiri pada satu faktor tunggal. Hubungan sebab akibat antar faktor kegagalan tersebut dapat dipetakan dalam bentuk pohon masalah sebagaimana diilustrasikan pada Gambar 1.1. Gambar ini memperlihatkan bahwa kegagalan rehabilitasi tidak hanya dipengaruhi oleh keterbatasan teknis penanaman, tetapi berakar pada pendekatan yang mengabaikan fungsi mikrobiologis tanah sebagai fondasi pemulihan ekosistem.

Berbagai hasil penelitian menunjukkan bahwa pendekatan berbasis mikroba memiliki potensi besar dalam mempercepat pemulihan ekosistem terdegradasi. Penelitian Widyati (2006; 2007a; 2007b; 2008; 2009), Widyati et al. (2016; 2017; 2019; 2022a, 2022b; 2023; 2024; 2025), serta Kumar et al. (2024) menunjukkan bahwa bioameliorasi dan rekayasa mikrobiologis mampu memperbaiki sifat kimia dan biologi tanah, menekan toksisitas logam berat, meningkatkan efisiensi serapan hara, serta memperkuat ketahanan tanaman terhadap kondisi lingkungan ekstrem. Kombinasi ameliorasi tanah dengan inokulasi konsorsium mikroba asosiatif juga terbukti meningkatkan pertumbuhan dan tingkat hidup tanaman melalui perbaikan fisiologi akar dan aktivasi proses enzimatik tanah. Temuan-temuan tersebut menegaskan bahwa pemulihan lahan terdegradasi tidak dapat dipisahkan dari pemulihan sistem mikrobiologis tanah.

Walaupun demikian, penerapan teknologi berbasis mikroba pada skala nasional masih menghadapi berbagai tantangan, antara lain keragaman kondisi biofisik lahan, keterbatasan teknologi formulasi dan *delivery system*, serta belum optimalnya integrasi antara pengetahuan ilmiah, kebijakan, dan praktik rehabilitasi di lapangan. Kondisi ini menunjukkan adanya kesenjangan antara perkembangan ilmu mikrobiologi tanah dengan implementasi restorasi ekosistem secara operasional.

Berdasarkan kesenjangan tersebut, orasi ini mengajukan suatu kerangka konseptual yang disebut *Microbial Ecosystem Engineering*, yaitu pendekatan rekayasa ekosistem berbasis mikrobioma tanah (selanjutnya disingkat REKKOSMIK) untuk mendukung restorasi lahan terdegradasi dan pencapaian target FOLU Net Sink 2030. Dalam kerangka ini, mikrobioma tanah tidak diposisikan sekadar sebagai input biologis, melainkan sebagai fondasi rekayasa ekosistem yang mengintegrasikan fungsi bioremediasi, biofertilisasi, bioameliiorasi, dan bioproteksi dalam satu kesatuan sistem ekologis.

Secara ilmiah, kebaruan utama REKKOSMIK terletak pada reposisi rehabilitasi lahan dari pendekatan vegetatif menuju rekayasa sistem biologis tanah yang terintegrasi. Pendekatan ini menempatkan mikrobioma tanah sebagai penggerak utama pemulihan fungsi ekosistem, sehingga restorasi tidak hanya berorientasi pada pertumbuhan tanaman, tetapi juga pada pemulihan proses ekologis yang menopang keberlanjutan ekosistem dalam jangka panjang.

Orasi ini selanjutnya akan menguraikan secara sistematis: I. Pendahuluan; II. Dinamika Rehabilitasi Lahan di Indonesia dan Permasalahannya; III. REKKOSMIK untuk Restorasi Lahan dan *FOLU NET SINK 2030*; IV. Landasan Ilmiah REKKOSMIK; V. Kerangka Strategis Restorasi Ekosistem Berbasis REKKOSMIK; VI. Kesimpulan; VII. Penutup.

## II. DINAMIKA REHABILITASI LAHAN DI INDONESIA DAN PERMASALAHANNYA

Degradasi hutan dan lahan merupakan salah satu tantangan ekologis terbesar yang dihadapi Indonesia pada abad ke-21. Deforestasi, pertambangan terbuka, kebakaran hutan, konversi lahan, dan tekanan pembangunan telah menyebabkan penurunan fungsi ekologis tanah, hilangnya biodiversitas, penurunan produktivitas lahan, serta meningkatnya emisi gas rumah kaca. Dalam konteks tersebut, rehabilitasi dan restorasi lahan tidak lagi dapat dipandang sekadar sebagai kegiatan penanaman pohon, tetapi harus dimaknai sebagai upaya pemulihan kembali fungsi ekosistem secara menyeluruh.

Dalam perjalanan sejarahnya, perkembangan ilmu pengetahuan dan teknologi (IPTEK) rehabilitasi lahan mengalami perubahan paradigma yang sangat signifikan. Transformasi tersebut bergerak dari pendekatan penghijauan sederhana menuju pendekatan restorasi berbasis sistem ekologis terpadu yang mengintegrasikan aspek biologis, sosial, teknologi digital, dan mitigasi perubahan iklim.

### A. Perkembangan IPTEK Rehabilitasi Lahan; Dinamika Masa Lalu, Kondisi Saat Ini, dan Arah Masa Depan

Perkembangan ilmu pengetahuan dan teknologi (IPTEK) rehabilitasi lahan di Indonesia mengalami pergeseran paradigma yang berlangsung secara dinamis seiring meningkatnya kompleksitas degradasi lingkungan, serta perubahan kebutuhan pembangunan nasional dan global. Pendekatan rehabilitasi yang pada awalnya bersifat sederhana dan berorientasi pada pemulihan tutupan

lahan secara bertahap berkembang menuju pendekatan yang lebih terpadu, adaptif, dan berorientasi pada keberlanjutan fungsi ekosistem. Transformasi tersebut menunjukkan bahwa rehabilitasi lahan tidak lagi dipahami semata sebagai kegiatan teknis penanaman, tetapi sebagai bagian dari upaya pengelolaan ekosistem yang terus berkembang mengikuti kemajuan IPTEK dan tantangan lingkungan. Secara lebih rinci, perkembangan IPTEK rehabilitasi lahan di Indonesia dapat dipahami melalui tiga fase utama, yaitu: (1) paradigma rehabilitasi lahan pada masa lalu, (2) perkembangan dan kondisi rehabilitasi lahan pada masa kini, serta (3) arah masa depan rehabilitasi lahan berbasis inovasi dan keberlanjutan ekosistem.

## **1. Perspektif Masa Lalu: Rehabilitasi Dimaknai Sebagai Penghijauan Lahan**

Program rehabilitasi hutan dan lahan di Indonesia berkembang sejak era penghijauan dan reboisasi pada dekade 1970–1980-an. Pendekatan pada periode tersebut berangkat dari paradigma bahwa kerusakan lahan dapat dipulihkan terutama melalui penanaman kembali vegetasi penutup tanah. Program nasional seperti Penghijauan, Reboisasi, Gerakan Gandrung Tatangkalan (Rakgantang), Gerakan Nasional Rehabilitasi Hutan dan Lahan (GERHAN), penanaman sejuta pohon, dan penanaman satu miliar pohon menjadi simbol utama pendekatan rehabilitasi pada masa tersebut (Hermawan et al., 2016).

Keberhasilan rehabilitasi pada era ini umumnya diukur berdasarkan jumlah bibit yang ditanam, luas areal tertanam, serta persentase hidup tanaman pada tahun-tahun awal. Pendekatan tersebut menghasilkan peningkatan tutupan vegetasi pada beberapa lokasi, namun sering gagal membangun ekosistem yang stabil dalam jangka panjang. Banyak kawasan rehabilitasi

mengalami mortalitas tanaman yang tinggi, pertumbuhan lambat, dan degradasi ulang setelah program berakhir.

Kondisi tersebut menunjukkan bahwa rehabilitasi lahan tidak cukup dilakukan hanya melalui intervensi vegetatif. Pendekatan masa lalu cenderung mengabaikan fungsi biologis tanah, terutama peran komunitas mikroba dalam menjaga siklus hara, dekomposisi bahan organik, pembentukan agregat tanah, dan stabilisasi karbon tanah.

Keterbatasan tersebut tercermin dari capaian rehabilitasi nasional yang masih rendah. Hingga tahun 2004, luas hutan terdegradasi di Indonesia mencapai sekitar 43,6 juta hektar, sementara target rehabilitasi sebesar 18,7 juta hektar hanya mampu direalisasikan kurang dari 300.000 ha per tahun (Nawir, 2008). Fakta ini menunjukkan bahwa pendekatan rehabilitasi berbasis penghijauan semata belum mampu menjawab kompleksitas degradasi ekosistem.

## **2. Perspektif Masa Kini: Integrasi Teknologi Lingkungan dan Pendekatan Ekosistem**

Memasuki periode 2005–2025, paradigma rehabilitasi mulai mengalami perubahan menuju pendekatan berbasis ekosistem. Pada fase ini, perhatian tidak lagi hanya berfokus pada penanaman pohon, tetapi juga mulai mempertimbangkan kualitas bibit, kesesuaian jenis tanaman dengan kondisi tapak, konservasi tanah dan air, serta aspek sosial-ekonomi masyarakat.

Konsep rehabilitasi berbasis lanskap, rehabilitasi DAS, restorasi gambut, restorasi mangrove, dan rehabilitasi pascatambang mulai berkembang secara lebih luas. Berbagai pendekatan bioteknologi lingkungan juga mulai diperkenalkan, termasuk bioremediasi, bioameliorasi, biofertilisasi, dan fitoremediasi.

Meskipun demikian, berbagai permasalahan mendasar masih tetap muncul. Banyak lahan rehabilitasi memiliki kondisi edafik ekstrem, seperti pH sangat masam, kandungan logam berat tinggi, bahan organik rendah, kapasitas tukar kation rendah, dan rendahnya biodiversitas mikroba tanah. Dalam kondisi tersebut, tanaman sulit bertahan meskipun menggunakan bibit unggul.

Dalam konteks ini, teknologi bioremediasi mulai diperkenalkan sebagai solusi alternatif, khususnya untuk penanganan pencemaran spesifik seperti tumpahan minyak dan limbah hidrokarbon (Dewi et al., 2025). Meskipun efektif pada kasus tertentu, penerapan bioremediasi masih terbatas, bersifat sektoral, dan belum terintegrasi secara sistemik dalam program restorasi lahan nasional. Akibatnya, selama dekade 2015–2024, Indonesia baru mampu melakukan rehabilitasi hutan dan lahan secara total seluas sekitar 2 juta hektar ([www.kehutanan.go.id](http://www.kehutanan.go.id), 2025). Selain itu, pendekatan restorasi masih cenderung bersifat proyek jangka pendek, terbatasnya pemantauan jangka panjang, dan minimnya integrasi data ekologis, sosial, dan ekonomi. Akibatnya, terdapat kesenjangan antara keberhasilan administratif dan keberhasilan ekologis.

Penelitian serupa juga ditunjukkan pada skala global, di mana keberhasilan rehabilitasi lahan terdegradasi sangat ditentukan oleh pemulihan kesehatan tanah melalui integrasi komunitas mikroba fungsional (Kumar et al., 2023). Pendekatan mikrobiologis terbukti memperbaiki siklus hara, stabilitas tanah, ketahanan tanaman, serta akumulasi karbon tanah, sehingga restorasi tidak lagi efektif tanpa rekayasa mikrobiom terintegrasi (van der Heijden et al., 2008; Kumar et al., 2023). Dengan demikian, rehabilitasi lahan mulai dipahami sebagai proses pemulihan sistem biologis tanah, bukan sekadar pemulihan tutupan vegetasi.

### **3. Perspektif Masa Depan: Restorasi Berbasis Sistem Cerdas dan Ekologi Terpadu**

Pada masa depan, restorasi lahan akan bergerak menuju pendekatan yang lebih presisi, adaptif, dan berbasis sistem ekologis terpadu. Integrasi kecerdasan buatan (*artificial intelligence*), *remote sensing*, Internet of Things (IoT), bioinformatika, metagenomik, dan rekayasa mikrobiom akan menjadi fondasi baru restorasi ekosistem.

Pendekatan restorasi masa depan tidak lagi hanya menjawab persoalan vegetasi, tetapi juga harus mampu menjawab tantangan perubahan iklim, ketahanan pangan, ketahanan energi, ketahanan air, dan kesejahteraan masyarakat.

Dalam konteks tersebut, *Microbial Ecosystem Engineering* (REKKOSMIK) menjadi paradigma baru yang menempatkan mikrobiom tanah sebagai fondasi utama pemulihan ekosistem. Melalui pendekatan ini, rehabilitasi lahan diarahkan pada rekayasa sistem biologis tanah melalui optimasi komunitas mikroba fungsional.

Pendekatan REKKOSMIK mengintegrasikan: bioameliorasi, bioremediasi, biofertilisasi, bioproteksi, serta rekayasa komunitas mikroba berbasis fungsi ekologi.

Dengan demikian, restorasi tidak lagi dipandang sebagai kegiatan penanaman semata-mata, tetapi sebagai proses pemulihan sistem ekologis yang melibatkan interaksi tanah, mikroba, vegetasi, air, dan masyarakat secara terpadu.

#### **B. Faktor Penyebab Rendahnya Keberhasilan Rehabilitasi Lahan di Indonesia**

Meskipun berbagai program rehabilitasi telah dilaksanakan selama lebih dari empat dekade, tingkat keberhasilannya masih

relatif rendah. Hal ini menunjukkan bahwa kegagalan rehabilitasi lahan di Indonesia bukan disebabkan oleh satu faktor tunggal, melainkan merupakan persoalan multidimensional yang bersifat sistemik.

## 1. Ameliorasi Tanah Belum Menjadi Fondasi Rehabilitasi

Salah satu penyebab utama rendahnya keberhasilan rehabilitasi adalah belum optimalnya perbaikan kualitas tanah sebagai fondasi awal pemulihan ekosistem. Sebagian besar program rehabilitasi masih menempatkan tanah hanya sebagai media fisik untuk tumbuh tanaman, bukan sebagai sistem biologis hidup. Akibatnya, banyak kegiatan rehabilitasi dilakukan tanpa memperbaiki kondisi tanah yang mengalami pemadatan, pencucian hara, erosi, kemasaman ekstrem, serta kontaminasi logam berat, misalnya pada lahan bekas tambang.

Tanah bekas tambang batubara memiliki kepadatan tinggi, porositas sangat rendah, kapasitas tukar kation (KTK) dan kejenuhan basa rendah, kandungan unsur hara makro sangat rendah, tetapi kandungan logam sangat tinggi (Widyati, 2006). Teknologi ameliorasi menggunakan *sludge* industri kertas dengan dosis 50% meningkatkan ketersediaan N, P, K, Ca, Mg pada tanah bekas tambang batubara (Widyati, 2008), menurunkan toksisitas Fe, Mn, Zn, Cu (Widyati, 2006), serta menurunkan Cr dan sianida pada *tailing* emas (Widyati, 2012a). *Sludge* juga menurunkan kepadatan tanah, meningkatkan pH, KTK, kejenuhan basa (KB), porositas dan kapasitas menahan air (Widyati, 2006). Secara mikrobiologis, *sludge* mengandung

bakteri pereduksi sulfat (BPS) (Widyati, 2006; 2007b; 2011), sehingga dapat digunakan untuk bioremediasi.

Bahan organik dan mikroba dalam topsoil dapat menurunkan kandungan logam pada tanah bekas tambang batubara (Tabel 2.1). Adapun *sludge* yang mengandung bahan organik dan BPS memberikan hasil paling baik dalam mereduksi logam-logam dalam tanah bekas tambang batubara. Kondisi ini dapat memfasilitasi tanaman *Acacia crassicaarpa* untuk tumbuh dengan baik pada lahan tersebut dan dapat berfungsi sebagai tanaman fitoremediasi (Widyati, 2012b). Inokulasi dengan mikoriza dapat memperbaiki fungsi tersebut (Tabel 2.2), dapat meningkatkan serapan logam dalam jaringan tumbuhan tanpa menunjukkan gejala keracunan. Kombinasi ameliorasi dengan inokulasi konsorsium mikroba asosiatif terbukti meningkatkan keberhasilan tumbuh tanaman melalui perbaikan fisiologi akar, peningkatan serapan hara, serta aktivasi proses enzimatik tanah (Widyati, 2006; 2007b; 2011; 2018; Widyati et al., 2022a; 2025; Kumar et al., 2024). Temuan-temuan tersebut menegaskan bahwa pemulihan lahan terdegradasi tidak dapat dipisahkan dari pemulihan sistem mikrobiologis tanah.

**Tabel 2.1** Penurunan ketersediaan logam (ppm) dalam tanah bekas tambang batubara dengan perlakuan ameliorasi

Perlakuan	Fe	Mn	Zn	Cu
Kontrol ( <i>standart operating procedure/SOP</i> )	315 (a)	153 (b)	53 (a)	8,75 (a)
Top soil 50% (v/v)	97 (b)	298 (a)	36 (b)	6,04 (b)
Sludge 50% (v/v)	14 (c)	79 (c)	12 (c)	1,30 (c)

Sumber: Widyati (2006)

**Tabel 2.2** Serapan logam dalam *Acacia crassicarpa* (mg/g biomassa) dengan bantuan mikoriza

Perlakuan	Fe		Mn		Zn		Cu	
	Non	Mik.	Non	Mik.	Non	Mik.	Non	Mik.
Kontrol (SOP)	15303	13402	3674	3760	3176	2231	179	448
Top soil (50% v/v)	19575	11233	3569	3451	4578	2689	829	321
Sludge (50% v/v)	18533	18387	2157	3599	4621	5985	130	699

Sumber: Widyati (2012b)

Kegiatan rehabilitasi lahan bekas tambang akan menjadi makin berat apabila pada tanah tersebut terjadi fenomena air asam tambang (AAT). AAT ditandai dengan air berwarna merah jingga (Gambar 2.1.) dan penanganannya selama ini lebih fokus pada air limpasan, bukan sumber batuan pembentuk AAT. Pendekatan seperti penetralan dengan kapur hanya bersifat sementara dan mahal (Widyati et al., 2023; Fiqa et al., 2025). Penanganan sumber AAT meliputi pengendalian oksigen, penutupan batuan reaktif, dan *bio-passivation*, yakni pembentukan lapisan biologis yang menghambat kontak batuan sulfida dengan oksigen dan air. Tanpa mengelola sumber oksidasi, AAT akan terus terbentuk dan menghambat rehabilitasi ekosistem.

Inovasi bioremediasi AAT telah diuji menggunakan BPS yang diisolasi dari *sludge* pabrik kertas yang berasal dari endapan lumpur instalasi pengolahan air limbah (IPAL) (Widyati et al., 2005c; 2006; 2011) maupun *sludge* sebagai bahan organik (Widyati, 2007b). *Sludge* dari pabrik kertas dengan dosis 50% (v/v) mampu mereduksi sulfat hingga 72% dan menaikkan pH menjadi 6,6 pada tanah AAT (Widyati, 2006), serta menurunkan



Foto: Widyati (2006)

**Gambar 2.1** Lahan yang mengalami air asam tambang (atas), isolat *A. ferrooxidans* dari tanah bekas tambang (kanan bawah) dan isolat BPS yang diisolasi dari sludge (kiri bawah)

cemaran logam secara signifikan (Widyati, 2006; Widyati, 2008). *Sludge* dari pabrik kertas juga menurunkan cemaran logam berat pada lumpur *tailing* emas (Widyati, 2012). Bioremediasi dengan *sludge* juga dapat berperan sebagai biostimulasi, karena dapat menekan pertumbuhan populasi bakteri kelompok kemolithotrof (tidak dapat hidup ketika ada bahan organik) *Acidithiobacillus ferrooxidans*, biokatalis utama pembentuk AAT. Penambahan 10% bahan organik menghambat pertumbuhan *A. ferrooxidans* secara signifikan (Widyati & Hazra, 2008).

Bioremediasi adalah proses pemulihan cemaran menggunakan aktivitas makhluk hidup, umumnya kelompok mikroba. Proses yang dilakukan dapat berupa biostimulasi atau bioaugmentasi (Widyati et al., 2024b). Biostimulasi dilakukan dengan menambah sumber energi/nutrisi untuk merangsang mikroba lokal yang berperan dalam remediasi (Widyati, 2007b). Bioaugmentasi adalah penambahan mikroba fungsional hasil seleksi dari tanah tercemar. Kombinasi keduanya terbukti efektif mempercepat pemulihan ekosistem, baik pada lahan tambang batubara (Widyati, 2006; 2007a; 2007b; 2008; 2009; 2011) maupun *tailing* emas (Widyati, 2012).

Regulasi bioremediasi di Indonesia masih terbatas pada pencemaran minyak (Kepmen LH 128/2003), belum ada yang khusus mengatur bioremediasi lahan bekas tambang. Keberhasilan bioremediasi lahan bekas tambang sangat bergantung pada kondisi tapak, kesesuaian mikroba, dan *monitoring* berkala. Fitoremediasi menggunakan *Acacia crassicarpa* juga terbukti efektif menurunkan konsentrasi logam pada tanah tambang batubara (Widyati, 2007b), tetapi memerlukan ameliorasi awal yaitu dengan sludge sebagai sumber bahan organik (Widyati, 2006). Konsorsium mikroba meningkatkan efektivitas fitoremediasi (Widyati, 2009b). Bukti empiris (Widyati 2005; 2006; 2007a; 2007b; 2008; 2009; 2010; 2011; 2012) menegaskan bahwa bioameliorasi dan bioremediasi harus menjadi pondasi awal rehabilitasi.

## **2. Ketidaksesuaian Jenis Tanaman dengan Kondisi Tapak (*Species-Site Mismatch*)**

Kegagalan rehabilitasi juga sering dipicu oleh pemilihan jenis tanaman yang tidak sesuai dengan kondisi tapak. Pendekatan rehabilitasi di Indonesia masih sering menggunakan jenis ta-

naman secara seragam tanpa mempertimbangkan kondisi tanah, elevasi, curah hujan, iklim mikro, serta kesesuaian ekologis. Evaluasi program GERHAN 2003–2006 menunjukkan tingkat keberhasilan rehabilitasi hanya berkisar 20-40%, salah satunya akibat penggunaan jenis tanaman yang tidak adaptif terhadap kondisi tapak (Badan Litbang Kehutanan, 2009). Hal ini karena secara ekologis, setiap jenis tanaman memiliki pola eksudat akar yang berbeda, sehingga menentukan struktur komunitas mikroba rhizosfer yang terbentuk. Ketika tanaman tidak adaptif, interaksi simbiosis dengan mikroba tanah terganggu sehingga tanaman gagal berkembang secara optimal.

Secara ilmiah, kesalahan pemilihan jenis tanaman dapat memperburuk cekaman lingkungan terhadap pertumbuhan tanaman, menurunkan pertumbuhan akar dan penyerapan hara, serta meningkatkan kerentanan terhadap penyakit tular tanah. Hairiah et al. (2011) menunjukkan bahwa produktivitas sengon turun 40% pada tanah pH < 4,5. Siswadi (2017) melaporkan kematian jabon 60% pada tanah pasir miskin hara. Banyak jenis tanaman *mandatory* gagal bersimbiosis dengan mikroba tempatan sehingga bibit gagal beradaptasi pada tahun pertama.

Sesungguhnya regulasi terkait pemilihan jenis tanaman untuk rehabilitasi hutan dan lahan sudah tersedia seperti Permenhut P.70/2011, PermenLHK P.105/2018, dan Rencana Kehutanan Tingkat Nasional (RKTN) 2011–2030. Tetapi implementasi di lapangan masih rendah, sekitar 60% unit pelaksana memilih jenis tanaman berdasarkan ketersediaan bibit, bukan kesesuaian ekologi (KLHK, 2020). Selain itu, belum ada *database* nasional *species-site suitability*, sehingga implementasi di lapangan tidak terencana. Secara ekologi tanah, setiap jenis tanaman memiliki eksudat akar berbeda yang membentuk struktur komunitas mikroba. Ketika jenis tanaman tidak adaptif, simbiosis seperti Fungi

Mikoriza Arbuskula (FMA) terganggu; Widyati (2018) mencatat penurunan FMA hingga 70% yang menurunkan penyerapan fosfor dan ketahanan tanaman. *Species-site mismatch* menghambat adaptasi bibit tanaman di lapangan, pemulihan siklus hara dan fungsi ekologis. Karena itu, rehabilitasi seharusnya berbasis pada pendekatan *species-site suitability* yang terintegrasi dengan ekologi mikroba tanah.

### 3. Produksi Bibit Tanaman Belum Dilengkapi Inovasi Inokulasi Mikroba

Sebagian besar produksi bibit rehabilitasi di Indonesia masih berfokus pada kualitas morfologis bibit, sementara aspek biologis tanah dan simbiosis mikroba belum menjadi bagian integral. Padahal berbagai kelompok mikroba seperti: fungi mikoriza arbuskula (FMA), *Rhizobium*, *plant growth-promoting rhizobacteria* (PGPR), bakteri pelarut fosfat (BPP), dan aktinomisetes, memiliki peran penting dalam meningkatkan ketahanan tanaman terhadap cekaman lingkungan. Penelitian menunjukkan bahwa inokulasi konsorsium FMA, *Rhizobium*, dan bakteri pelarut fosfat mampu meningkatkan pertumbuhan *Acacia crassicarpa* hingga lebih dari 300% pada lahan pasca-tambang (Widyati, 2007a; 2008).

Namun efektivitas konsorsium bergantung pada kompatibilitas strain; Kurniaty et al. (2013) menunjukkan bahwa inokulasi tunggal kadang lebih efektif. Oleh karena itu, formulasi mikroba juga harus *site-specific* (Widyati et al., 2022d), sehingga formulasi mikroba harus disesuaikan dengan kondisi tapak. Selain itu, adopsi inovasi mikroba masih rendah karena keterbatasan kapasitas teknis, pemahaman lapangan, dan belum adanya pedoman praktis. Kebijakan rehabilitasi juga belum menjadikan mikroba sebagai bagian dari SOP (*standard*

*operating procedure*) dalam rehabilitasi lahan. Akibatnya keberhasilan penanaman rendah terutama pada lahan marginal seperti tambang, gambut, dan tanah sangat asam. Bioameliiorasi berbasis konsorsium mikroba dapat mempercepat pemulihan tanah dan menurunkan kebutuhan pupuk kimia. Integrasi bioteknologi tanah menjadi langkah strategis untuk memastikan bahwa rehabilitasi benar-benar memulihkan pondasi ekologis, bukan sekadar menambah tutupan vegetasi.

#### **4. Keterbatasan Anggaran dan Ketidakefisienan Pendanaan**

Banyak program rehabilitasi masih bersifat *top-down* dan kurang melibatkan masyarakat lokal sejak tahap perencanaan. Kondisi tersebut menyebabkan rendahnya rasa memiliki (*sense of ownership*) terhadap program rehabilitasi, sehingga keberlanjutan pengelolaan pasca penanaman menjadi lemah.

Indonesia memiliki luas lahan terdegradasi >14 juta ha (KLHK, 2023), namun anggaran rehabilitasi hanya Rp1,2-1,8 triliun per tahun (Bappenas, 2021), atau rata-rata Rp. 85.000 per hektar lahan (Faisal, 2025). Angka ini sangat kecil dibanding komitmen global biaya pemulihan ekosistem yang disusun oleh FAO dari 243 studi di negara Saharan, Asia Selatan, dan Amerika Latin berkisar US\$185-3.012/ha (Rp. 3-50 juta/ha) (Verhoeven et al., 2024). Kajian CIFOR menunjukkan bahwa anggaran rehabilitasi sering hanya berkisar Rp2-5 juta/ha, bahkan anggaran tahun 2003 tercatat hanya sekitar 1,9-2 juta/ha (Nawir et al., 2016). Sementara pemulihan lahan terdegradasi yang mampu berkontribusi pada target *FOLU Net Sink 2030* memerlukan biaya riil minimal Rp10-20 juta/ha, khususnya untuk perbaikan kualitas tanah dan pemulihan proses biologis (Nawir et al., 2016), termasuk persiapan lahan dan pengamanan pasca tanam.

Kesenjangan biaya ini menjelaskan mengapa rehabilitasi sering berhenti pada tahap penanaman awal, tanpa diikuti pemulihan fungsi karbon dan produktivitas ekosistem secara memadai. Contoh nyata proyek ambisius program nasional *Planting One Billion Trees* di tahun 2010 dengan dana yang tersedia hanya mampu menargetkan < 300.000 ha per tahun, jauh dari memadai untuk mengejar 29 juta ha lahan terdegradasi di dalam dan di luar kawasan hutan. Selain keterbatasan dana, permasalahan lain adalah inefisiensi struktural penggunaan anggaran. Sebagian besar dana rehabilitasi terserap untuk mekanisme proyek jangka pendek, sementara investasi untuk pemulihan proses ekologis jangka panjang masih sangat minim. Fisher et al. (2023) mencatat bahwa di Indonesia sebagian besar anggaran terserap pada mekanisme proyek, pengadaan, dan kontrak jangka pendek, sementara investasi pada pemulihan tanah sangat terbatas. Pendekatan ini mengabaikan dimensi proses ekologis jangka panjang dan menempatkan rehabilitasi sebagai aktivitas administratif, bukan transformasi ekosistem. Tanpa koreksi paradigma menuju investasi berbasis fungsi biologis tanah, efisiensi anggaran tidak akan pernah tercapai meskipun dana ditingkatkan.

Dampaknya, pelaksana menggunakan bibit murah dan tidak adaptif, dan tidak ada anggaran pemeliharaan untuk 2–3 tahun pertama. Evaluasi program GERHAN (2003–2009) menunjukkan keberhasilan tumbuh 20–40% (Badan Litbang Kehutanan, 2009). Minimnya anggaran membatasi penggunaan inovasi seperti mikroba tanah dan pupuk organik (Widyati, 2011). Sistem monitoring juga lemah; KLHK (2009) melaporkan hanya 10-20% lokasi yang dipantau dalam jangka panjang. Fragmentasi pendanaan antar program menyebabkan inefisiensi. Dalam kondisi tersebut, pencapaian target *FOLU Net Sink 2030* berpotensi tidak optimal.

## 5. Pelibatan Masyarakat Sangat Terbatas

Pelibatan masyarakat yang rendah menjadi penyebab konsisten kegagalan rehabilitasi. Banyak program bersifat *top-down* tanpa konsultasi, sehingga masyarakat tidak memiliki rasa memiliki.

Berbagai studi menunjukkan bahwa keberhasilan rehabilitasi sangat dipengaruhi oleh partisipasi masyarakat dan integrasi pengetahuan lokal dalam pengelolaan ekosistem (Nawir et al., 2007). Evaluasi GERHAN 2003–2009 menunjukkan *survival rate* bibit yang ditanam sangat rendah karena penanaman dilakukan di lahan garapan tanpa persetujuan masyarakat dan jenis yang ditanam tidak diminati masyarakat (Badan Litbang Kehutanan, 2009; Hardianti, 2020; Nawir et al., 2007). Rendahnya pelibatan masyarakat lokal merupakan faktor sistemik yang melemahkan efektivitas rehabilitasi (Nawir et al., 2007). Tenaga kerja dan pengetahuan lokal masyarakat merupakan sumber pembiayaan implisit yang bernilai strategis (Afidah et al., 2025). Modal sosial tersebut mampu menggantikan sebagian besar modal finansial eksternal sekaligus meningkatkan keberhasilan pemulihan lahan.

Program yang dirancang secara *top-down* tidak hanya mengabaikan konteks sosial, tetapi juga memutus hubungan antara rehabilitasi dan kehidupan masyarakat. Dalam kerangka *FOLU Net Sink 2030*, kondisi ini kontraproduktif karena keberlanjutan penyerapan karbon sangat bergantung pada perlindungan dan pengelolaan jangka panjang di tingkat tapak. Tanpa keterlibatan aktif masyarakat sebagai aktor utama, rehabilitasi berubah menjadi proyek sementara yang rentan gagal dan harus terus diulang dengan biaya yang semakin besar. Dengan demikian, pelibatan masyarakat bukan sekadar pendekatan sosial, melainkan strategi ekonomi-ekologis kunci menuju *FOLU Net Sink 2030*. Oleh karena itu, Bab berikutnya

menyajikan kerangka restorasi lahan yang bertumpu pada pemulihan ekosistem sekaligus meningkatkan ketahanan pangan dan kesejahteraan masyarakat sekitar lahan terdegradasi.

### III. REKKOSMIK UNTUK RESTORASI LAHAN DAN *FOLU NET SINK 2030*

Sebagai respons terhadap rendahnya keberhasilan rehabilitasi lahan, diperlukan pendekatan yang tidak hanya berfokus pada penanaman vegetasi, tetapi juga memulihkan fungsi biologis tanah sebagai fondasi proses ekosistem. Dalam kerangka tersebut, rekayasa ekosistem tanah berbasis mikroba (REKKOSMIK) menempatkan mikroba tanah sebagai penggerak utama restorasi lahan dan penguatan serapan karbon untuk mendukung *FOLU Net Sink 2030*. Bab ini membahas peran mikroba tanah dalam restorasi lahan terdegradasi serta relevansinya terhadap pengembalian fungsi ekosistem dan peningkatan stok karbon.

#### A. Peran Mikroba Tanah Sebagai Pendorong Keberhasilan Rehabilitasi Lahan Terdegradasi

Rendahnya keberhasilan rehabilitasi lahan terdegradasi berkaitan erat dengan tidak berfungsinya kembali komunitas mikroba tanah yang mengendalikan proses-proses kunci ekosistem. Hal ini berakibat pada terhambatnya proses perbaikan sifat tanah, ketersediaan unsur hara, serta kemampuan adaptasi bibit pada fase awal pertumbuhan. Berikut disampaikan peran strategis mikroba tanah dalam rehabilitasi lahan, sebagai agen bio-remediasi dan bioameliiorasi, penyedia unsur hara, peningkat ketahanan bibit, serta pendukung proses fitoremediasi.

##### 1. Mikroba Tanah Sebagai Agen Bioremediasi dan Bioameliiorasi

Mikroba merupakan agen penting dalam pemulihan tanah tercemar melalui bioremediasi dan bioameliiorasi. Bioremediasi

memanfaatkan kemampuan mikroba menguraikan atau menstabilkan polutan seperti hidrokarbon dan logam berat (Widyati et al., 2024b).

**Tabel 3.1** Efisiensi perbaikan sifat tanah (%) *tailing* setelah 15 hari ameliorasi dengan sludge industry kertas

Perlakuan	S (%)	Fe (ppm)	Cu (ppm)	Cd (ppm)	Pb (ppm)	CN (ppm)	N (%)	P (ppm)	K	KTK
25% sludge	53	22	30	87	10	99	1029	181	10	99
50% sludge	82	64	73	98	54	99	2414	1442	21	154

Sumber: Widyati (2012)

Widyati (2012a) mengkaji pemanfaatan *sludge* industri pulp dan kertas sebagai bahan amelioran pada tanah *tailing* tambang emas yang dicirikan oleh tingkat toksisitas logam berat dan kandungan sianida yang tinggi serta rendahnya fungsi biologis tanah. Hasil penelitian menunjukkan bahwa aplikasi *sludge* mampu memperbaiki sifat kimia tanah, meningkatkan pH dan kapasitas tukar kation, serta menurunkan toksisitas logam berat (Tabel 3.1). Keberadaan bahan organik dan komunitas mikroba fungsional dalam *sludge* berperan penting dalam proses stabilisasi dan penurunan ketersediaan logam, sehingga menciptakan kondisi yang lebih mendukung pemulihan fungsi tanah. Temuan ini menegaskan bahwa *sludge* industri kertas berpotensi dimanfaatkan sebagai agen bioameliorasi dan bioremediasi yang efektif pada lahan bekas tambang dan *tailing*.

## 2. Mikroba Meningkatkan Ketahanan Bibit pada Kondisi Ekstrem

Pada lahan terdegradasi seperti tanah bekas tambang batubara yang dicirikan oleh pH sangat masam, bahan organik rendah, KTK rendah, defisiensi N dan P, serta tingginya logam terlarut (Widyati, 2006; Sheoran et al., 2010) mengakibatkan tingkat mortalitas bibit sangat tinggi. Dalam kondisi ini, mikroba berperan sebagai *biological enhancers* yang memodifikasi lingkungan mikro-rhizosfer dan meningkatkan ketahanan fisiologis bibit (Widyati, 2011; van der Heijden et al., 2008). Kelompok PGPR, *Rhizobium*, fungi mikoriza arbuskula, dan bakteri pelarut fosfat terbukti meningkatkan adaptasi bibit melalui produksi fitohormon, pelarutan P, fiksasi N, peningkatan serapan air, serta detoksifikasi logam (Khan, 2005; Widyati, 2016b). Konsorsium mikroba meningkatkan nodulasi, biomassa, serapan hara, dan *survival rate* pada *Acacia mangium*, *A. crassicarpa* (Widyati, 2007), dan *Calliandra calothyrsus* (Kurniaty et al. 2013).

Namun demikian, efektivitas konsorsium mikroba tersebut bersifat *site-specific*. Seperti contoh mikroba endofit pada tanah sangat miskin P, memberikan hasil yang sebaliknya, yaitu dapat menurunkan pertumbuhan secara drastis akibat kompetisi hara (Widyati, 2006). Oleh karena itu, pemilihan inokulan harus disesuaikan dengan kondisi tanah dan karakter tanaman.

## 3. Mikroba Mendukung Efektivitas Fitoremediasi

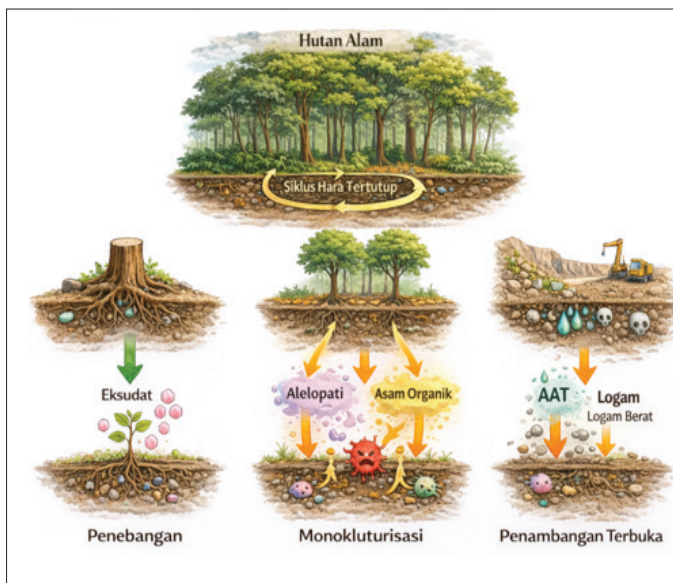
Fitoremediasi bekerja melalui mekanisme penyerapan, transformasi, atau stabilisasi polutan oleh tanaman, dan keberhasilannya sangat bergantung pada dukungan mikroba rhizosfer (Widyati, 2009; 2012b). Mikroba memproduksi asam organik, siderofor, dan enzim pelarut mineral yang mengkelat atau menurunkan mobilitas logam sehingga meningkatkan toleransi tanaman

dan efektivitas fitoekstraksi (Ma et al., 2011). Di lain sisi, kelompok FMA, *Rhizobium*, dan BPP memperkuat penyerapan hara, memodulasi stres oksidatif, dan meningkatkan daya tahan tanaman pada tapak ekstrem (Widyati, 2012b). Tanaman fitoremediasi bisa tumbuh lebih baik dan dapat menyerap logam lebih banyak dengan bantuan mikroba.

Penelitian terdahulu menunjukkan bahwa beberapa mikroba seperti *Pseudomonas putida*, *Rhodococcus erythropolis*, *Enterobacter*, dan *Streptomyces* membantu tanaman hiperakumulator seperti *Vetiveria zizanioides* dan *Brassica juncea* menstabilkan Pb, Cd, dan Zn (Widyati, 2009). Mikroba penghasil siderofor menurunkan toksisitas logam, sementara fungi endofit seperti *Penicillium* dan *Trichoderma harzianum* meningkatkan aktivitas antioksidan tanaman. Pada lahan tambang batubara, *Acacia crassicarpa* yang didukung mikroba rhizosfer mampu menurunkan toksisitas logam secara signifikan (Widyati 2006; 2009). Sinergi tanaman-mikroba mempercepat degradasi polutan, meningkatkan stabilisasi logam, dan memperkuat pemulihan tanah.

## **B. Implikasi Hilangnya Vegetasi Terhadap Dinamika dan Fungsi Mikroba Tanah**

Sintesis penelitian (Widyati, 2006; 2007; 2011; 2018; Hakim et al., 2021; Widyati et al., 2022a; 2025) disarikan bahwa gangguan vegetasi dan perubahan keragaman jenis tanaman menyebabkan terganggunya suplai eksudat akar, sehingga mempengaruhi dinamika komunitas mikroba tanah. Penurunan suplai karbon ini melemahkan keragaman dan pertumbuhan mikroba, menurunkan biomassa mikroba, dan pada akhirnya menghambat akumulasi karbon organik tanah (SOC) (Prommer et al., 2019). Hilangnya vegetasi merupakan kondisi yang sangat mengganggu interaksi akar-mikroba tanah karena merupakan perubahan drastis pada



Ilustrasi: Widyati (2026)

**Gambar 3.1** Dinamika komunitas mikroba rhizosfer dapat berubah karena hilangnya vegetasi

lingkungan tanah. Sintesis hasil penelitian selama dua dekade (Gambar 3.1) menunjukkan adanya tiga jalan utama rusaknya fungsi rhizosfer. Ketiganya menunjukkan, penyebab utama adalah hilangnya atau berubahnya komposisi sumber energi bagi mikroba tanah yang dipasok oleh tumbuhan.

### 1. Penebangan Mengganggu Komunitas Mikroba Rhizosfer

Riset eksperimental pada tanaman kaliandra dan kilemo menunjukkan mekanisme menarik, di mana setelah pohon ditebang, reaksi pertama tanaman menghentikan pasokan gula ke rhizosfer dan menarik kembali gula yang telah disekresikan

sebelumnya (Widyati 2016b; Widyati et al., 2022b). Selain itu, untuk membunuh mikroba rhizosfer, tanaman menurunkan pH zona perakaran. Populasi bakteri endofit dapat menurun hingga 81% (Widyati, 2016b; Widyati et al., 2022b). Hal ini merupakan strategi tanaman agar dapat bertunas kembali (Widyati, 2016b; Widyati et al., 2022b). Oleh karena itu, memahami mekanisme pengelolaan rhizosfer ketika dilakukan penebangan penting dalam pengelolaan hutan tanaman energi dengan sistem panen *short rotation coppice*.

## **2. Monokulturisasi Mengubah Struktur Komunitas Mikroba**

Konversi hutan alam menjadi hutan tanaman monokultur dapat menyebabkan perubahan mendasar pada fungsi ekologis tanah, terutama dinamika bahan organik, keseimbangan hara, dan struktur komunitas mikroba. Hutan alam memiliki siklus hara tertutup dengan pasokan serasah beragam dan kontinu yang menjaga stabilitas agregat serta ketersediaan N dan P melalui aktivitas mikroba, jamur saprofit, dan simbiosis mikoriza (Widyati 2018; Hakim et al., 2021; Widyati et al. 2022a). Sebaliknya, sistem monokultur menurunkan keragaman input organik, menghomogenkan eksudat akar, dan memicu fluktuasi mikro-klimat akibat praktik tebang habis dan rotasi pendek (Binkley & Fisher 2019; Widyati et al. 2022b).

Perubahan komposisi vegetasi menjadi seragam mengurangi variasi sumber karbon dan eksudasi akar yang mengatur proses mikrobiologis (Widyati et al., 2022a). Serasah homogen membatasi substrat bagi mikroba sehingga keragaman fungsional, kapasitas dekomposisi, dan stabilitas mineralisasi menurun. Dampak ini menurunkan ketersediaan hara dan mengganggu keseimbangan nutrisi tanah. Penurunan variasi eksudat akar

juga menekan mikroba pengurai lignin dan senyawa kompleks (Santonja et al., 2017; Widyati, 2018; Poli *et al.*, 2020), sementara gangguan ekologis pada sistem monokultur menurunkan biomassa mikroba serta aktivitas enzim seperti urease dan fosfatase (Zhang et al., 2020). Populasi *Rhizobium*, aktinomisetes, dan endomikoriza turut menurun (Widyati et al., 2022a), sementara senyawa alelopati dan fenolik dari eksudat akar meningkatkan tekanan terhadap mikroba tanah dan memperbesar risiko patogen seperti *Ganoderma* dan *Ceratocystis* (Widyati, 2018; Widyati et al., 2022a; Wu et al., 2022). Secara kumulatif, deforestasi dan monokultur meningkatkan erosi, dan menurunkan cadangan karbon tanah, sekaligus mempercepat mineralisasi bahan organik (Hairiah et al., 2020). Gangguan terhadap komunitas mikroba menyebabkan penurunan kesuburan tanah, degradasi struktur tanah, dan rendahnya produktivitas tegakan rotasi berikutnya (Widyati et al., 2025), serta meningkatkan kebutuhan dan biaya pemupukan jangka panjang (Hairiah et al., 2020). Dengan demikian, homogenisasi vegetasi dan hilangnya kompleksitas biotik di zona perakaran memperlemah fungsi mikrobiologis tanah, menghambat perputaran hara, menghambat penyimpanan *soil organic carbon* SOC (Prommer et al., 2019) dan memperbesar kerentanan ekosistem terhadap degradasi lanjutan.

### **3. Penambangan Terbuka Menghancurkan Sistem Biologis Tanah**

Pertambangan terbuka merupakan bentuk degradasi yang paling parah karena seluruh horizon tanah hilang, sehingga habitat mikroba rusak total. Ekosistem Indonesia yang memiliki curah hujan tinggi dengan batuan sulfidik (pirit) yang menjadi batuan induk lahan bekas tambang memacu terbentuknya air asam tambang. Fenomena ini menghasilkan kemasaman lahan

tinggi ( $\text{pH} < 3$ ) yang mengalir secara kronis dari area tambang (Younger et al., 2002; Widyati, 2006; Widyati et al., 2010). Reaksi oksidasi ini memproduksi ion  $\text{H}^+$  dalam jumlah besar, menyebabkan kondisi hiperasam yang memicu kerusakan ekosistem mikrobiologis. Kemasaman ekstrem mengundang bakteri kemolitotrof pengoksidasi besi-sulfur, *Acidithiobacillus ferrooxidans*, yang mempercepat oksidasi mineral sulfidik dan selanjutnya mempercepat pelarutan pirit melalui reaksi berantai (Johnson & Hallberg, 2005; Widyati, 2006). Siklus ini menghasilkan asidifikasi progresif dan melarutkan logam berat pada tingkat toksik (Said, 2014). Kerusakan ini bukan hanya menurunkan kualitas tanah dan air, tetapi juga menghancurkan komunitas mikroba yang menguntungkan sehingga memutus rantai kehidupan tanah bekas tambang.

Fenomena tersebut menegaskan bahwa dinamika komunitas mikroba tanah sangat bergantung pada keberadaan vegetasi sebagai pemasok karbon, serasah, dan eksudat akar. Degradasi hutan pada dasarnya merusak mesin biologis tanah yang dikendalikan oleh interaksi tanaman-mikroba. Pemulihan vegetasi tanpa pemulihan mikrobiom tanah tidak akan mengembalikan proses ekosistem secara efektif, sehingga mikroba menjadi determinan utama keberhasilan rehabilitasi lahan terdegradasi.

Kerangka REKKOSMIK menempatkan mikroba tanah sebagai penggerak utama restorasi melalui pemulihan fungsi biologis tanah, penguatan interaksi tanaman-mikrobiom, serta percepatan pembentukan dan stabilisasi karbon tanah dan biomassa. Berbeda dari rehabilitasi konvensional yang berfokus pada penanaman, REKKOSMIK memulai intervensi dari fondasi biologis tanah sehingga mampu mempercepat revegetasi, meningkatkan ketahanan dan produktivitas vegetasi, serta memperkuat kapasitas serapan karbon secara berkelanjutan.

### C. Relevansi Rehabilitasi Lahan Berbasis Mikroba Terhadap *FOLU Net Sink 2030*

Dalam kerangka *FOLU Net Sink 2030*, REKKOSMIK berfungsi sebagai penghubung strategis antara rehabilitasi lahan terdegradasi dan peningkatan stok karbon, karena mikroba mengendalikan sebagian besar proses pembentukan dan stabilisasi karbon tanah (Liang et al., 2025; Yao et al., 2025). Pemulihan mikrobiom tanah menjadi mekanisme fundamental peningkatan kesuburan, struktur tanah, dan stok karbon, sehingga berkontribusi langsung pada pencapaian *FOLU Net Sink 2030* serta selaras dengan komitmen iklim nasional dalam *Updated NDC* (KLHK, 2021), *Indonesia's FOLU Net Sink Operational Plan* (KLHK, 2022), serta SDGs 13 dan SDGs 15.

Secara kuantitatif, REKKOSMIK berkontribusi terhadap pencapaian *FOLU Net Sink* melalui dua kompartemen karbon utama, yaitu simpanan karbon tanah (SOC) dan biomassa vegetasi. Pada kompartemen tanah, aktivasi mikroba mempercepat pembentukan *mineral-associated organic matter* (MAOM) yang stabil, dengan laju akumulasi SOC berkisar 0,5–1,0 t C/ha/th (Zhao et al., 2024; Yao et al., 2025). Simulasi rehabilitasi seluas dua juta ha, penerapan REKKOSMIK berpotensi menghasilkan tambahan serapan karbon sebesar 1-2 Mt C/th, menjadikannya komponen signifikan dalam strategi pencapaian *FOLU Net Sink 2030*.

Peran mikroba dalam stabilisasi karbon tanah dikonfirmasi melalui konsep *microbial carbon pump* dan MAOM, yang menegaskan bahwa mikroba menentukan efisiensi penyimpanan karbon jangka panjang. Kontribusi ini tercermin dari akumulasi residu mikroba sebesar  $\pm 13\text{--}34$  t C/ha, jauh melampaui residu tanaman yang hanya sekitar  $\pm 3\text{--}6$  t C/ha, terutama pada tahap lanjut restorasi (Yang et al., 2022).

Dalam konteks restorasi, mikroba berperan sebagai pengungkit percepatan revegetasi melalui perbaikan sifat kimia, fisik, dan biologis tanah, serta penguatan ketahanan bibit terhadap cekaman edafik (Kurniaty et al., 2013; Smith & Read, 2008). Hal ini menentukan keberhasilan fase awal penanaman, laju pertumbuhan biomassa vegetasi, penguatan serapan karbon, dan stabilisasi SOC. Salah satu strategi aplikatif yang relevan adalah pemanfaatan tanaman inang seperti kaliandra yang terbukti unggul dibudidayakan melalui teknik *short rotation coppice* (SRC) (Widyati et al., 2019). Sistem ini menggabungkan rotasi pendek, regenerasi alami melalui terubusan (*coppice*), dan serapan karbon tinggi. Relevansi rehabilitasi terhadap FOLU Net Sink semakin kuat ketika diterapkan secara integratif melalui model 3F yang terbukti meningkatkan produktivitas lahan sekaligus memperbaiki kualitas tanah (Widyati et al., 2019). Sistem ini menjadi model intensifikasi ekologis yang meningkatkan produksi tanpa memperluas deforestasi dan selaras dengan prinsip mitigasi iklim.

Secara keseluruhan, pendekatan berbasis mikrobiologi tanah berkontribusi terhadap *FOLU Net Sink 2030* melalui tiga jalur utama; rehabilitasi lahan terdegradasi sistem 3F, peningkatan cadangan karbon tanah melalui aktivasi mikroba, serta penguatan bioekonomi hijau pedesaan. Sinergi REKKOSMIK, biomassa energi, dan agroforestri 3F menempatkan rehabilitasi lahan sebagai *nature-based solution* yang ilmiah, adaptif, dan implementatif bagi mitigasi perubahan iklim Indonesia.

#### **D. Tantangan Implementasi, Strategi Akselerasi, dan Arah Riset Masa Depan**

Pemanfaatan mikroba tanah sebagai fondasi restorasi ekologis membuka peluang besar bagi percepatan rehabilitasi lahan

di Indonesia, namun keberhasilannya sangat ditentukan oleh kemampuan teknologi ini berfungsi secara konsisten pada kondisi lapangan yang heterogen, ekstrem, dan kompleks. Karena itu, identifikasi tantangan ilmiah, teknis, dan kelembagaan menjadi dasar sebelum merumuskan strategi percepatan menuju *FOLU Net Sink 2030*.

## **1. Tantangan Aplikasi Mikroba untuk Percepatan FOLU Net Sink 2030**

Pemanfaatan mikroba tanah sebagai pendorong pemulihan ekosistem menawarkan potensi signifikan bagi rehabilitasi lahan dan peningkatan stok karbon. Namun Tingkat efektivitasnya dipengaruhi heterogenitas kondisi edafik dan dinamika ekologi mikroba. Hasil sintesis menunjukkan adanya empat tantangan utama untuk mengembangkan REKKOSMIK pada skala operasional.

Tantangan pertama adalah tingginya keberagaman biofisik tanah Indonesia. Jenis tanah di Indonesia sangat beragam, seperti ultisol masam di Sumatra, inceptisol aluvial di Jawa, entisol berpasir di NTT (KLHK, 2023). Selain itu terdapat lahan bekas tambang dan limbah batuan berupa *tailing* dan *overburden* yang memiliki karakter edafik ekstrem (Widyati & Rostiwati, 2010) yang memerlukan strain mikroba spesifik lokasi (*site-specific*). Ketiadaan bank mikroba nasional dan belum adanya platform bioprospeksi mikroba membuat pengembangan bio-input berbasis kekayaan hayati nasional belum optimal, sehingga pemilihan mikroba masih bersifat *ad hoc* dan kurang berkelanjutan.

**Tabel 3.2** Peningkatan pertumbuhan (%) dan serapan hara *Acacia crassicarpa* pada tanah bekas tambang batubara

Perlakuan	Pertumbuhan (selisih perlakuan dengan kontrol)			Serapan (mg/kg biomass)		
	Berat kering pucuk	Berat kering akar	Pertambahan tinggi (%)	N	P	K
FMA	90	207	114	80	383	51
Rhizobium	-60	30	-46	-48	-7	-55
BPP	-14	-12	-28	-21	84	-26
Rhiz+BPP	-46	-36	-37	-18	68	-19
FMA + BPP	51	162	0	36	175	15
FMA + Rhiz	32	152	7	24	221	1
FMA+BPP+Rhiz	137	177	26	164	335	167

Sumber: Widyati (2006)

Kedua, dinamika kompetisi antara inokulan dengan mikroba lokal. Keberhasilan inokulasi tidak hanya ditentukan oleh kualitas strain, tetapi juga interaksinya dalam komunitas tanah. Mikroba yang dipelihara di laboratorium ketika diaplikasikan di lapangan seringkali gagal bersaing dengan mikroba tempatan di lingkungan baru. Selain itu, isolat yang tidak efektif juga dapat disebabkan oleh kondisi lingkungan yang terdegradasi yang tidak menyediakan “lapangan kerja” untuk isolat yang diinokulasikan. Akibatnya, di dalam tubuh inangnya mereka bahkan menjadi parasit yang ditandai dengan pertumbuhan negatif dibanding perlakuan tanpa inokulasi (Tabel 3.2). Hal ini menegaskan bahwa rekayasa komunitas mikroba tidak dapat sekadar menambahkan inokulan, tetapi memerlukan pendekatan ekologi yang mempertimbangkan keseimbangan fungsi mikroba tanah.

Tantangan ketiga berkaitan dengan formulasi mikroba dan sistem aplikasinya. Untuk tetap hidup, stabil, dan efektif, mikroba memerlukan *carrier* yang kompatibel (Widyati, 2011). Riset formulasi menunjukkan pasta mikroba paling efektif untuk menekan *A. ferrooxidans* pada lingkungan air asam tambang; *alginate beads* sesuai untuk tapak kering berpasir; sedangkan zeolit memberikan stabilitas koloni dan daya simpan lebih lama pada rehabilitasi umum (Widyati, 2006; 2007; 2009; 2011). Keragaman ini menunjukkan bahwa biofertilizer tidak dapat dibuat generik, tetapi harus berbasis konteks tapak dan metode aplikasi, yang berdampak pada biaya dan logistik implementasi.

Tantangan keempat adalah belum sinkronnya kerangka regulasi nasional dengan kebutuhan pengembangan bio-input untuk *FOLU Net Sink 2030*. Standar mutu, sertifikasi strain, biosafety, serta pedoman penggunaan biofertilizer untuk rehabilitasi ekosistem belum diatur secara baku. Padahal mikroba merupakan *enabler* penting dalam peningkatan stok karbon tanah, stabilisasi tanah, dan percepatan pertumbuhan vegetasi (Kumar et al., 2024). Tanpa regulasi yang kuat, inovasi mikrobial sulit masuk ke skala operasional.

## **2. Strategi Akselerasi Dalam Kerangka FOLU Net Sink 2030**

Untuk menjadikan mikroba rhizosfer sebagai kekuatan restorasi produktif dan pendorong peningkatan stok karbon, empat strategi optimasi berikut menjadi prioritas.

Pertama, pengembangan strain mikroba adaptif. Pengembangan strain tidak cukup mengandalkan isolasi alami, tetapi harus ditingkatkan melalui *genetic-assisted selection* untuk menghasilkan mikroba tahan terhadap cekaman lingkungan seperti pH masam, salinitas tinggi, kekeringan, dan kontaminasi logam

berat. Strain adaptif diperlukan untuk restorasi multiekosistem, termasuk lahan bekas tambang dan lahan marginal.

Kedua, konsorsium mikroba dengan tanaman energi cepat tumbuh. Restorasi harus produktif, mendukung ekonomi lokal, dan ketahanan energi. Konsorsium mikroba pada kaliandra, akasia, dan sengon terbukti meningkatkan biomassa energi sekaligus memperbaiki kesuburan tanah (Widyati et al., 2019; 2022b). Model 3F dapat dihasilkan melalui integrasi tanaman energi dengan tanaman pangan dan pakan di bawah tegakan.

Ketiga, teknologi formulasi dan *delivery system*. Mikroba membutuhkan *carrier* yang dapat menjaga viabilitas tetap bagus ketika diaplikasikan di lapangan. Pasta mikroba cocok untuk AAT karena menempel pada batuan dan tidak mudah tercuci; *alginate beads* melindungi mikroba dari kekeringan pada tanah berpasir; sedangkan zeolit atau biochar menyediakan habitat porus yang stabil dan melepaskan nutrisi secara perlahan bagi rehabilitasi secara umum. Formulasi harus disesuaikan dengan kondisi tapak agar efektif dalam skala FOLU.

Keempat, integrasi mikroba ke kebijakan FOLU yang memposisikan mikroba sebagai bagian resmi teknologi restorasi nasional, yang menjadi fondasi pemulihan lahan terdegradasi dan peningkatan SOC. Bio-input mikrobial harus masuk dalam revegetasi tambang, pembangunan hutan energi, dan rehabilitasi lahan kritis, serta dihubungkan dengan sistem *measurement, reporting, and verification* (MRV) karbon. Dengan demikian, kontribusi mikroba terhadap SOC dan penyerapan karbon dapat dihitung secara kredibel.

### 3. Arah Riset Masa Depan

Arah riset masa depan dirumuskan dalam kerangka REKKOSMIK *for carbon restoration* mencakup lima cluster riset prioritas. Agar strategi yang disusun lebih efektif dan efisien, riset dan pengembangan perlu bersinergi dengan teknologi lain untuk mendukung suksesnya aplikasi REKKOSMIK pada skala operasional, sehingga strategi yang disusun akan lebih efektif dan efisien.

Pertama, pengembangan konsorsium mikroba presisi melalui bioprospeksi per zona ekologi, sehingga komunitas mikroba dirancang untuk menjalankan fungsi tertentu dalam proses pemulihan lahan, seperti dekomposisi, stabilisasi logam, atau perbaikan struktur tanah. Hal ini memerlukan sinergi dengan teknologi pemetaan *remote sensing* dan komputasi sehingga dapat memetakan permasalahan tanah di Indonesia lebih efisien tanpa melakukan *survey* detail di lapangan.

Kedua, pengembangan strain adaptif melalui *genetic-assisted microbial engineering* untuk menghasilkan mikroba toleran terhadap logam, pH rendah, kekeringan, hara rendah dan menang bersaing (Widyati 2019; 2022). Kemajuan ilmu rekayasa genetika dapat dimanfaatkan untuk mendukung strategi ini.

Ketiga, inovasi formulasi dan sistem aplikasi agar inokulan stabil dan efektif di lapangan. Hal ini mendorong perkembangan teknologi pengepakan dan pengangkutan inokulum yang aman dan efisien. Selain itu, perlu juga dikembangkan teknologi aplikasi sederhana ramah petani, sehingga tidak memerlukan pendidikan khusus untuk aplikasi inokulum di lapangan.

Keempat, restorasi produktif 3F berbasis mikroba untuk memulihkan ekosistem sekaligus menghasilkan energi terbarukan dan nilai ekonomi lokal. Hal ini menuntut sinergisitas peneliti

restorasi dengan ahli lain seperti analisis potensi lahan, pemetaan kebutuhan ekonomi masyarakat dan rantai pasok.

Kelima, penguatan karbonisasi tanah melalui pengembangan sistem MRV berbasis mikrobiologi, termasuk pembentukan bank mikrobiom nasional. Kluster prioritas riset ini menuntut sinergisitas antara ahli metagenomik, bioinformatika, dan teknologi kecerdasan artifisial untuk mendukung target *FOLU Net Sink 2030*.

Untuk memastikan kontribusi nyata REKKOSMIK terhadap *FOLU Net Sink 2030*, diperlukan pengarusutamaan mikroba dalam kebijakan operasional. Misalnya, integrasi bioameliorasi dan biofertilizer dalam standar rehabilitasi, pengembangan MRV karbon berbasis SOC dan aktivitas mikrobiologis, serta pembentukan bank mikroba nasional. Selain itu, diperlukan dukungan insentif fiskal dan pembiayaan karbon agar REKKOSMIK bertransformasi dari inovasi ilmiah menjadi pilar kebijakan restorasi nasional.

## IV. LANDASAN ILMIAH REKKOSMIK

Bab ini merumuskan kontribusi ilmiah utama dalam bentuk kerangka konseptual *Microbial Ecosystem Engineering* (REKKOSMIK), yang disintesis lebih dari dua dekade penelitian mengenai rehabilitasi lahan terdegradasi, khususnya ekosistem pascatambang. Kerangka ini menegaskan bahwa keberhasilan restorasi ekosistem pada dasarnya ditentukan oleh kemampuan memulihkan relasi fungsional antara tumbuhan, mikrobiom tanah, dan proses biogeokimia yang menopang stabilitas ekosistem. Dalam perspektif REKKOSMIK, mikrobiom tanah diposisikan bukan sekadar komponen pendukung pertumbuhan tanaman, tetapi sebagai fondasi ekologis yang mengendalikan adaptasi vegetasi, siklus hara, pembentukan agregat tanah, akumulasi karbon, serta resiliensi ekosistem pasca restorasi.

Kerangka REKKOSMIK dibangun berdasarkan sintesis hasil penelitian mengenai interaksi tumbuhan-mikrobiom, keruntuhan fungsi rhizosfer, bioremediasi lahan pascatambang, serta rehabilitasi produktif berbasis bioekonomi masyarakat. Secara konseptual, REKKOSMIK mengintegrasikan pendekatan ekologi restorasi, mikrobiologi tanah, rehabilitasi lanskap, dan pembangunan berkelanjutan ke dalam suatu paradigma restorasi berbasis rekayasa proses biologis tanah (*microbiome-assisted restoration*). Dalam kerangka ini, keberhasilan rehabilitasi tidak lagi dipahami semata sebagai keberhasilan penanaman vegetasi, melainkan sebagai keberhasilan membangun kembali jejaring

interaksi biologis dan biogeokimia yang menopang fungsi ekosistem jangka panjang.

Berdasarkan sintesis konseptual dan empiris tersebut, REKKOSMIK dirumuskan ke dalam empat pilar kebaruan yang membentuk alur kausal restorasi, mulai dari mekanisme adaptasi tanaman, diagnosis kegagalan rehabilitasi, intervensi pemulihan tapak, hingga keberlanjutan ekologis dan sosial-ekonomi pascarestorasi.

### **Pilar 1. Teori Relasi Fungsional Tumbuhan-Mikrobiom dalam Adaptasi Lingkungan Ekstrem**

Pilar pertama merumuskan Teori Relasi Fungsional Tumbuhan-Mikrobiom yang memposisikan tanaman sebagai *holobiont*, yaitu kesatuan ekologis antara tanaman dan komunitas mikrobiom rhizosfernya. Perspektif ini memperluas paradigma klasik ekofisiologi tumbuhan dengan menegaskan bahwa kemampuan tanaman beradaptasi pada lingkungan ekstrem tidak ditentukan oleh fisiologi tanaman semata, tetapi juga oleh interaksi metabolik dan ekologis antara tanaman dan komunitas mikroba yang berasosiasi dengannya (Widyati, 2016). Dengan demikian, tumbuhan dipahami bukan sebagai organisme soliter, melainkan sebagai entitas ekologis yang selalu beroperasi bersama mikrobiom tanah dalam suatu sistem ko-adaptasi (*co-adaptive unit*).

Dalam lingkungan terdegradasi, mikrobiom rhizosfer berperan penting dalam meningkatkan ketersediaan hara, menekan toksisitas logam, memperbaiki struktur tanah, serta meningkatkan toleransi tanaman terhadap cekaman lingkungan. Penelitian pada edelweiss gunung (*Anaphalis* spp.) menunjukkan bahwa tanaman mengalokasikan sebagian besar hasil fotosintesis dan

raturan metabolit akar untuk mempertahankan simbiosis dengan komunitas mikrobiom rhizosfernya, sehingga memungkinkan tanaman bertahan pada habitat miskin hara dan berkadar sulfur tinggi (Widyati et al., 2024a). Temuan serupa diperoleh pada lahan pascatambang, di mana konsorsium mikroba seperti *Rhizobium*, bakteri pelarut fosfat (BPF), dan fungi mikoriza arbuskula (FMA) terbukti meningkatkan pertumbuhan tanaman pada tanah miskin hara dan bersifat toksik.

Temuan-temuan tersebut menunjukkan bahwa mikrobiom bukan sekadar faktor pendukung pertumbuhan tanaman, tetapi merupakan komponen integral dalam mekanisme adaptasi ekologis tanaman. Kebaruan utama pilar ini terletak pada reposisi konsep adaptasi tumbuhan sebagai fenomena *holobiont*. Dalam perspektif ini, kegagalan revegetasi tidak lagi dipahami semata sebagai ketidakcocokan jenis tanaman terhadap kondisi tapak (*species-site mismatch*), tetapi sebagai kegagalan membangun relasi fungsional antara tanaman dan mikrobiomnya. Dengan demikian, restorasi ekosistem harus dirancang tidak hanya melalui pemilihan spesies tanaman yang sesuai, tetapi juga melalui rekayasa komunitas mikrobiom tanah yang mendukung adaptasi dan ketahanan vegetasi.

Secara teoritis, konsep ini memperkuat perkembangan paradigma *microbiome-assisted restoration* dan *nature-based solutions* dalam restorasi ekosistem tropika. Relasi tumbuhan-mikrobiom menjadi pondasi ekologis yang menentukan kemampuan sistem vegetasi untuk mempertahankan fungsi ekosistem, stabilitas karbon tanah, dan resiliensi terhadap perubahan lingkungan.

## **Pilar 2. Keruntuhan Fungsi Mikroba Tanah sebagai Diagnosis Kegagalan Restorasi**

Pilar kedua memperkenalkan konsep keruntuhan fungsi mikroba tanah dan keruntuhan rhizosfer (*rhizosphere collapse*), yaitu kondisi ketika hilangnya vegetasi menyebabkan terputusnya aliran karbon dari tanaman ke komunitas mikroba tanah sehingga mengakibatkan runtuhnya proses dekomposisi, siklus hara, pembentukan agregat tanah, dan stabilitas fungsi biogeokimia tanah (Widyati et al., 2022a). Konsep ini menjelaskan mengapa banyak program rehabilitasi lahan gagal memulihkan fungsi ekologis meskipun penanaman vegetasi berhasil dilakukan secara fisik.

Dalam sistem tanah terdegradasi, mikroorganisme tanah sangat bergantung pada suplai karbon dari eksudat akar sebagai sumber energi utama (Widyati, 2016; 2017). Ketika vegetasi hilang atau sistem tanam tidak mampu mempertahankan kontinuitas suplai karbon, komunitas mikroba mengalami penurunan aktivitas dan biomassa yang berujung pada keruntuhan fungsi ekologis tanah. Akibatnya, proses mineralisasi hara, pembentukan bahan organik, dan agregasi tanah terganggu sehingga lahan tetap berada dalam kondisi tidak stabil secara ekologis.

Bukti empiris dari penelitian pada sistem vegetasi berdaur pendek (*short rotation coppice/SRC*) menunjukkan bahwa desain sistem vegetasi dan pola regenerasi tanaman berperan penting dalam menjaga keberlanjutan fungsi mikroba tanah (Widyati, 2016b; Widyati et al., 2022b). Sistem SRC memungkinkan regenerasi vegetasi berlangsung secara berulang sehingga suplai karbon ke tanah tetap terjaga, biomassa meningkat, dan aktivitas mikrobiologis tanah tetap stabil. Dengan demikian, sistem vegetasi tidak hanya berfungsi menghasilkan biomassa, tetapi

juga berperan sebagai pengendali stabilitas proses mikrobiologis tanah.

Kebaruan utama pilar ini terletak pada pengenalan keruntuhan fungsi mikroba tanah sebagai diagnosis ekologis kegagalan rehabilitasi. Perspektif ini menggeser paradigma rehabilitasi dari pendekatan berbasis keberhasilan pertumbuhan tanaman menuju pendekatan berbasis keberhasilan pemulihan fungsi biologis tanah. Dengan memahami mekanisme keruntuhan rhizosfer, strategi rehabilitasi dapat dirancang secara lebih presisi, termasuk penentuan jenis tanaman, pola tanam, rotasi panen, dan desain lanskap restorasi.

Selain relevan untuk rehabilitasi pascatambang, konsep ini memiliki implikasi luas bagi restorasi ekosistem tropika dalam konteks perubahan iklim dan pembangunan rendah karbon. Melalui pemeliharaan kontinuitas vegetasi dan stabilitas fungsi mikroba tanah, sistem SRC berpotensi mendukung peningkatan stok karbon dan pencapaian target FOLU Net Sink 2030.

### **Pilar 3. Inovasi Bioremediasi Air Asam Tambang Berbasis Bakteri Pereduksi Sulfat sebagai Solusi Tapak**

Pilar ketiga menawarkan solusi teknis pemulihan tapak melalui inovasi bioremediasi air asam tambang (AAT) berbasis bakteri pereduksi sulfat (BPS). Pendekatan ini bekerja langsung pada sumber pembentukan AAT melalui pengendalian proses oksidasi mineral sulfida pada zona reaktif batuan tambang. Pendekatan tersebut berbeda secara mendasar dari metode konvensional berbasis penambahan kapur yang selama ini lebih berorientasi pada penetralan gejala, bukan pengendalian sumber pembentuk AAT.

Dalam pendekatan REKKOSMIK, pengendalian AAT dilakukan melalui rekayasa komunitas mikroba yang mampu

mengubah kondisi biogeokimia lingkungan tambang. Bakteri pereduksi sulfat memanfaatkan bahan organik sebagai donor elektron untuk mereduksi sulfat menjadi sulfida, meningkatkan pH, serta mengendapkan logam dan logam berat dalam bentuk yang lebih stabil (Widyati, 2006; Widyati, 2007b; 2012; Widyati & Wahyudi, 2012). Pada saat yang sama, keberadaan bahan organik menekan aktivitas *Acidithiobacillus ferrooxidans*, yaitu bakteri litotrof utama yang berperan sebagai biokatalis pembentuk air asam tambang (Widyati et al., 2010; Hazra & Widyati, 2007).

Kebaruan utama inovasi ini terletak pada pemanfaatan *sludge* segar sebagai bioamelioran multifungsi yang bekerja melalui mekanisme bioaugmentasi dan biostimulasi secara simultan. Sebagai agen bioaugmentasi, *sludge* mengandung komunitas bakteri pereduksi sulfat aktif yang mampu mempercepat pemulihan kondisi kimia tanah dan air. Sebagai biostimulan, bahan organik dalam *sludge* meningkatkan aktivitas mikroorganisme heterotrof sekaligus menekan populasi bakteri pembentuk AAT. Kombinasi kedua mekanisme tersebut memungkinkan pengendalian AAT dilakukan langsung pada sumber pembentuknya. Pendekatan ini menyediakan solusi tapak yang adaptif, efektif dan efisien, relatif murah, berkelanjutan, dan berdaya ungkit tinggi bagi rehabilitasi lahan bekas tambang sekaligus pemanfaatan limbah industri secara sirkular.

Pendekatan ini memiliki implikasi penting bagi pengembangan teknologi rehabilitasi pascatambang yang lebih adaptif, berbiaya relatif rendah, dan berkelanjutan. Selain meningkatkan efektivitas rehabilitasi, pemanfaatan limbah organik sebagai bioamelioran juga mendukung prinsip ekonomi sirkular dan rehabilitasi berbasis proses biologis (*regenerative restoration*). Dengan demikian, teknologi bioremediasi berbasis BPS tidak

hanya menyelesaikan masalah pencemaran tambang, tetapi juga membangun fondasi ekologis bagi pemulihan fungsi tanah dan revegetasi jangka panjang.

#### **Pilar 4. Model Rehabilitasi 3F (*Food-Feed-Fuel*) Berbasis Mikroba dan Bioekonomi Komunitas**

Pilar keempat merumuskan Model Rehabilitasi 3F berbasis mikroba sebagai pendekatan integratif yang menghubungkan pemulihan ekologis dengan keberlanjutan sosial-ekonomi masyarakat. Dalam model ini, pengelolaan mikrobiom tanah dan sistem vegetasi diposisikan sebagai fondasi bagi rehabilitasi produktif yang mampu menghasilkan pangan, pakan ternak, dan energi biomassa secara simultan.

Model 3F dibangun atas prinsip bahwa rehabilitasi lahan tidak dapat dipisahkan dari kebutuhan masyarakat lokal dan keberlanjutan ekonomi lanskap (Widyati et al., 2019). Dengan memulihkan fungsi biologis tanah melalui pengelolaan mikrobiom dan vegetasi produktif, proses restorasi dapat berlangsung bersamaan dengan produksi biomassa secara berkelanjutan. Pendekatan ini memungkinkan peningkatan kualitas tanah, akumulasi karbon, stabilisasi siklus hara, dan penguatan resiliensi ekosistem terhadap perubahan iklim.

Penerapan sistem panen *short rotation coppice* (SRC) memungkinkan biomassa dipanen secara periodik (Widyati et al., 2019; Widyati et al., 2022b) tanpa menghilangkan fungsi vegetasi sebagai penyerap karbon dan pelindung tanah. Dengan demikian, lahan tetap produktif sekaligus mempertahankan fungsi ekologisnya. Model ini membuka peluang diversifikasi mata pencaharian masyarakat melalui produksi bahan pangan, pakan ternak, kayu energi, dan biomassa industri berbasis rehabilitasi lahan.

Selain kontribusi ekologis, model 3F juga memiliki relevansi strategis dalam konteks pembangunan berkelanjutan. Integrasi rehabilitasi lahan dengan produksi biomassa dan penguatan ekonomi lokal mendukung pencapaian berbagai agenda global, termasuk FOLU Net Sink 2030 dan Tujuan Pembangunan Berkelanjutan/SDGs, terutama SDG 1 (*No Poverty*), SDG 2 (*Zero Hunger*), SDG 13 (*Climate Action*), dan SDG 15 (*Life on Land*). Dengan demikian, rehabilitasi lahan tidak lagi dipandang sebagai aktivitas pemulihan ekologis semata, tetapi sebagai strategi pembangunan lanskap yang produktif, inklusif, dan rendah karbon dan target *FOLU Net Sink 2030* (Bappenas, 2017; 2021).

Kebaruan utama pilar ini terletak pada integrasi restorasi ekosistem, rekayasa mikrobiom tanah, dan bioekonomi masyarakat ke dalam satu kerangka rehabilitasi produktif yang berkelanjutan. Dalam perspektif REKKOSMIK, keberhasilan restorasi tidak hanya diukur dari pulihnya vegetasi dan kualitas tanah, tetapi juga dari kemampuan sistem rehabilitasi menghasilkan manfaat ekologis, ekonomi, dan sosial secara simultan.

Keempat pilar tersebut membangun alur kausal restorasi berbasis pemulihan sistem mikrobiologis tanah. Secara keseluruhan, kerangka ini mereposisi rehabilitasi lahan dari pendekatan revegetasi konvensional menuju rekonstruksi sistem biologis tanah sebagai inti restorasi ekosistem. Kerangka ini menegaskan bahwa keberhasilan rehabilitasi tidak dapat dicapai hanya melalui pendekatan vegetatif, tetapi harus melalui pemulihan jejaring interaksi biologis dan biogeokimia yang menopang stabilitas ekosistem jangka panjang. Dalam konteks degradasi lahan global, perubahan iklim, dan tuntutan pembangunan berkelanjutan, REKKOSMIK menawarkan

paradigma restorasi integratif, adaptif, dan transformatif, yang menjembatani ilmu dasar mikrobiologi tanah dengan teknologi rehabilitasi lanskap serta kebijakan pembangunan rendah karbon.

Buku ini tidak diperjualbelikan.

## V. KERANGKA STRATEGIS RESTORASI EKOSISTEM BERBASIS REKKOSMIK UNTUK *FOLU NET SINK 2030*

Krisis degradasi lahan dan perubahan iklim telah menempatkan restorasi ekosistem sebagai agenda strategis global abad ke-21. Pada banyak negara tropis, termasuk Indonesia, degradasi hutan, ekspansi pertambangan, konversi lahan, dan penurunan kualitas tanah tidak hanya menyebabkan hilangnya keanekaragaman hayati, tetapi juga melemahkan kapasitas ekosistem dalam menyimpan karbon, menjaga stabilitas hidrologi, dan menopang ketahanan pangan serta kesejahteraan masyarakat. Dalam konteks tersebut, restorasi tidak lagi dapat dipahami sebagai kegiatan revegetasi semata, melainkan sebagai upaya rekonstruksi sistem ekologis yang mampu memulihkan fungsi kehidupan pada tingkat lanskap.

Selama beberapa dekade, pendekatan rehabilitasi lahan cenderung berorientasi pada penanaman vegetasi dan capaian administratif, seperti luas areal tertanam dan jumlah bibit hidup. Pendekatan tersebut menghasilkan keberhasilan jangka pendek yang sering kali tidak berkelanjutan karena mengabaikan fondasi biologis tanah yang menopang stabilitas ekosistem. Dalam perspektif tersebut, REKKOSMIK menawarkan paradigma baru restorasi ekosistem tropika berbasis rekayasa mikrobiom tanah. Berbeda dengan pendekatan rehabilitasi konvensional yang berorientasi pada revegetasi, REKKOSMIK bekerja melalui pemulihan mesin biologis bawah tanah (*underground biological engine*) yang mengendalikan siklus hara, stabilitas karbon tanah, produktivitas vegetasi, dan ketahanan ekosistem. REKKOSMIK memposisikan tanah bukan sebagai media tumbuh yang pasif,

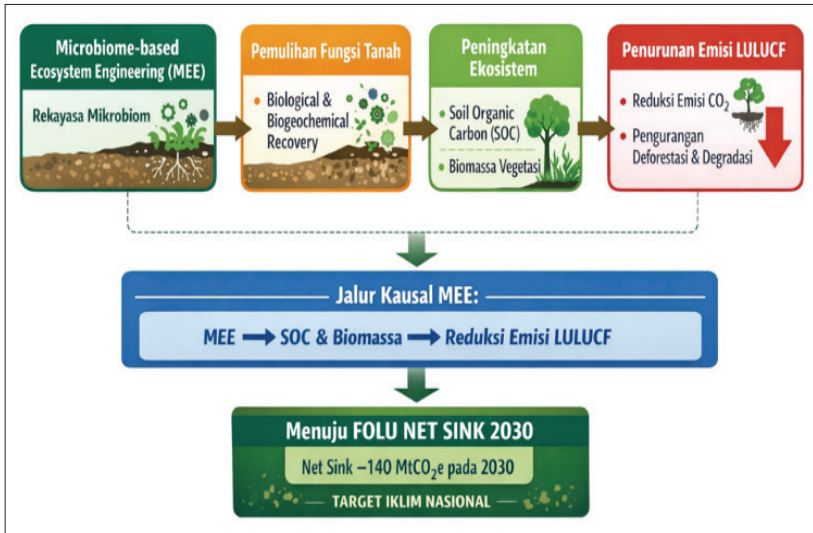
melainkan sebagai sistem hidup (*living system*) yang dikendalikan oleh interaksi kompleks antara mikroorganisme, akar tanaman, bahan organik, dan proses biogeokimia. Dalam paradigma ini, mikrobiom tanah menjadi pondasi utama yang menentukan keberhasilan restorasi, stabilitas karbon, produktivitas vegetasi, dan resiliensi ekosistem terhadap perubahan lingkungan.

Kontribusi utama REKKOSMIK terletak pada kemampuannya menjembatani ilmu dasar mikrobiologi tanah dengan strategi restorasi lanskap, mitigasi perubahan iklim, dan pembangunan berkelanjutan. REKKOSMIK tidak hanya menghasilkan inovasi teknis rehabilitasi lahan, tetapi juga mereposisi restorasi sebagai proses pemulihan jejaring biologis dan biogeokimia yang menopang keberlanjutan kehidupan. Dengan demikian, REKKOSMIK merepresentasikan transformasi paradigma restorasi: dari pendekatan berbasis revegetasi menuju pendekatan berbasis rekonstruksi sistem biologis tanah (*soil-centred restoration*).

Dalam perspektif yang lebih luas, operasionalisasi REKKOSMIK merupakan pergeseran paradigma restorasi global, dari pendekatan berbasis penutupan lahan (*land cover restoration*) menuju pemulihan fungsi biologis ekosistem (*ecosystem functional restoration*). Untuk itu, pembahasan ini difokuskan pada bagaimana rekayasa mikrobiom dapat diterjemahkan menjadi instrumen strategis restorasi nasional sekaligus berkontribusi terhadap pencapaian *FOLU Net Sink 2030*.

### **A. Jalur Kausal dan Kontribusi REKKOSMIK**

Kontribusi REKKOSMIK terhadap pencapaian FOLU Net Sink 2030 bekerja melalui jalur kausal yang terukur dan berbasis proses ekologis (Gambar 5.1). Rekayasa mikrobiom memulihkan fungsi



Ilustrasi: Widyati (2026)

**Gambar 5.1** Jalur kausal MEE dalam mendukung FOLU Net Sink 2030

biologis dan biogeokimia tanah, meningkatkan pembentukan dan stabilisasi karbon organik tanah (*soil organic carbon/ SOC*), memperkuat produktivitas biomassa vegetasi, dan pada akhirnya meningkatkan serapan karbon sekaligus menurunkan emisi bersih sektor *land use, land-use change, and forestry* (LULUCF).

Jalur kausal tersebut menempatkan mikrobiom tanah sebagai simpul strategis yang menghubungkan restorasi ekosistem dengan mitigasi perubahan iklim. Dalam sistem tanah terdegradasi, hilangnya komunitas mikroba fungsional menyebabkan terganggunya dekomposisi bahan organik, siklus hara, pembentukan agregat tanah, dan stabilitas karbon. Rekayasa mikrobiom memungkinkan proses-proses tersebut dipulihkan

melalui pengelolaan komunitas mikroba yang adaptif terhadap kondisi ekstrem, sehingga tanah kembali memiliki kapasitas biologis untuk mendukung pertumbuhan vegetasi dan penyimpanan karbon jangka panjang.

Pendekatan ini memperlihatkan bahwa karbon tanah bukan sekadar komponen pasif dalam sistem ekologi, tetapi hasil interaksi dinamis antara tumbuhan, mikroorganisme, dan proses biogeokimia tanah. Oleh karena itu, keberhasilan restorasi berbasis REKKOSMIK tidak hanya diukur melalui peningkatan tutupan vegetasi, tetapi melalui kemampuan membangun sistem tanah yang stabil, produktif, dan resilien terhadap perubahan lingkungan.

Dalam konteks global, pendekatan ini sejalan dengan perkembangan paradigma *nature-based climate solutions*, *microbiome-assisted restoration*, dan *regenerative ecosystem restoration* yang berkembang dalam ilmu restorasi modern. REKKOSMIK menempatkan Indonesia tidak hanya sebagai pelaksana restorasi, tetapi sebagai pengembang pendekatan konseptual restorasi tropika berbasis rekayasa mikrobiom.

## **B. Transformasi Paradigma Restorasi: dari Revegetasi Menuju Rekonstruksi Sistem Biologis Tanah**

Salah satu kontribusi paling mendasar dari REKKOSMIK adalah perubahan paradigma restorasi ekosistem. Selama ini, rehabilitasi lahan umumnya dipahami sebagai upaya menanam kembali vegetasi pada lahan terdegradasi. Dalam pendekatan tersebut, keberhasilan restorasi diukur melalui indikator fisik seperti luas tanam, persentase hidup tanaman, dan pertumbuhan biomassa.

REKKOSMIK menunjukkan bahwa pendekatan tersebut tidak memadai untuk menjamin keberlanjutan ekosistem. Vege-

tasi tidak dapat bertahan tanpa sistem biologis tanah yang sehat. Tanah yang kehilangan komunitas mikroba fungsional akan mengalami penurunan kapasitas regeneratif, terganggunya siklus hara, rendahnya stabilitas karbon, dan meningkatnya kerentanan terhadap degradasi ulang (Widyati, 2017; Widyati et al., 2022a; 2022c; 2025).

Melalui pendekatan REKKOSMIK, restorasi didefinisi sebagai proses rekonstruksi sistem biologis tanah. Dalam paradigma ini, pemulihan komunitas mikroba tanah menjadi prasyarat bagi keberhasilan revegetasi, pembentukan karbon tanah, dan stabilitas ekosistem jangka panjang. Pendekatan ini mengubah fokus rehabilitasi dari sekadar “menanam pohon” menjadi “membangun kembali sistem kehidupan tanah”.

Transformasi paradigma tersebut memiliki implikasi yang sangat luas, baik secara ilmiah maupun kebijakan. Dalam perspektif ilmiah, REKKOSMIK memperluas ruang lingkup restorasi ekologi melalui integrasi mikrobiologi tanah, ekologi lanskap, dan biogeokimia karbon ke dalam satu kerangka restorasi yang utuh. Dalam perspektif kebijakan, REKKOSMIK menuntut perubahan indikator keberhasilan rehabilitasi, dari indikator administratif menuju indikator fungsi ekosistem, seperti stabilitas mikrobiologis tanah, peningkatan SOC, dan resiliensi lanskap. Dengan demikian, REKKOSMIK bukan sekadar inovasi teknologi rehabilitasi lahan, tetapi fondasi konseptual bagi restorasi tropika abad ke-21.

### **C. REKKOSMIK sebagai Instrumen Restorasi Lanskap dan Ketahanan Iklim**

Dalam konteks perubahan iklim global, restorasi lahan tidak hanya bertujuan memulihkan ekosistem yang rusak, tetapi juga meningkatkan ketahanan lanskap terhadap tekanan lingkungan

yang semakin kompleks. Peningkatan suhu, perubahan pola curah hujan, degradasi tanah, dan peningkatan frekuensi bencana ekologis menuntut sistem restorasi yang lebih adaptif dan resilien.

REKKOSMIK memberikan kontribusi penting dalam membangun *climate-resilient landscapes* melalui penguatan fungsi biologis tanah dan stabilisasi proses biogeokimia. Rekeyasa mikrobiom meningkatkan kapasitas tanah dalam mempertahankan kelembaban, menyimpan karbon, memperbaiki struktur tanah, dan mendukung regenerasi vegetasi pada kondisi lingkungan ekstrem (Widyati et al., 2005a; Kumar et al., 2024). Dengan demikian, restorasi berbasis mikrobiom tidak hanya memperbaiki kondisi ekosistem saat ini, tetapi juga meningkatkan kemampuan lanskap beradaptasi terhadap perubahan iklim di masa depan.

Inovasi bioremediasi AAT berbasis BPS (Widyati, 2006; 2007; 2009; Widyati et al., 2005a) merupakan salah satu contoh nyata kontribusi REKKOSMIK dalam restorasi lanskap ekstrem. Pendekatan ini menunjukkan bahwa rekeyasa mikrobiom mampu mengintervensi sumber degradasi secara langsung melalui pengendalian proses biogeokimia tanah dan air. Dengan memperbaiki kondisi kimia dan biologis lahan pascatambang, rekeyasa mikrobiom menciptakan pondasi ekologis bagi revegetasi, pembentukan karbon tanah, dan pemulihan fungsi ekosistem jangka panjang.

Pendekatan tersebut memperlihatkan bahwa restorasi berbasis mikrobiom dapat menjadi instrumen mitigasi dan adaptasi terhadap perubahan iklim secara simultan. Dalam perspektif ini, REKKOSMIK berkontribusi tidak hanya pada pengurangan emisi karbon, tetapi juga pada peningkatan kapasitas adaptif lanskap dan masyarakat terhadap perubahan lingkungan global.

#### **D. Integrasi Dalam Sistem Restorasi Ekosistem Nasional dan Bioekonomi Masyarakat**

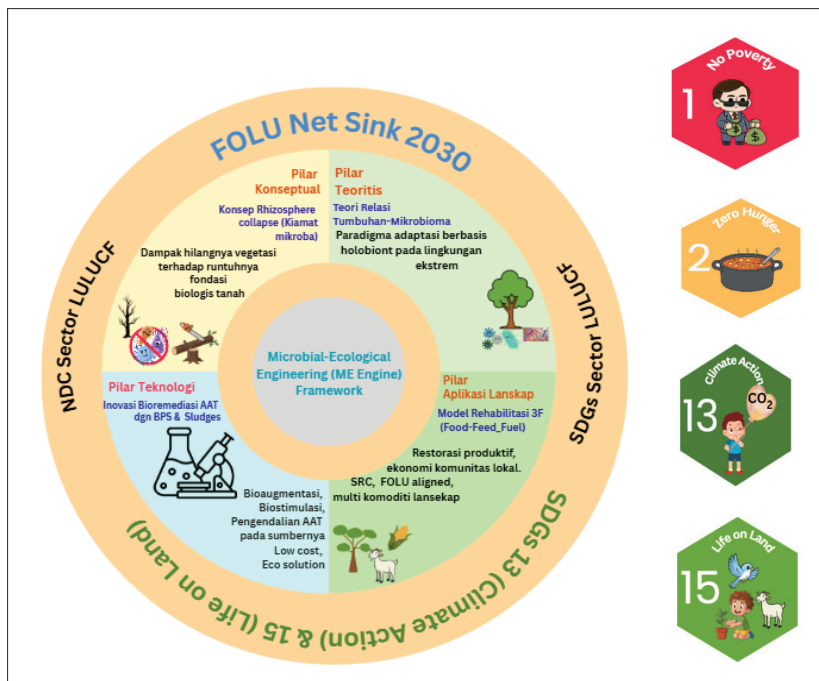
Rekayasa mikrobiom memberikan dasar ilmiah bagi penyusunan kebijakan rehabilitasi lahan secara luas, antara lain: (1) penyusunan standar rehabilitasi hutan dan lahan berbasis inokulasi mikroba lokal, (2) kewajiban bioameliorasi lahan sebelum reklamasi tambang, (3) integrasi model 3F dalam perhutanan sosial dan agroforestri, serta (4) pengembangan ekonomi hijau berbasis restorasi produktif. Tanpa integrasi fungsi mikrobiologis tanah, kebijakan restorasi berisiko tetap terjebak pada pendekatan administratif dan simbolik, di mana monitoring kegiatan menitikberatkan keberhasilan pada jumlah pohon yang tertanam, bukan pada keberlanjutan fungsi ekosistem. Akibatnya, restorasi menjadi mahal, tidak efisien, dan rentan mengalami kegagalan jangka panjang.

Keberhasilan restorasi ekosistem tidak dapat dipisahkan dari keberlanjutan sosial-ekonomi masyarakat yang hidup di sekitar lanskap terdegradasi. Banyak program rehabilitasi mengalami kegagalan karena restorasi diposisikan sebagai agenda ekologis yang terpisah dari kebutuhan ekonomi masyarakat lokal.

REKKOSMIK menawarkan pendekatan integratif melalui pengembangan model restorasi produktif berbasis bioekonomi komunitas, yaitu model 3F (Widyati et al., 2019). Dalam model ini, pemulihan fungsi biologis tanah berlangsung bersamaan dengan produksi biomassa yang dapat dimanfaatkan sebagai sumber pangan, pakan ternak, dan energi terbarukan. Hal ini membuktikan bahwa restorasi dan produktivitas bukan dua tujuan yang saling bertentangan. Sebaliknya, rehabilitasi berbasis mikrobiom justru membuka peluang pengembangan ekonomi hijau berbasis lanskap terdegradasi. Dengan mempertahankan kontinuitas vegetasi dan aktivitas biologis tanah,

sistem restorasi produktif mampu meningkatkan stok karbon sekaligus memperkuat ketahanan pangan, energi, dan ekonomi masyarakat.

Gambar 5.2 merupakan peta jalan restorasi berbasis mikrobiom yang menghubungkan temuan ilmiah pada tingkat tapak dengan transformasi kebijakan dan dampak iklim pada skala nasional. Diagram ini menunjukkan bagaimana pilar konseptual, diagnostik, teknologi, dan aplikasi terhubung secara logis menuju satu tujuan strategis, yaitu optimasi restorasi ekosistem dan kontribusi nyata terhadap *FOLU Net Sink 2030*. Diagram ini merupakan representasi visual dari arsitektur ilmiah restorasi



Ilustrasi: Widyati (2026)

**Gambar 5.2** Diagram alur pengembangan REKKOSMIK untuk optimasi restorasi lahan terdegradasi dan capaian *FOLU Net Sink 2030*

Buku ini tidak diperjualbelikan.

nasional. Dalam konteks pembangunan berkelanjutan, model ini menunjukkan bahwa restorasi ekosistem dapat menjadi instrumen transformasi sosial-ekologis yang mendukung pencapaian SDGs, terutama SDG 1 (*No Poverty*), SDG 2 (*Zero Hunger*), SDG 13 (*Climate Action*), dan SDG 15 (*Life on Land*) (Bappenas, 2017; 2021).

### **E. Implikasi Global dan *Legacy* Ilmiah REKKOSMIK**

Pada tingkat global, REKKOSMIK memberikan kontribusi konseptual bagi perkembangan ilmu restorasi tropika dan restorasi berbasis mikrobiom. Selama ini, pendekatan restorasi global masih didominasi oleh perspektif revegetasi dan rehabilitasi vegetatif, sementara dimensi mikrobiologis tanah relatif kurang mendapat perhatian dalam desain restorasi.

REKKOSMIK memperlihatkan bahwa keberhasilan restorasi ekosistem tropika sangat ditentukan oleh kemampuan memulihkan sistem biologis tanah sebagai fondasi seluruh proses ekologis. Pendekatan ini memperkuat perkembangan paradigma restorasi modern yang menempatkan mikrobiom sebagai pengendali utama resiliensi ekosistem dan stabilitas karbon.

Dengan demikian, *legacy* ilmiah utama REKKOSMIK terletak pada reposisi mikrobiom tanah dari komponen pendukung menjadi pondasi utama restorasi ekosistem. REKKOSMIK menunjukkan bahwa masa depan restorasi tidak dapat hanya bertumpu pada revegetasi, tetapi harus dibangun melalui rekayasa jejaring biologis dan biogeokimia yang menopang keberlanjutan ekosistem dalam jangka panjang. Dalam konteks tersebut, Indonesia memiliki peluang besar untuk menjadi pusat pengembangan restorasi tropika berbasis mikrobiom, sekaligus memberikan kontribusi konseptual bagi pengembangan *soil-*

*centered restoration* dan *regenerative ecosystem restoration* pada tingkat global.

Pada akhirnya, restorasi ekosistem bukan sekadar upaya memperbaiki bentang lahan yang rusak, tetapi merupakan upaya membangun kembali pondasi kehidupan yang menopang keberlanjutan Bumi. Dalam perspektif REKKOSMIK, tanah tidak lagi dipahami sebagai media tumbuh yang pasif, melainkan sebagai sistem hidup yang menyimpan memori ekologis, mengatur siklus kehidupan, dan menentukan masa depan resiliensi lanskap tropika.

REKKOSMIK menegaskan bahwa keberhasilan restorasi tidak diukur dari banyaknya pohon yang ditanam, tetapi dari kemampuan memulihkan jejaring biologis dan biogeokimia yang memungkinkan ekosistem kembali berfungsi secara mandiri, produktif, dan berkelanjutan. Dengan mereposisi mikrobiom tanah sebagai pondasi restorasi, REKKOSMIK menghadirkan paradigma baru rehabilitasi lahan yang menghubungkan ilmu dasar, inovasi teknologi, mitigasi perubahan iklim, dan kesejahteraan masyarakat ke dalam satu arsitektur restorasi yang utuh.

Dalam menghadapi tantangan perubahan iklim, degradasi lahan, dan krisis keberlanjutan global, pendekatan restorasi berbasis mikrobiom menawarkan harapan baru bagi masa depan lanskap tropika. Oleh karena itu, REKKOSMIK tidak hanya merupakan kontribusi ilmiah dalam rehabilitasi lahan, tetapi juga bagian dari upaya membangun paradigma restorasi masa depan Indonesia, paradigma yang menempatkan tanah, mikrobiom, dan kehidupan sebagai pusat pembangunan berkelanjutan menuju *FOLU Net Sink 2030* dan masa depan Bumi yang lebih resilien.

## VI. KESIMPULAN

Naskah orasi ini menegaskan bahwa tantangan utama rehabilitasi lahan di Indonesia tidak hanya terletak pada kegagalan penanaman vegetasi, tetapi juga pada keruntuhan fungsi biologis tanah akibat hilangnya komunitas mikrobiom kunci yang menopang stabilitas ekosistem. Sintesis hasil penelitian lebih dari dua dekade menunjukkan bahwa keberhasilan restorasi ekosistem hanya dapat dicapai apabila pemulihan vegetasi disertai dengan pemulihan sistem mikrobiologis tanah sebagai fondasi proses ekologis, siklus hara, produktivitas biomassa, dan stabilisasi karbon.

Kontribusi ilmiah utama orasi ini adalah dirumuskannya REKKOSMIK sebagai paradigma restorasi berbasis rekayasa mikrobiom tanah. Dalam kerangka tersebut, adaptasi tanaman dipahami melalui relasi fungsional tumbuhan-mikrobiom, sedangkan kegagalan rehabilitasi dijelaskan melalui konsep *rhizospheric collapse*, yaitu keruntuhan fungsi biologis tanah akibat terputusnya relasi ekologis antara vegetasi dan komunitas mikroba tanah. Pendekatan ini mereposisi restorasi dari pendekatan berbasis tanaman menuju pendekatan sistem biologis terintegrasi (*holobiont-based restoration*).

Pada tingkat aplikatif, REKKOSMIK menunjukkan bahwa rekayasa mikrobiom mampu menjadi instrumen pemulihan lahan yang efektif, adaptif, dan berkelanjutan. Inovasi bioremediasi AAT berbasis BPS serta model restorasi produktif 3F membuktikan bahwa pemulihan fungsi biologis tanah dapat berjalan seiring dengan peningkatan produktivitas biomassa, penguatan ketahanan sosial-ekonomi masyarakat,

dan peningkatan kapasitas serapan karbon. Dengan demikian, restorasi berbasis mikrobiom memiliki relevansi ekologis sekaligus nilai strategis bagi pembangunan rendah karbon dan ekonomi hijau.

Dalam konteks kebijakan nasional, sintesis temuan ini memberikan dasar ilmiah bagi transformasi rehabilitasi lahan menuju restorasi yang lebih terukur, berbasis fungsi ekosistem, dan berorientasi jangka panjang. Rekayasa mikrobiom menempatkan tanah sebagai sistem hidup yang menentukan keberhasilan rehabilitasi. Karena itu, indikator restorasi tidak lagi cukup diukur melalui luas tanam atau pertumbuhan vegetasi, tetapi juga melalui pemulihan fungsi biologis tanah, peningkatan karbon organik tanah (SOC), dan stabilitas ekosistem. Pendekatan ini sejalan dengan implementasi *Updated NDC* sektor LULUCF dan target FOLU Net Sink 2030.

Dalam konteks global, REKKOSMIK memperkuat paradigma *soil-centered restoration* dan *microbiome-assisted ecosystem restoration* sebagai arah baru restorasi ekosistem tropika abad ke-21. Restorasi tidak lagi dipahami sekadar menanam kembali vegetasi, tetapi membangun kembali sistem kehidupan yang menopang keberlanjutan ekosistem. Dengan demikian, masa depan restorasi ekosistem akan sangat ditentukan oleh kemampuan memulihkan kehidupan biologis di dalam tanah menuju lanskap yang lebih resilien, rendah emisi, dan berkelanjutan.

## VII. PENUTUP

Masa depan restorasi lahan di Indonesia memerlukan perubahan paradigma dari pendekatan revegetasi konvensional menuju pemulihan sistem biologis tanah sebagai fondasi keberlanjutan ekosistem. Temuan-temuan ilmiah yang disampaikan dalam orasi ini menunjukkan bahwa mikrobiom tanah memegang peran sentral dalam menentukan ketahanan vegetasi, stabilitas karbon, produktivitas lahan, dan resiliensi ekosistem terhadap tekanan lingkungan. Oleh karena itu, rekayasa mikrobiom tanah tidak lagi dapat dipandang sebagai komponen tambahan dalam rehabilitasi lahan, melainkan sebagai inti dari restorasi ekosistem tropika yang berkelanjutan.

Pendekatan REKKOSMIK membuka ruang integrasi antara mikrobiologi tanah, restorasi lanskap, mitigasi perubahan iklim, dan pembangunan bioekonomi masyarakat. Dalam konteks global, pendekatan ini memperkuat perkembangan paradigma *soil-centered restoration* dan *microbiome-assisted ecosystem restoration* yang mulai menjadi arah baru restorasi tropika abad ke-21. Dengan dukungan ilmu pengetahuan, inovasi teknologi, dan kolaborasi multipihak, restorasi berbasis mikrobiom berpotensi menjadi bagian penting dari strategi pembangunan rendah emisi dan *nature-based solutions* Indonesia menuju FOLU Net Sink 2030.

Pada akhirnya, keberhasilan restorasi ekosistem tidak hanya ditentukan oleh banyaknya pohon yang ditanam, tetapi oleh pulihnya sistem biologis yang bekerja di bawahnya. Ketika mikrobiom tanah kembali berfungsi, kesuburan tanah, vegetasi, karbon, dan keberlanjutan kehidupan akan mengikuti. Dalam

perspektif tersebut, REKKOSMIK diharapkan dapat menjadi fondasi ilmiah bagi masa depan restorasi tropika Indonesia; restorasi yang tidak hanya memulihkan lahan, tetapi juga memulihkan keberlanjutan kehidupan bagi generasi mendatang.

Buku ini tidak diperjualbelikan.

## UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih dan penghargaan yang tinggi atas kesempatan yang diberikan kepada saya untuk mencapai jenjang tertinggi ditujukan kepada Presiden Republik Indonesia ke-8 Jend. Purn. Prabowo Subianto; juga Presiden ke-7 Bapak Ir. Joko Widodo yang mengangkat saya sebagai Peneliti Ahli Utama.

Kepala Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN), Prof. Dr. Arif Satria, S.P., M.Si.; Wakil Kepala BRIN, Prof. Dr. Ir. Amrulla Octavian, M.Sc., DESD, ASEAN. Eng.; Ketua Majelis Pengukuhan Profesor Riset Prof. Ir. Wimpie Agoeng Noegroho Aspar, MSCE., Ph.D; Sekretaris Majelis Pengukuhan Prof. Dr. Ir. Zainal Arifin, M.Sc; Sekretaris Utama Badan Riset dan Inovasi nasional Ibu Nur Tri Aries Suestiningtyas, S.IP., M.A., ; Kepala Organisasi Riset Hayati dan Lingkungan, Dr. Andes Hamurabi Rozak, M.Sc; Kepala Biro Organisasi dan Sumberdaya Manusia Ibu Ratih Retno Wulandari, S.Sos., M.Si., Kepala Pusat Riset Ekologi, Dr. Asep Hidayat, S.Hut., M.Sc;

Ucapan terima kasih secara khusus disampaikan kepada Tim Penelaah Orasi, Prof. Dr. Ir. Y. Purwanto, DEA; Prof. Dr. Puspita Lisdianti; Prof. Dr. Gadis Sri Haryani; dan Prof. Dr. Drs. Fatchur Rohman, M.Si.

Selanjutnya, kepada para pimpinan dan kolega di eks Badan Litbang Kehutanan KLHK; para Kepala Pusat Litbang Hutan dan Konservasi Alam, Litbang Produktivitas Hutan, Litbang Hutan, serta Pusat Standardisasi dan Pengembangan Hutan Berkelanjutan. Dari lingkungan inilah saya banyak belajar tentang integritas ilmiah, kerja lapangan, dan arti pengabdian.

Saya juga menyampaikan apresiasi yang tinggi kepada para kolega dari Dr. Sadino & Partners, Universitas Negeri Malang, Universitas Pakuan Bogor, dan Universitas Brawijaya Malang, PT. Sinar Mas Group, PT. Bukit Asam, PT. Indomuro Kencana yang telah menjadi mitra penting dalam penelitian, pengembangan ilmu yang memperkaya perjalanan riset saya.

Saya menyampaikan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada para guru SD hingga SMA yang telah menanamkan dasar pengetahuan, karakter, dan keberanian untuk bermimpi. Rasa hormat dan terima kasih saya sampaikan kepada para pembimbing sarjana hingga doktoral, terutama Dr. Irdika Mansur, Prof. Cecep Kusmana, Prof. Iswandi Anas, dan Prof. Erdi Santoso, yang telah menanamkan nilai kerja keras, integritas, dan keberanian berpikir kritis yang menjadi bekal penting dalam perjalanan akademik saya.

Kepada Bapak dan Ibu saya, Bapak Soekarno dan Ibu Sudarmi, serta Bapak dan Ibu mertua, Bapak Akmal Maas dan Ibu Nurjanah, terima kasih yang tak terhingga atas doa, kasih sayang, dan nilai-nilai hidup yang menjadi fondasi seluruh perjalanan ini.

Terima kasih yang mendalam saya sampaikan kepada suami saya, Drs. Budi Hermansyah yang setia menua bersama dan telah menemani jatuh bangun dalam suka dan duka. Dan tentu saja pada anak-anak kebanggaan saya, Agam Noor Kharisma dan Bagus Pribadi. Kalian adalah sumber kekuatan, penghiburan, dan alasan ibu untuk terus melangkah.

Ucapan terima kasih yang hangat saya sampaikan kepada rekan-rekan ex Badan Litbang Kehutanan, rekan-rekan Kelti Silvikultur, Mikrobiologi Hutan, Pengaruh Hutan, KLHK, serta teman-teman Kelris FDL, RRLK, dan RET BRIN yang selalu menjadi mitra diskusi, sekaligus sahabat di lapangan dan di

laboratorium. Saya juga berterima kasih kepada teman-teman SD, SMP, SMA, Fabiogama 86, dan Pascasarjana IPB, serta sahabat di CWS Kusnoto dan Inderaja, yang senantiasa memberi dukungan moral, tawa, dan semangat di tengah padatnya perjalanan penelitian.

Buku ini tidak diperjualbelikan.

## DAFTAR PUSTAKA

- Afidah, I., Chairiawaty, & Zulfa, S. H. (2023). Integrating local wisdom for sustainable forest community empowerment: Lessons from Indonesia and Malaysia. *Journal of Information System Engineering and Management*, 10(48s), 437–451. <https://doi.org/10.52783/jisem.v10i48s.9553>
- Badan Litbang Kehutanan. (2009). *Laporan evaluasi keberhasilan Program GERHAN 2003-2009*.
- Badan Perencanaan Pembangunan Nasional (2017). Perpres No. 59/2017 tentang Pelaksanaan Tujuan Pembangunan Berkelanjutan/SDGs. <https://sdgs.bappenas.go.id/tag/bappenas/>
- Badan Perencanaan Pembangunan Nasional (Bappenas) (2021). Roadmap SDGs Indonesia 2020–2030. <https://sdgs.bappenas.go.id/tag/bappenas/>
- Binkley, D., & Fisher, R. F. (2019). *Ecology and management of forest soils* (5th ed.). Wiley.
- Dewi, T., **Widyati**, E., Maftu'ah, E., Irianto, R. S. B., Hartatik, S. E., & Susilo, A. (2025). Protecting agricultural soils from contamination to produce healthy foods: Policies and practices in Indonesia. In J. A. Parray, N. ShaREKKOSMIK, & A. K. Haghi (Eds.), *Producing healthy food with healthy soils* (pp. 35–57). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-82536-1\\_4](https://doi.org/10.1007/978-3-031-82536-1_4)
- Faisal, A. (2025, 9 Juli). Komisi IV ungkap anggaran rehabilitasi Kemenhut hanya Rp62.500 per ha. *IDN Times*. <https://www.idntimes.com/news/indonesia/komisi-iv-ungkap-anggaran-rehabilitasi-kemenhut-hanya-rp62-500-per-ha-00-xvwcc-xgmqwn>

- Fiqa, A. P., Yulistyarini, T., Budiharta, S., & **Widyati**, E. (2025). Ecological restoration and reclamation of degraded lands in Indonesia: Eco-physiological and anatomy as an advance approach. In J. A. Parray (Ed.), *Soil and land use change* (pp. 79–98). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-93075-1\\_9](https://doi.org/10.1007/978-3-031-93075-1_9)
- Fisher, M. R., Daulay, M. H., Wicaksono, S. A., Bisiaux, A., & Arthalina, E. C. (2023). *Forest restoration and rehabilitation in Indonesia: A policy and legal review*. EUREDD Facility. <https://www.euredd.efi.int/wp-content/uploads/2023/03/FRR-Indonesia-Report.pdf>
- Hairiah, K., van Noordwijk, M., Sari, R. K., Saputra, D. D., Widiyanto, Suprayogo, D., Kurniawan, S., Prayogo, C., & Gusli, S. (2020). Soil carbon stocks in Indonesian (agro)forest transitions: Compaction conceals lower carbon concentrations in standard accounting. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 294, 106879. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2020.106879>
- Hakim, S., Naqqash, T., Nawaz, M. S., Laraib, I., Siddique, M. J., Zia, R., Mirza, M. S., & Imran, A. (2021). Rhizosphere engineering with plant growth-promoting microorganisms for agriculture and ecological sustainability. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 5, 617157. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2021.617157>
- Hardianti, S. P. (2025). *Building with nature: Peran Wetlands International Indonesia dalam jaringan advokasi transnasional untuk mendukung FOLU Net Sink 2030* [Skripsi]. Universitas Pembangunan Nasional Veteran Jakarta.
- Hazra, F., & **Widyati**, E. (2007). Isolasi, seleksi bahan pembawa dan formulasi inokulum *Thiobacillus* spp. *Jurnal Tanah dan Lingkungan*, 9(2), 71–76.
- Johnson, D. B., & Hallberg, K. B. (2005). Acid mine drainage remediation options: A review. *Science of the Total Environment*, 338(1–2), 3–14. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2004.09.002>

- Kementerian Lingkungan hidup dan Kehutanan. (2021). Rencana Operasi lapangan menuju *FOLU Net Sink 2030*. <https://www.scribd.com/document/889314780/Rencana-Operasi-Lapangan-Menuju-Folu-Netsink-2030>
- Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan. (2023). *Statistik kehutanan Indonesia 2023*. <https://statistik.kehutanan.go.id>
- Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan. (2023). *Indonesia's FOLU Net Sink 2030: Climate actions towards 2030*. [https://www.menlhk.go.id/cadmin/uploads/BOOK\\_FOLU\\_NET\\_SINK\\_Indonesia\\_s\\_Climate\\_Actions\\_Towards\\_2030\\_a3d4f1fa43.pdf](https://www.menlhk.go.id/cadmin/uploads/BOOK_FOLU_NET_SINK_Indonesia_s_Climate_Actions_Towards_2030_a3d4f1fa43.pdf)
- Kementerian Kehutanan. (2025, 9 Juli). Peringatan Hari Penanggulangan Degradasi Lahan dan Kekeringan Dunia 2025: Dorong restorasi lahan untuk pembangunan hutan inklusif. <https://www.kehutanan.go.id/pers/article-54>
- Kumar, A., Das, A., Singh, D., Das, M. K., Srivastava, G. P., Singh, J. P., & Chakdar, H. (2023). Soil health restoration in degraded lands: A microbiological perspective. *Land Degradation & Development*, 34(17), 5155–5170.
- Kurniaty, R., Bustomi, S., & **Widyati**, E. (2013). Penggunaan *Rhizobium* dan mikoriza dalam pertumbuhan bibit kaliandra (*Calliandra calothyrsus*). *Jurnal Penelitian Sosial dan Ekonomi Kehutanan*, 1(2), 59–64.
- Lelana, N. E., Utami, S., **Widyati**, E., Puspitaningtyas, D. M., Yulianti, M., & Supriadi, B. (2022). The bacterial composition and diversity in a *Eucalyptus pellita* plantation in South Sumatra, Indonesia. *Diversity*, 14(6), 442. <https://doi.org/10.3390/d14060442>
- Liang, Y., Leifheit, E. F., Lehmann, A., & Rillig, M. C. (2025). Soil organic carbon stabilization is influenced by microbial diversity and temperature. *Scientific Reports*, 15, 13990. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-98009-9>

- Ma, Y., Prasad, M., Rajkumar, M., Freitas, H. 2011. Plant growth promoting rhizobacteria and endophytes accelerate phytoremediation of metalliferous soils. *Biotechnology Advances* 29(2): 248-258. DOI: 10.1016/j.biotechadv.2010.12.001
- Nawir, A. A., Murniati, Wibowo, L. R., Hiyama, C., & Gumartini, T. (2007). Portraits of rehabilitation projects in Indonesia. In A. A. Nawir, Murniati, & L. R. Wibowo (Eds.), *Forest rehabilitation in Indonesia: Where to after more than three decades?* CIFOR.
- Pioli, S., Sarneel, J., Thomas, H., Domene, X., Andrés, P., Hefting, M., Reitz, T., Laudon, H., Sandén, T., Piscova, V., Aurela, M., & Brusetti, L. (2020). Linking plant litter microbial diversity to microhabitat conditions, environmental gradients and litter mass loss. *Soil Biology and Biochemistry*, 144, 107778. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2020.107778>
- Prommer, J., Walker, T. W. N., Wanek, W., Braun, J., Zezula, D., Hu, Y., Hofhansl, F., & Richter, A. (2020). Increased microbial growth, biomass, and turnover drive soil organic carbon accumulation at higher plant diversity. *Global Change Biology*, 26, 669–681. <https://doi.org/10.1111/gcb.14777>
- Said, N. S. (2014). Teknologi pengolahan air asam tambang batubara: Alternatif pemilihan teknologi. *Jurnal Air Indonesia*, 7(2), 1–20.
- Santonja, M., Rancon, A., Formin, N., Baldy, V., Hättenschwiler, S., Fernandez, C., Montès, N., & Mirleau, P. (2017). Plant litter diversity increases microbial abundance, fungal diversity, and carbon and nitrogen cycling. *Soil Biology and Biochemistry*, 111, 124–134. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2017.04.006>
- Sheoran, V., Sheoran, A., & Poonia, P. (2010). Soil reclamation of abandoned mine land by revegetation: A review. *International Journal of Soil, Sediment and Water*, 3(2), Article 13.
- Siswadi. (2017). Evaluasi pertumbuhan tanaman jabon (*Anthocephalus cadamba*) di Kabupaten Pulang Pisau, Kalimantan Tengah. *Prosiding Komhindo III*. <https://doi.org/10.5281/zenodo.4085008>

- Smith, S. E., & Read, D. J. (2008). *Mycorrhizal symbiosis* (3rd ed.). Academic Press.
- United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC). 2022. Enhanced nationally contribution Republic of Indonesia. [https://unfccc.int/sites/default/files/NDC/2022-09/23.09.2022\\_Enhanced%20NDC%20Indonesia.pdf](https://unfccc.int/sites/default/files/NDC/2022-09/23.09.2022_Enhanced%20NDC%20Indonesia.pdf)
- Van der Heijden, M. G. A., Bardgett, R. D., & van Straalen, N. M. (2008). The unseen majority: Soil microbes as drivers of plant diversity and productivity. *Ecology Letters*, *11*(3), 296–310. <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2007.01139.x>
- Verhoeven, D., Berkhout, E., Sewell, A., & van der Esch, S. (2024). The global cost of international commitments on land restoration. *Land Degradation & Development*, *35*, 4864–4874. <https://doi.org/10.1002/ldr.5263>
- Widyati**, E. (2005). Rehabilitasi lahan bekas tambang batubara melalui perbaikan kualitas tanah dengan metode bioremediasi. *Prosiding Ekspose Penerapan Hasil Litbang Hutan dan Konservasi Alam*.
- Widyati**, E. (2006). *Bioremediasi tanah bekas tambang batubara dengan sludge industri kertas untuk memacu revegetasi lahan* [Disertasi]. Institut Pertanian Bogor.
- Widyati**, E. (2007a). Formulasi inokulum mikroba: MA, BPF dan *Rhizobium* asal lahan bekas tambang batubara. *Biodiversitas*, *8*(3), 238–241.
- Widyati**, E. (2007b). Pemanfaatan bakteri pereduksi sulfat untuk bioremediasi tanah bekas tambang batubara. *Biodiversitas*, *8*(4), 283–286.
- Widyati**, E. (2008). Peranan mikroba tanah pada kegiatan rehabilitasi lahan bekas tambang. *Info Hutan*, *5*(2), 151–160.
- Widyati**, E. (2009a). Pemanfaatan sludge industri pulp dan kertas sebagai amelioran tanah. *Jurnal Selulosa*, *44*(1), 41–48.

- Widyati, E.** (2009b). Kajian fitoremediasi pada lahan bekas tambang batubara. *Tekno Hutan Tanaman*, 2(2), 67–75.
- Widyati, E.** (2011). Formulasi inokulum bakteri pereduksi sulfat untuk mengatasi air asam tambang. *Tekno Hutan Tanaman*, 4(3), 119–125.
- Widyati, E.** (2012a). Pemanfaatan sludge industri pulp dan kertas untuk ameliorasi tanah *tailing* tambang emas. *Jurnal Selulosa*, 2(1), 28–38.
- Widyati, E.** (2012b). Optimasi pertumbuhan *Acacia crassicarpa* pada tanah bekas tambang batubara. *Jurnal Penelitian Hutan Tanaman*, 8(1), 19–30. <https://doi.org/10.20886/jpht.2011.8.1.19-30>
- Widyati, E.** (2016a). Microbial community behaviour in the rhizosphere of *Litsea cubeba* after pruning. *Jurnal Manajemen Hutan Tropika*, 22(3), 149–157. <https://doi.org/10.7226/jtfm.22.3.149>
- Widyati, E.** (2016b). Peranan fitohormon pada pertumbuhan tanaman. *Galam*, 2(1), 1–13.
- Widyati, E.** (2017a). *Memahami bisnis di rizosfer*. Deepublish.
- Widyati, E.** (2017b). Memahami komunikasi tumbuhan–tanah dalam areal rhizosfer. *Jurnal Sumberdaya Lahan*, 11(1). <https://doi.org/10.2018/jsdl.v11i1.8190>
- Widyati, E.** (2018). *Biologi tanah: Membedah kerapuhan sistem budidaya monokultur*. Deepublish.
- Widyati, E., Budiharta, S., Akbar, A., Susilo, A., Kurniawan, A., & Sadili, A.** (2025). Changes in soil–root–organism interactions following tropical forest conversion. *Applied Soil Ecology*, 213, 106253. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2025.106253>
- Widyati, E., Darwiati, W., & Yulianti, M.** (2019). Land management in optimizing productivity of limited land (3F). *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 394(1), 012068.

- Widyati, E., Helbert, Kusuma, Y. W. C., Irianto, R. S. B., Lelana, N. E., Yeny, I., & Gao, C. (2023).** Microbial community dynamics due to land use change. In J. A. Parray (Ed.), *Climate change and microbiome dynamics* (pp. 51–69). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-21079-2\\_4](https://doi.org/10.1007/978-3-031-21079-2_4)
- Widyati, E., Irianto, R. S. B., & Susilo, A. (2022b).** Rhizosphere upheaval after tree cutting. *Communicative & Integrative Biology*, *15*(1), 105–114. <https://doi.org/10.1080/19420889.2022.2068110>
- Widyati, E., Irianto, R. S. B., Dewi, T., Maftu'ah, E., Hartatik, S. E., & Parray, J. A. (2024b).** Emerging strategies for engineering microbial communities. In J. A. Parray & W.-J. Li (Eds.), *Microbiome-assisted bioremediation* (pp. 401–427). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-21911-5.00009-X>
- Widyati, E., Mansur, I., Kusmana, C., & Santoso, E. (2005a).** Pemanfaatan sludge industri kertas sebagai pembenah tanah. *Jurnal Penelitian Sosial dan Ekonomi Kehutanan*, *2*(2), 127–134.
- Widyati, E., Mansur, I., Kusmana, C., & Santoso, E. (2005b).** Biodiversitas dan efektivitas fungi mikoriza arbuskula. *Jurnal Hutan dan Konservasi Alam*, *2*(3), 295–302.
- Widyati, E., Nuroniah, H. S., Tata, H. L., Mindawati, N., Lisnawati, Y., & Darwo. (2022a).** Soil degradation due to conversion from natural to plantation forests. *Forests*, *13*(11), 1913. <https://doi.org/10.3390/f13111913>
- Widyati, E., Siarudin, M., & Indrajaya, Y. (2022d).** The dynamic of functional microbes community under *Acacia auriculiformis* agroforestry. *Jurnal Manajemen Hutan Tropika*, *28*(2), 119–129. <https://doi.org/10.7226/jtfm.28.2.119>
- Widyati, E., Susilo, A., Budiiriyanto, R. S., Pasaribu, G., Darwiati, W., Wardani, M., & et al. (2024a).** Revealing rhizosphere of edelweiss (*Anaphalis longifolia*). *International Journal of Agriculture and Biology*. <https://doi.org/10.17957/IJAB/15.2107>

- Widyati, E., Sutiyono, Darwo, Mindawati, N., Yulianti, M., & Prameswari, D. (2022b).** Optimum plant density and harvest age for *Calliandra* SRC. *Forest Science and Technology*, 18(1), 26–35. <https://doi.org/10.1080/21580103.2022.2039305>
- Widyati, E., & Wahyudi, A. (2012).** *Dari hutan kembali ke hutan: Sludge industri kertas memperbaiki tanah pertanian, kehutanan, dan pertambangan*. Pusat Penelitian Produktivitas Hutan.
- Widyati, E., Widyastuti, R., & Lantifasari, R. (2010).** Sidik cepat biokatalisasi air asam tambang. *Jurnal Penelitian Hutan Tanaman*, 7(1), 51–58.
- Wu, H., Yan, W., Wu, H., Zhang, J., Zhang, Z., Rensing, C., & Lin, W. (2022). Consecutive monoculture regimes affect rhizosphere viral community. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 337, 108076. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2022.108076>
- Yang, Y., Dou, Y., Wang, B., Wang, Y., Liang, C., An, S., Soromotin, A., & Kuzyakov, Y. (2022). Increasing contribution of microbial residues to soil organic carbon. *Soil Biology and Biochemistry*, 170, 108688. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2022.108688>
- Yao, Y., He, Y., Wang, P., Liu, R., Fu, M., Feng, J., Hu, H., & Zhang, S. (2025). Soil microbes enhance stability of soil organic carbon pools. *Journal of Environmental Management*, 395, 127808. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2025.127808>
- Younger, P. L., Banwart, S. A., & Hedin, R. S. (2002). *Mine water: Hydrology, pollution, remediation*. Springer.
- Zhang, X., Dai, G., Ma, T., Liu, N., Hu, H., Ma, W., Zhang, J., Wang, Z., Peterse, F., & Feng, X. (2020). Links between microbial biomass and necromass components. *Geoderma*, 379, 114623. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114623>
- Zhao, J., Feng, X., Hu, J., He, M., Wang, S., Yang, Y., & Chen, L. (2024). Mineral and microbial properties drive MAOM formation. *Global Change Biology*, 30(12). <https://doi.org/10.1111/gcb.70004>

## **DAFTAR CAPAIAN DALAM BIDANG IPTEK, RISET, DAN INOVASI**

### **Karya Tulis Ilmiah**

- |                                   |         |
|-----------------------------------|---------|
| 1. Buku Nasional                  | 5 buah  |
| 2. Bagian dari Buku Internasional | 5 buah  |
| 3. Jurnal Internasional           | 11 buah |
| 4. Jurnal Nasional                | 31 buah |
| 5. Prosiding Internasional        | 5 buah  |

### **Kekayaan Intelektual**

- |                   |        |
|-------------------|--------|
| 6. Paten Nasional |        |
| a. Terdaftar      | 1 buah |
| 7. Hak Cipta      | 4 buah |

Buku ini tidak diperjualbelikan.

## DAFTAR CAPAIAN DALAM BIDANG IPTEK, RISET, DAN INOVASI

### Karya Tulis Ilmiah

#### Buku Nasional

1. **Widyati, E.**, Wahyudi, A. (2012). Dari Hutan Kembali Ke Hutan: Sludge Industri Kertas Memperbaiki Tanah Pertanian, Kehutanan, dan Pertambangan. Bogor: Pusat Penelitian Produktivitas Hutan.
2. **Widyati, E.** (2017). Memahami bisnis di rhizosfir: Bagaimana tanaman-biota tanah bertransaksi. Yogyakarta: Deepublish.
3. **Widyati, E.** (2018). Biologi tanah: Membedah kerapuhan sistem budidaya monokultur. Yogyakarta: Deepublish.
4. **Widyati, E.**, Narendra, B.H, Abdullah, ....., Yulianti, M. 2019. Energi Alternatif dari Hutan. Sintesis RPPI 6. Badan Litbang dan Inovasi Lingkungan Hidup dan Kehutanan.
5. Octavia, D., Suharti, S., Danu, Darwiati, W., Adalina, Y., Prameswari, D., **Widyati, E.**, Yulianti, M., Agustarini, R. 2019. Pedoman Alih Teknologi Budidaya Tanaman Hutan untuk mendukung program Perhutanan Sosial. Dee Pusblish Yogyakarta.

#### Bagian dari Buku Internasional

6. Pramova, E., Hills, T., **Widyati, E.**, Santoso, H., Purbopuspito, J., Syaufina, L., Sakuntaladewi, N., Duke, N.C., Sukardjo, S., Adiwibowo, A., Kholibrina, C.R. . 2012. Human dimensions and the roles of tropical wetlands in adaptation to climate change In Murdiyarto, D.; Kauffman, J.B.; Warren, M.; Pramova, E.; Hergoualc'h, K. Tropical wetlands for climate change adaptation and mitigation: Science and policy imperatives with special reference to Indonesia: 28–36p. Bogor, Indonesia: Center for International Forestry Research (CIFOR).

7. **Widyati**, E., Helbert, Kusuma, Y. W. C., Irianto, R. S. B., Lelana, N. E., Yeny, I., & Gao, C. (2023). Microbial Community Dynamics Due to Land Use Change: Some Circumstances in the Tropical Rain Forest of Indonesia. In: Parray, J.A. (eds) *Climate Change and Microbiome Dynamics*. Climate Change Management. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-21079-2\\_4](https://doi.org/10.1007/978-3-031-21079-2_4) (pp. 51–69).
8. **Widyati**, E., Irianto, R. S. B., Dewi, T., Maftu'ah, E., Hartatik, S. E., & Parray, J. A. (2024). Emerging strategies for engineering microbial communities to augment bioremediation in Indonesia. In J.A. Parray, J.A., Wen-Jun, L. *Microbiome-Assisted Bioremediation*. In *Microbiome Research in Plants and Soil*. Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-21911-5.00009-X>. (pp. 401–427).
9. Dewi, T., **Widyati**, E., Maftu'ah, E., Irianto, R.S.B., Hartatik, S. E., Susilo, A., ... (2025). Protecting agricultural soils from contamination to produce healthy foods: Policies and practices in Indonesia. In: Parray, J.A., ShaREKKOSMIK, N., Hagh, A.K. (eds) *Producing Healthy Food with Healthy Soils*. Sustainable Landscape Planning and Natural Resources Management. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-82536-1\\_4](https://doi.org/10.1007/978-3-031-82536-1_4) (pp. 35–57).
10. Fiqa, A.P., Yulistyarini, T., Budiharta, S., ..., **Widyati**, E. (2025). Ecological Restoration and Reclamation of Degraded Lands in Indonesia: Eco-Physiological and Anatomy as an Advance Approach. In: Parray, J.A. (eds) *Soil and Land Use Change*. Sustainable Landscape Planning and Natural Resources Management. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-93075-1\\_9](https://doi.org/10.1007/978-3-031-93075-1_9) (pp. 79–98).

## Jurnal Internasional

11. Barry, K. M., Irianto, R. S. B., Santoso, E., Turjaman, M., **Widyati**, E., Sitepu, I., & Mohammed, C. (2004). Incidence of heartrot in harvest-age *Acacia mangium* in Indonesia, using a rapid survey method. *Forest Ecology and Management*, 190(2–3), 273–280. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2003.10.017>
12. **Widyati**, E. (2016). Microbial community behaviour in the rhizosphere of *Kilemo* (*Litsea cubeba* L. Pers) after pruning. *Jurnal Manajemen Hutan Tropika*, 22(3), 149–157. DOI:10.7226/jtfm.22.3.149
13. **Widyati**, E., Nuroniah, H. S., Tata, H. L., Mindawati, N., Lisnawati, Y., Darwo, ... (2022). Soil degradation due to conversion from natural to plantation forests in Indonesia. *Forests*, 13(11), 1913. <https://doi.org/10.3390/f13111913>
14. **Widyati**, E., Irianto, R. S. B., & Susilo, A. (2022). Rhizosphere upheaval after tree cutting: Soil sugar flux and microbial behavior. *Communicative & Integrative Biology*, 15(1), 105–114. DOI:10.1080/19420889.2022.2068110
15. Lelana, N. E., Utami, S., **Widyati**, E., Puspitaningtyas, D. M., Yulianti, M., Supriadi, B., ... (2022). The bacterial composition and diversity in a *Eucalyptus pellita* plantation in South Sumatra, Indonesia. *Diversity*, 14(6), 442. <https://doi.org/10.3390/d14060442>
16. **Widyati**, E., Siarudin, M., & Indrajaya, Y. (2022). The dynamic of functional microbes community under auri (*Acacia auriculiformis* Cunn. ex Benth) agroforestry system. *Jurnal Manajemen Hutan Tropika*, 28(2), 119–119. DOI: 10.7226/jtfm.28.2.119
17. **Widyati**, E., Sutiyono, Darwo, Mindawati, N., Yulianti, M., Prameswari, D., ... (2022). Optimum plant density and harvest age for maximizing productivity and minimizing competition in a *Calliandra* short-rotation-coppice plantation in West Java, Indonesia. *Forest Science and Technology*, 18(1), 26–35. <https://doi.org/10.1080/21580103.2022.2039305>

18. Nugroho, H. Y. S. H., Indrajaya, Y., Astana, S., Murniati, Suharti, S., Basuki, T. M., ... **Widyati**, E. (2023). A chronicle of Indonesia's forest management: A long step towards environmental sustainability and community welfare. *Land*, 12(6), 1238
19. Hartatik, S. E., Nisaa, R. M. R., Witasari, L., Fardhani, I., & **Widyati**, E. (2023). Trans Papuan Highway Construction and Honey Eater Bird (*Macgregoria pulchra*) Population. *Journal of Forest Science Avicennia*, 6(2), 231–235.
20. **Widyati**, E., Susilo, A., Budiirianto, R. S., Pasaribu, G., Darwiati, W., Wardani, M., ... (2024). Revealing rhizosphere of edelweiss (*Anaphalis longifolia*), plant pioneer species in the volcanic mountain ecosystem in Indonesia. <https://doi.org/10.17957/IJAB/15.2107>
21. **Widyati**, E., Budiharta, S., Akbar, A., Susilo, A., Kurniawan, A., Sadili, A., ... (2025). Changes in soil–root–organism interactions following tropical forest conversion to tree and oil palm plantations. *Applied Soil Ecology*, 213, 106253. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2025.106253>

### Jurnal Nasional

22. **Widyati**, E., Santoso, E., Irianto, R. S. B., Santosa, S., & Sutarman, S. (2001). Studi biodegradasi karbofuran oleh *Pseudomonas* sp. *Agritek*, 9(3), 1054–1059.
23. **Widyati**, E., Irianto, R. S. B., Santosa, S., Najmullah, N., & Sutarman, S. (2001). Dampak penggunaan insektisida karbofuran terhadap cendawan ektomikoriza *Pisolithus arrhizus* dan *Scleroderma columnare* pada bibit *Pinus merkusii*. *Agritek*, 9(3), 1178–1182.
24. Santoso, E., Irianto, R. S. B., Turjaman, M., **Widyati**, E., & Yulianti, S. I. R. (2003). Application of vesicular arbuscular mycorrhiza to promote *Khaya ivorensis* seedling growth. *Buletin Penelitian Hutan*, 636, 27–31.

25. **Widyati**, E., Mansur, I., Kusmana, C., & Santoso, E. (2005). Pemanfaatan sludge industri kertas sebagai agen pembenah tanah pada lahan bekas tambang batubara. *Jurnal Penelitian Sosial dan Ekonomi Kehutanan*, 2(2), 127–134.
26. **Widyati**, E., Mansur, I., Kusmana, C., & Santoso, E. (2005). Biodiversity and effectiveness of arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) isolated from ex-coal mining area. *Journal of Forest and Nature Conservation Research*, 2(3), 295–302.
27. **Widyati**, E. (2005). Rehabilitasi lahan bekas tambang batubara melalui perbaikan kualitas tanah dengan metode bioremediasi. *Prosiding Ekspose Penerapan Hasil Litbang Hutan dan Konservasi Alam*.
28. **Widyati**, E. (2006). Bioremediasi tanah bekas tambang batubara dengan sludge industri kertas untuk memacu revegetasi lahan [Disertasi]. Institut Pertanian Bogor.
29. Hazra, F., & **Widyati**, E. (2007). Isolasi, seleksi bahan pembawa dan formulasi inokulum *Thiobacillus* spp. *Jurnal Tanah dan Lingkungan*, 9(2), 71–76.
30. **Widyati**, E. (2007). Formulasi inokulum mikroba: MA, BPF dan *Rhizobium* asal lahan bekas tambang batubara untuk bibit *Acacia crassicarpa* Cunn. ex Benth. *Biodiversitas*, 8(3), 238–241.
31. **Widyati**, E. (2007). Pemanfaatan bakteri pereduksi sulfat untuk bioremediasi tanah bekas tambang batubara. *Biodiversitas*, 8(4), 283–286.
32. Pudjiharta, A., **Widyati**, E., Adalina, Y., & Syafruddin, H. (2008). Kajian teknik rehabilitasi lahan alang-alang. *Info Hutan*, 219, 30–36.
33. **Widyati**, E. (2008). Peranan mikroba tanah pada kegiatan rehabilitasi lahan bekas tambang. *Info Hutan*, 5(2), 151–160.
34. **Widyati**, E. (2009). Kajian fitoremediasi sebagai salah satu upaya menurunkan akumulasi logam akibat air asam tambang pada lahan bekas tambang batubara. *Tekno Hutan Tanaman*, 2(2), 67–75.

35. **Widyati**, E. (2009). Pemanfaatan Sludge industri pulp dan kertas sebagai amelioran tanah untuk memacu rehabilitasi lahan. *Jurnal Selulosa*, 44(1), 41–48.
36. **Widyati**, E., & Rostiwati, T. (2010). Memahami sifat-sifat tanah gambut untuk optimasi pemanfaatan lahan gambut. Bogor: Pusat Penelitian dan Pengembangan Hutan Tanaman.
37. **Widyati**, E., & Rostiwati, T. (2010). Menelaah kerusakan lingkungan akibat pertambangan mineral. *Mitra Hutan Tanaman*, 5(2), 121–128.
38. **Widyati**, E., Darwiati, W., & Yulianti, M. (2010). Ameliorasi tanah gambut melalui kegiatan agroforestry. *Tekno Hutan Tanaman*, 3(3), 121–130.
39. **Widyati**, E., Widyastuti, R., & Lantifasari, R. (2010). Sidik cepat biokatalisasi air asam tambang pada lahan bekas tambang batubara. *Jurnal Penelitian Hutan Tanaman*, 7(1), 51–58.
40. **Widyati**, E. (2011). Potensi tumbuhan bawah sebagai akumulator logam berat untuk membantu rehabilitasi lahan bekas tambang. *Mitra Hutan Tanaman*, 6(2), 47–56.
41. **Widyati**, E. (2011). Study on optimizing peatland management and climate change issues. *Tekno Hutan Tanaman*, 4(2), 57–68.
42. **Widyati**, E. (2011). Formulasi inokulum bakteri pereduksi sulfat yang diisolasi dari sludge industri kertas untuk mengatasi air asam tambang. *Tekno Hutan Tanaman*, 4(3), 119–125.
43. **Widyati**, E. (2012). Pemanfaatan sludge industri pulp dan kertas untuk ameliorasi tanah *tailing* tambang emas. *Jurnal Selulosa*, 2(1), 28–38.
44. **Widyati**, E. (2013). Pentingnya keragaman fungsional organisme tanah terhadap produktivitas lahan. *Tekno Hutan Tanaman*, 6(1), 29–37.

45. **Widyati**, E. (2013). Memahami interaksi tanaman–mikroba. *Tekno Hutan Tanaman*, 6(1), 13–20.
46. **Widyati**, E. (2013). Dinamika komunitas mikroba di rhizosfer dan kontribusinya terhadap pertumbuhan tanaman hutan. *Tekno Hutan Tanaman*, 6(2), 55–64.
47. Kurniaty, R., Bustomi, S., & **Widyati**, E. (2013). Penggunaan rhizobium dan mikoriza dalam pertumbuhan bibit kaliandra (*Calliandra calothyrsus*) umur 5 bulan. *Jurnal Penelitian Sosial dan Ekonomi Kehutanan*, 1(2), 59–64.
48. **Widyati**, E. (2014). Memahami komunikasi tumbuhan–tanah dalam areal rhizosfer untuk optimasi pengelolaan lahan. *Jurnal Sumberdaya Lahan*, 11(1), 33–42.
49. **Widyati**, E. (2015). Efektivitas pemupukan terhadap pertumbuhan terubusan Kilemo (*Litsea cubeba* L. Persoon) yang dipangkas. *Jurnal Penelitian Sosial dan Ekonomi Kehutanan*, 12(1), 11–22.
50. **Widyati**, E. (2016). Peranan fitohormon pada pertumbuhan tanaman dan implikasinya terhadap pengelolaan hutan. *Galam*, 2(1), 1–13.
51. Sembiring Y.R.V., Andriyanto, M., Siagian, N., **Widyati**, E., Azwir. 2016. Isolasi bakteri pereduksi sulfat untuk memperbaiki sifat kimia tanah bekas tambang batubara dan pengaruhnya terhadap karet (*Hevea brasiliensis*) di polibeg. *Jurnal Penelitian Karet*, 2016, 34 (2):165–174
52. **Widyati**, E. (2019). Intervensi manusia terhadap komunitas rhizosfir: Review (Human Disturbance on Rhizosphere Communities: Review). *Jurnal Manusia dan Lingkungan*, 26(1), 10–19.

## Prosiding Internasional

53. Tata, H.L., Widyati, E. 2014. Diversity of macro-fungi from Halimun-Salak National park and its prospect as nutraceutical and medicines. Conference: THE 2 INAFOR International Conference of Indonesia Forestry Researchers International Conference of Indonesia At: Jakarta. DOI:10.13140/2.1.1530.8488
54. **Widyati**, E., Darwiati, W., & Yulianti, M. (2019). Land management in optimizing productivity of limited land to deal with rural food, feed and fuel (3F) security. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 394(1), 012068.
55. Prameswari, D., **Widyati**, E., & Andadari, L. (2021). Improving the growth of cempaka (*Elmerillia ovalis*) seedlings to accelerate ex situ plantation. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 886(1), 012113.
56. **Widyati**, E., Yulianti, M., Darwiati, W., Irianto, R. S. B., & Prameswari, D. (2021). Natural colonization of vegetation under twenty years restoration of ex-cement mining. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 886(1), 012112.
57. Pasaribu, G., **Widyati**, E., & Susilo, A. (2024). Tree species composition in the habitat of *Taxus sumatrana* in the Sibuaton protected forest, North Sumatra Province: Implication for conservation. AIP Conference Proceedings, 3001(1), 080045.

## Kekayaan Intelektual

Paten Nasional

Terdaftar

1. Briket Benih Untuk Restorasi Lahan
2. Foto Scan Electron Microscopy Anatomi Daun Pala Jawa

## Hak Cipta

1. Buku Memahami Bisnis di rhizosfer, Bagaimana tanaman dan biota tanah bertransaksi.
2. Buku Biologi Tanah: Membedah Kerapuhan Sistem Budidaya Monokultur.
3. Buku Pedoman Alih teknologi budidaya tanaman hutan untuk mendukung program perhutanan Soasial.

Buku ini tidak diperjualbelikan.

## DAFTAR RIWAYAT HIDUP

### A. DATA PRIBADI

Nama : Dr. Dra. Enny Widyati  
Tempat, Tanggal Lahir : Klaten, 6 Mei 1968  
Anak ke : 2 dari 2 bersaudara  
Jenis Kelamin : Perempuan  
Nama Ayah Kandung : Soekarno Mardi Wikarno  
Nama Ibu Kandung : Sudarmi  
Nama Istri/Suami : Drs. Budi Hermansyah  
Jumlah Anak : 2 (dua)  
Nama Anak : 1. Agam Noor Kharisma  
: 2. Bagus Pribadi  
Nama Unit : Pusat Riset Ekologi  
Nama Organisasi : Hayati dan Lingkungan  
Nama Instansi : Badan Riset dan Inovasi Nasional  
Judul Orasi : Optimasi Fungsi Komunitas Mikroba  
Tanah untuk Restorasi Lahan  
Terdegradasi dalam Mendukung *FOLU  
Net Sink 2030*  
Ilmu : Kehutanan  
Bidang : Restorasi Ekosistem  
Kepakaran : Biologi Tanah dan Kesuburan Lahan  
No. SK Pangkat : Keputusan Presiden Republik Indonesia  
Terakhir Nomor 20/K/2023 tanggal 18 september  
2023  
No. SK Peneliti atau : Keputusan Presiden Republik Indonesia  
Peneliti Ahli Utama Nomor 10/M/2022 tanggal 16 Maret  
2022

Tautan Scopus : <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=6504319430>

Tautan Google Scholar : <https://scholar.google.com/citations?hl=id&user=RaPai9sAAAAJ>

Tautan researchgate : <https://www.researchgate.net/profile/Enny-Widyati>

## B. Pendidikan Formal

No.	Jenjang	Nama Sekolah/ PT/Universitas	Tempat/Kota/ Negara	Tahun Lulus
1.	SD	Negeri Trotok	Klaten	1980
2.	SMP	Negeri Bayat	Klaten	1983
3.	SMA	Negeri 1 Klaten	Klaten	1986
4.	S1	UGM	Yogyakarta	1981
5.	S3	IPB (fast track)	Bogor	2006

## C. Pendidikan Nonformal

No.	Nama Pelatihan/ Pendidikan	Tempat/Kota/ Negara	Tahun
1.	Landscape Function and People	Katsersart/Thailand	2010
2.	Optimizing Performance of Producer Organization (Farmers)	Wageningen/ Netherlands	2012
3.	Pelatihan dan Sertifikasi Reviewer	BSD Banten/Indonesia	2014
4.	Trainning on Forestry Review	Salt Lake City/USA	2014
5.	Pelatihan dan Sertifikasi Reviewer (advance)	BSD Banten/Indonesia	2017

## D. JABATAN FUNGSIONAL

No.	Jenjang Jabatan	TMT Jabatan
1.	Peneliti Pertama	23 Juni 2003
2.	Peneliti Muda	27 November 2007
3.	Peneliti Madya	12 Mei 2010
4.	Peneliti Ahli Utama	24 Januari 2020

## E. KEIKUTSERTAAN DALAM KEGIATAN ILMIAH

No.	Nama Kegiatan	Peran/ Tugas	Penyelenggara (Kota, Negara)	Tahun
1.	Seminar Nasional Himpunan Ilmu Tanah Indonesia	Presenter	HITI, Yogyakarta	2007
2.	Seminar Air Asam Tambang	Presenter	Fak. Pertambangan ITB	2009
3.	International Seminar on Acid Rock Drainage	Presenter	Skelleftea, Swedia/ Int'l Mining Water association	2009
4.	Short Courses on Landscape Function and People	Peserta/ nara sumber	Katsersart/ RECOFTC-WUR	2010
5.	Int'l Seminar of Forestry	Presenter	Bogor/FORDA	2011
6.	Short courses on OPPO	Peserta	Wageningen/WUR	2012
7.	Int'l Seminar of Forestry	Presenter	Jakarta/FORDA	2013
8.	Int'l Conference of Forestry Researcher Organization	Presenter	Salt Lake City-Utah USA/IUFRO	2014

No.	Nama Kegiatan	Peran/ Tugas	Penyelenggara (Kota, Negara)	Tahun
9.	Int'l Seminar of Oilpalm	Presenter	Bogor/Gapski	2019
10.	Biannual Conference on Biodiversity	Presenter	Makassar (hybrid)/ Unhalu	2021

## **F. KETERLIBATAN DALAM PENGELOLAAN JURNAL ILMIAH**

No	Nama Jurnal	Penerbit	Peran/Tugas	Tahun
1.	Jurnal Selulosa	BBIS	Reviewer bioremediasi	2010–2015
2.	Tekno Hutan	Pusprohut	Reviewer	2012–2014
3.	Journal Pen Hutan Tanaman	Pusprohut	Reviewer	2012–2013
4.	Info Hutan	Puslitbang Hutan	Reviewer	2011–2013

## **G. CAPAIAN DALAM BIDANG IPTEK, RISET, DAN INOVASI**

### 1. Karya Tulis Ilmiah

#### a) Kualifikasi Karya

No.	Kualifikasi Karya	Jumlah
1.	Buku Nasional	5
2.	Bagian dari Buku Internasional	5
3.	Bagian dari Buku Nasional	2
4.	Jurnal Internasional	11

No.	Kualifikasi Karya	Jumlah
5.	Jurnal Nasional	30
6.	Prosiding Internasional	6
7.	Paten Nasional Terdaftar	1
8.	Hak Cipta	5

#### b) Kualifikasi Penulis

No.	Kualifikasi Penulis	Jumlah
1.	Penulis Tunggal	26
2.	Bersama Penulis Lainnya	31
	Total	57

#### c) Kualifikasi Bahasa

No.	Kualifikasi Bahasa	Jumlah
1.	Bahasa Indonesia	36
2.	Bahasa Inggris	21
	Total	57

#### d) Kekayaan Intelektual

No.	Kualifikasi Karya	Jumlah
1.	Paten Nasional Terdaftar	1
2.	Hak Cipta	5

## H. PEMBINAAN KADER ILMIAH

Pejabat Fungsional Peneliti atau Perekayasa

No.	Nama	Instansi	Peran/Tugas	Tahun
1.	Dani Setio Hadi	BPK Kupang	Koordinator RPPI	2015
2.	Mira Yulianti	Puslitbang Produktivitas Hutan	Penulisan proposal penelitian	2015
3.	Henky Siahaan	BPK Palembang	Koordinator RPPI	2015
4.	M. Siarudin	BPTA Ciamis	Pelaksanaan penelitian dan penulisan ilmiah	2016
5.	Cut Rizlani	BPK Aek Nauli	Pembinaan jabatan peneliti	2016
6.	Antun Puspanti	BPKSDA Samboja	Pembinaan jabatan peneliti	2017
7.	Retno Prayudya	BPK Makassar	Pembinaan jabatan peneliti	2017
8.	Rini Purwanti	BPK Makassar	Pembinaan Jabatan Peneliti	2017
9.	R. Maharani	BPDipterokarpa Samarinda	Pembinaan Jabatan Peneliti	2018
11	Nurul Wahyuni	BPHHBK Mataram	Pembinaan Jabatan Peneliti	2018
12	Sri Een Hartatik	PREE	Penulisan proposal	2023
13.	Triyani Dewi	PRHorti-ORPP	Penulisan Book Chapter	2024
14	Abban Putri Fiqa	PREE	Penulisan Book Chapter	2024
15.	Sri Een Hartatik	PREE	Penulisan KTI	2024
16.	Eni Maftu'ah	PRTP-ORPP	Penulisan proposal GRS	2024

Buku ini tidak diperjualbelikan.

No.	Nama	Instansi	Peran/Tugas	Tahun
17.	Sri Een Hartatik	PRE	Penulisan Laporan Hasil Penelitian	2025
18.	Mira Yulianti	PRE	Penulisan naskah KTI	2025
19.	Vivi Yuskianti	PRE	Penulisan naskah KTI	2025

### Mahasiswa

No.	Nama	Perguruan Tinggi/ Universitas	Peran/Tugas	Tahun
1.	Melia Kusfiyanti	IPB	Pembimbing Tugas Akhir	2005
2.	Misvanul Andri	IPB	Pembimbing Tugas Akhir	2005
3.	Neni Andriyetni	IPB	Pembimbing Tugas Akhir	2005
4.	M. Rahmat Maulana	IPB	Pembimbing Tugas Akhir	2005
5.	Bisuk R. Sormin	IPB	Pembimbing Tugas Akhir	2006
6.	M. Alfian	IPB	Pembimbing Tugas Akhir	2006
7.	Ria R. Rahayu	IPB	Pembimbing Tugas Akhir	2006
8.	Andri Suryadinata	IPB	Pembimbing Tugas Akhir	2008
9.	Ratnawati Lantifasari	IPB	Pembimbing Tugas Akhir	2008
10	Gina Priramadhani	IPB	Pembimbing Tugas Akhir	2008

No.	Nama	Perguruan Tinggi/ Universitas	Peran/Tugas	Tahun
11	Irma Devita	IPB	Pembimbing Tugas Akhir	2008
12	Annisa N. Ramadhani	IPB	Pembimbing Tugas Akhir	2009
13	Danu Witoko	IPB	Pembimbing Tugas Akhir	2011
14.	Nahrul Hayati	IPB	Pembimbing Tugas Akhir	2011
15.	Dini Novita	IPB	Pembimbing Tugas Akhir	2012
16.	Rina D. Rahmawati	IPB	Pembimbing Tugas Akhir	2014
17	Yan Riska V. Sembiring	IPB	Pembimbing Tugas Akhir	2011
18.	Daniel R. Simatupang	Universitas Pakuan	Pembimbing Tugas Akhir	2020
19.	Rendy Daniel Baras	Universitas Brawijaya	Pembimbing Tugas Akhir	2025
20.	Raden Muh. Nabil AR	Universitas Brawijaya	Pembimbing Tugas Akhir	2025
21.	Dwi Rangga S	Universitas Brawijaya	Pembimbing Tugas Akhir	2025

## I. ORGANISASI PROFESI ILMIAH

No.	Jabatan	Nama Organisasi	Tahun
1.	Anggota	Perhimpunan Mikrobiologi Indonesia (PERMI)	2002–2008
2.	Anggota	Himpunan Ilmu Tanah Indonesia (HITI)	2002–2016

No.	Jabatan	Nama Organisasi	Tahun
3.	Anggota	Masyarakat Konservasi Tanah Indonesia (MKTI)	2004–2012
4.	Anggota	Perhimpunan Ahli tambang Indonesia (Perhapi)	2007–2014
5.	Anggota	Masyarakat Agroforestri Indonesia (MAFI)	2011–2019
6.	Anggota	Persatuan Periset Indonesia (PPI)	2018– sekarang

## J. TANDA PENGHARGAAN

No.	Nama Penghargaan	Pemberi Penghargaan	Tahun
1.	ITTO Fellowship Program	ITTO	2003
2.	Satya Lencana X	Presiden RI	2009
3.	Landscape Function and People Fellowship	NUFFIC	2010
4.	Optimizing Performance Producer Organization (OPPO) Fellowship	NUFFIC	2012
5.	IUFRO Fellowship	SPDC USA	2014
6.	Satya Lencana XX	Presiden RI	2020

Orasi ini membahas tantangan rehabilitasi dan restorasi lahan terdegradasi di Indonesia yang hingga kini belum mencapai hasil optimal, meskipun berbagai program telah dijalankan. Akar persoalan diidentifikasi bukan semata pada teknik penanaman atau pemilihan jenis, melainkan pada keruntuhan fungsi biologis tanah akibat degradasi komunitas mikroba kunci. Melalui sintesis penelitian lebih dari dua dekade, orasi ini menegaskan bahwa mikrobiom tanah merupakan fondasi adaptasi tanaman, pemulihan kesuburan tanah, dan keberlanjutan ekosistem.

Orasi ini memperkenalkan kerangka Microbial Ecosystem Engineering (REKKOSMIK) sebagai pendekatan ilmiah untuk merekayasa, memulihkan, dan mengoptimalkan fungsi mikrobiom tanah dalam mendukung keberhasilan restorasi lahan terdegradasi dan pencapaian *FOLU Net Sink 2030*. Konsep ini dibangun atas empat pilar kontribusi ilmiah: teori relasi fungsional tumbuhan–mikrobiom (holobiont), konsep “Keruntuhan fungsi mikrotanah” dan keruntuhan rhizosfer, inovasi bioremediasi air asam tambang berbasis bakteri pereduksi sulfat, serta model restorasi produktif Fuel-Food-Feed (3F) berbasis mikroba dan bioekonomi komunitas.

Melalui integrasi teori ekologi, inovasi bioteknologi lingkungan, dan model aplikasi di tingkat lanskap, orasi ini menunjukkan bahwa restorasi berbasis mikrobiom tidak hanya memulihkan fungsi ekologis tanah, tetapi juga meningkatkan produktivitas lahan, ketahanan sosial-ekonomi masyarakat, dan serapan karbon. Dengan demikian, REKKOSMIK diposisikan sebagai pendekatan nature-based solution yang ilmiah, aplikatif, dan strategis untuk mendukung agenda pemulihan ekosistem, pembangunan berkelanjutan, dan mitigasi perubahan iklim di Indonesia.

BRIN Publishing  
*The Legacy of Knowledge*

Diterbitkan oleh:  
**Penerbit BRIN**, anggota Ikapi  
Gedung B.J. Habibie Lt. 8,  
Jln. M.H. Thamrin No. 8,  
Kota Jakarta Pusat 10340  
E-mail: [penerbit@brin.go.id](mailto:penerbit@brin.go.id)  
Website: [penerbit.brin.go.id](http://penerbit.brin.go.id)

DOI: 10.55981/brin.3290



Buku ini tidak diperjualbelikan.