



REMEDIASI LAHAN PASCA PENAMBANGAN NIKEL BERBASIS TANAMAN ENDEMIK



Naima Haruna
Tatik Wardiyati
Eko Handayanto
Moch. Dawam Maghfoer

**REMEDIASI LAHAN PASCA
PENAMBANGAN NIKEL
BERBASIS TANAMAN
ENDEMIK**

REMEDIASI LAHAN PASCA PENAMBANGAN NIKEL BERBASIS TANAMAN ENDEMIK

Naima Haruna
Tatik Wardiyati
Eko Handayanto
Moch. Dawam Maghfoer



REMEDIASI LAHAN PASCA PENAMBANGAN NIKEL BERBASIS TANAMAN ENDEMIK

Penulis:
Naima Haruna
Tatik Wardiyati
Eko Handayanto
Moch. Dawam Maghfoer

Editor:
Suardi

Layouter :
Tim Kreatif PRCI

Cover:
Rusli

Cetakan Pertama : September 2025

Hak Cipta 2025, pada Penulis. Diterbitkan pertama kali oleh:

Perkumpulan Rumah Cemerlang Indonesia
ANGGOTA IKAPI JAWA BARAT
Pondok Karisma Residence Jalan Raflesia VI D.151
Panglayungan, Cipedes Tasikmalaya – 085223186009

Website : www.rcipress.rcipublisher.org
E-mail : rumahcemerlangindonesia@gmail.com

Copyright © 2024 by Perkumpulan Rumah Cemerlang Indonesia
All Right Reserved

- Cet. I – : Perkumpulan Rumah Cemerlang Indonesia, 2025
; 14,8 x 21 cm
ISBN

Hak cipta dilindungi undang-undang
Dilarang memperbanyak buku ini dalam bentuk dan dengan
cara apapun tanpa izin tertulis dari penulis dan penerbit

Undang-undang No.19 Tahun 2002 Tentang
Hak Cipta Pasal 72

Undang-undang No.19 Tahun 2002 Tentang Hak Cipta
Pasal 72

Barang siapa dengan sengaja melanggar dan tanpa hak melakukan perbuatan sebagaimana dimaksud dalam pasal ayat (1) atau pasal 49 ayat (1) dan ayat (2) dipidana dengan pidana penjara masing-masing paling sedikit 1 (satu) bulan dan/atau denda paling sedikit Rp.1.000.000,00 (satu juta rupiah), atau pidana penjara paling lama 7 (tujuh) tahun dan/atau denda paling banyak Rp.5.000.000.000,00 (lima miliar rupiah).

Barang siapa dengan sengaja menyiarkan, memamerkan, mengedarkan, atau menjual kepada umum suatu ciptaan atau barang hasil pelanggaran hak cipta terkait sebagai dimaksud pada ayat (1) dipidana dengan pidana penjara paling lama 5 (lima) tahun dan/atau denda paling banyak Rp.500.000.000,00 (lima ratus juta rupiah)

KATA PENGANTAR

Puji syukur kami panjatkan ke hadirat Tuhan Yang Maha Esa atas limpahan rahmat dan karunia-Nya, sehingga buku berjudul "*Remediasi Lahan Pasca Penambangan Nikel Berbasis Tanaman Endemik*" ini dapat diselesaikan dengan baik. Buku ini disusun sebagai kontribusi ilmiah untuk memberikan wawasan, pengetahuan, dan panduan praktis mengenai strategi pemulihan lahan yang terdegradasi akibat aktivitas penambangan nikel.

Lahan bekas tambang nikel umumnya masih menyimpan kadar logam berat Ni yang cukup tinggi, bahkan jauh di atas ambang batas normal tanah menurut WHO (1000 ppm). Pada beberapa lokasi, konsentrasi Ni dapat mencapai lebih dari 5000 ppm. Kondisi ini tentu menjadi kendala serius dalam pemanfaatan lahan, terutama jika diarahkan untuk budidaya tanaman pangan. Risiko kesehatan dapat muncul karena tanaman yang tumbuh pada lahan tercemar berpotensi menyerap logam berat dan menyimpannya pada bagian yang dikonsumsi manusia. Selain itu, tingginya kadar Ni juga menghambat pertumbuhan tanaman. Dalam jumlah kecil, Ni tidak diperlukan oleh tanaman, dan bila kadarnya berlebih dapat menyebabkan gejala keracunan, pertumbuhan kerdil, hingga kematian tanaman.

Oleh karena itu, sebelum lahan pasca tambang dimanfaatkan kembali, langkah remediasi sangat penting dilakukan. Salah satu metode yang banyak digunakan

adalah **fitoremediasi**, yaitu teknik penurunan kadar logam berat dengan memanfaatkan kemampuan tanaman tertentu. Melalui mekanisme **fitoekstraksi**, tanaman mampu menyerap logam Ni dari tanah dan memindahkannya ke bagian tajuk, sehingga kandungan logam di tanah berangsur menurun.

Di antara tanaman yang berpotensi digunakan, **Belimbing bajo**, sebagai salah satu tanaman endemik, dinilai memiliki kemampuan menyerap Ni dalam jumlah cukup tinggi. Dengan memanfaatkan tanaman ini, lahan bekas tambang dapat diremediasi secara alami sehingga kandungan logam beratnya menurun dan pemanfaatannya di masa depan menjadi lebih aman, khususnya untuk pengembangan pertanian berkelanjutan.

Lebih luas lagi, pencemaran logam berat pada tanah tidak hanya disebabkan oleh Ni, tetapi juga logam lain yang dapat menghambat pertumbuhan tanaman dan membahayakan kesehatan manusia. Karena itu, upaya rehabilitasi lahan bekas tambang menjadi langkah krusial dalam mendukung keberlanjutan ekosistem dan pemanfaatan lahan. Di Sorowako, misalnya, rehabilitasi lahan bekas tambang Ni telah dilakukan dengan baik melalui pengembalian fungsi lahan sebagai hutan lindung. Pengelolaan limbah tambang oleh PT Vale juga mendapat pengakuan internasional karena dinilai mampu menjaga lingkungan sekaligus mengoptimalkan kembali fungsi lahan pasca tambang.

Buku ini mengupas secara mendalam pendekatan fitoremediasi terpadu, yang memanfaatkan kombinasi tanaman Belimbing Bajo, penambahan asam sitrat, dan

pupuk NPK. Pendekatan ini tidak hanya menawarkan efektivitas dalam mengurangi kontaminasi logam berat, tetapi juga mempercepat proses pemulihan tanah untuk mendukung keberlanjutan ekosistem. Belimbing Bajo, sebagai tanaman lokal yang adaptif, telah terbukti memiliki kemampuan fitoremediasi yang baik, sementara asam sitrat dan pupuk NPK digunakan untuk meningkatkan efisiensi serapan logam berat serta mendukung pertumbuhan tanaman.

Penyusunan buku ini didasarkan pada hasil kajian yang mendalam serta kajian literatur yang komprehensif. Dengan menggabungkan data ilmiah, pengalaman praktis, dan analisis kritis, kami berusaha menyajikan informasi yang tidak hanya relevan bagi para peneliti, tetapi juga bermanfaat bagi praktisi di bidang lingkungan, perusahaan tambang, dan pembuat kebijakan. Selain itu, kami berharap buku ini dapat menjadi referensi penting dalam pengembangan teknologi berbasis ekologi untuk pemulihan lahan tambang di Indonesia.

Buku ini terdiri dari beberapa bab yang disusun secara sistematis untuk memberikan gambaran utuh mengenai masalah, solusi, hingga potensi keberlanjutan. Bab pertama menyajikan latar belakang dan pentingnya pemulihan lahan tambang nikel di Indonesia. Bab-bab selanjutnya membahas tentang karakteristik tanah pasca-penambangan, mekanisme fitoremediasi, peran tanaman Belimbing Bajo, hingga aplikasi teknologi asam sitrat dan pupuk NPK. Pada bagian akhir, kami juga menyertakan pembahasan mengenai implikasi hasil kajian terhadap kebijakan lingkungan dan strategi keberlanjutan.

Kami menyadari bahwa penyusunan buku ini tidak lepas dari keterbatasan, masukan dan kritik yang konstruktif dari pembaca sangat kami harapkan untuk penyempurnaan di masa mendatang. Kami juga ingin mengucapkan terima kasih kepada semua pihak yang telah memberikan dukungan, baik dalam bentuk ilmu, data, maupun dorongan moral, sehingga buku ini dapat terwujud.

Akhir kata, semoga buku ini dapat memberikan manfaat yang luas dan menjadi salah satu langkah kecil dalam upaya menjaga kelestarian lingkungan di tengah tantangan global yang semakin kompleks. Mari bersama-sama membangun kesadaran akan pentingnya pengelolaan lingkungan yang bertanggung jawab demi keberlanjutan bumi yang kita cintai.

Palopo, Agustus 2025 Penyusun

DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR	I
DAFTAR ISI	V
BAB 1 DASAR-DASAR PEMULIHAN LAHAN DEGRADASI TAMBANG NIKEL	1
1.1 Pengantar	1
1.2 Pencemaran Tanah oleh Logam Berat di Lahan Bekas Tambang Nikel	5
1.3 Urgensi Pemulihan Lahan Pasca Penambangan	8
BAB 2 KARAKTERISTIK LAHAN PASCA PENAMBANGAN NIKEL	16
2.1 Penambangan Nikel	16
2.2 Kondisi Fisik dan Kimia Tanah Pasca Penambangan	20
2.3 Tantangan dalam Pemulihan Lahan Degradasi	22
2.4 Teknologi dan Metode Pemulihan yang Tersedia	25
BAB 3 FITOREMEDIASI SEBAGAI PENDEKATAN BERBASIS EKOLOGI	27
3.1 Konsep dan Prinsip Fitoremediasi	27
3.2 Keunggulan dan Keterbatasan Fitoremediasi	32
3.3 Pemilihan Tumbuhan untuk Fitoremediasi Lahan Tambang	33
3.4 Peran Aditif dalam Mendukung Efektivitas Fitoremediasi	38
BAB 4 BELIMBING BAJU SEBAGAI AGEN FITOREMEDIASI	42
4.1 Karakteristik Botani Belimbing Baji	42
4.2 Kemampuan Belimbing Baji dalam Menyerap Logam Berat	46
4.3 Studi Kasus: Aplikasi Belimbing Baji di Lahan Tambang Nikel	49
4.4 Manajemen Tanaman Belimbing Baji pada Lahan Degradasi	52

BAB 5 OPTIMALISASI FITOREMEDIASI DENGAN ASAM SITRAT DAN PUPUK NPK	56
5.1 Peran Asam Sitrat dalam Fitoremediasi Logam Berat	56
5.2 Pemanfaatan Pupuk NPK untuk Meningkatkan Produktivitas Tanaman	59
BAB 6 PEMULIHAN LAHAN TAMBANG NIKEL DENGAN BELIMBING BAJO, ASAM SITRAT, DAN PUPUK NPK	65
6.1 Konsentrasi Ni Total Tanah	65
6.2 Konsentrasi Ni Tersedia pada Tanah	67
6.3 Serapan Ni Tanaman	75
6.4 Biokonsentrasi Faktor	83
6.5 Translokasi Faktor	84
BAB 7 IMPLIKASI DAN STRATEGI KEBERLANJUTAN	94
7.1 Hasil dan Evaluasi Efektivitas Fitoremediasi Terpadu	94
7.2 Pemulihan Lahan sebagai Bagian dari Pemanfaatan Berkelanjutan	97
7.3 Implikasi Hasil kegiatan Fitoremediasi hadap Kebijakan Lingkungan	99
7.4 Prospek Aplikasi Fitoremediasi di Berbagai Lokasi Tambang	101
DAFTAR PUSTAKA	107

Bab 1

Dasar-Dasar Pemulihan Lahan Degradasi Tambang Nikel

1.1 Pengantar

Kegiatan penambangan nikel memberikan kontribusi yang sangat signifikan terhadap perekonomian global, terutama dalam mendukung kebutuhan bahan baku industri logam modern. Nikel merupakan salah satu elemen strategis yang memainkan peran penting dalam berbagai sektor, termasuk industri pembuatan baja tahan karat (*stainless steel*), yang banyak digunakan dalam infrastruktur, konstruksi, dan peralatan rumah tangga. Selain itu, nikel menjadi komponen utama dalam baterai lithium-ion yang digunakan pada kendaraan listrik, yang merupakan pilar utama transisi energi bersih di dunia. Dengan semakin meningkatnya permintaan global terhadap kendaraan listrik, eksploitasi sumber daya nikel terus mengalami peningkatan untuk memenuhi kebutuhan ini.

Remediasi dengan menggunakan tanaman yang disebut fitoremediasi dimaksudkan untuk menurunkan kadar logam Nikel pada lahan bekas penambangan yang masih cukup tinggi melewati ambang batas tanah normal (WHO lebih dari 1000 ppm). Kadar logam Ni pada lahan bekas tambang lebih dari 5000 ppm sehingga membatasi pemanfaatannya untuk budidaya tanaman khususnya tanaman pangan. Fitoremediasi dengan menggunakan Belimbing bajo sebagai tanaman endemik dimaksudkan

untuk mengurangi kadar Ni dalam lahan bekas tambang melalui proses fitoekstraksi yaitu memisahkan zat kontaminan (logam Ni) ke tajuk tanaman sehingga kadar Ni dalam tanah menurun. Lahan bekas tambang nikel umumnya mengalami degradasi yang parah, baik secara fisik kimia, maupun biologis. Degradasi fisik lahan terjadi karena penggalian tanah dalam jumlah besar yang menghilangkan struktur alami tanah, menyebabkan erosi, dan mengurangi kemampuan tanah dalam menyerap air. Secara kimia, kandungan logam berat seperti nikel dan kobalt di tanah meningkat tajam, menciptakan kondisi yang toksik bagi tanaman dan organisme tanah. Sementara itu, secara biologis, hilangnya lapisan organik tanah mengakibatkan penurunan populasi mikroorganisme yang berperan penting dalam siklus nutrisi (Sittadewi, 2016).

Dampak degradasi ini tidak hanya merusak ekosistem lokal tetapi juga memiliki konsekuensi sosial dan ekonomi yang luas. Di banyak daerah, lahan bekas tambang menjadi tidak produktif dan sulit dikembalikan fungsinya untuk kegiatan seperti pertanian, kehutanan, atau pembangunan infrastruktur. Hal ini menciptakan beban sosial, terutama bagi masyarakat yang bergantung pada lahan tersebut untuk mata pencaharian mereka. Kehancuran ekosistem juga mengancam keanekaragaman hayati, karena habitat alami bagi flora dan fauna terganggu secara signifikan. Di sisi lain, lahan yang rusak cenderung menjadi sumber polusi, dengan kandungan logam berat yang dapat mencemari air tanah, aliran sungai, dan badan air lainnya di sekitar area tambang, mengancam kesehatan masyarakat dan makhluk hidup lainnya.

Indonesia, sebagai negara dengan cadangan nikel terbesar di dunia, menghadapi tantangan besar dalam mengelola dampak lingkungan dari aktivitas penambangan ini (Tsirwiyati, 2023). Meskipun pengelolaan tambang yang lebih ramah lingkungan telah mulai diterapkan, sebagian besar lahan bekas tambang di Indonesia masih belum pulih dan terus menimbulkan masalah. Kebijakan dan regulasi yang ada sering kali belum diimplementasikan secara optimal, dan keterbatasan teknologi lokal menjadi kendala dalam mempercepat proses pemulihan lahan. Akibatnya, negara ini menghadapi dilema antara mengejar pertumbuhan ekonomi dari sektor tambang dan memastikan keberlanjutan ekosistemnya.

Salah satu pendekatan yang semakin mendapatkan perhatian adalah fitoremediasi, yaitu pemanfaatan tanaman tertentu untuk memulihkan tanah yang terkontaminasi. Metode ini dianggap sebagai solusi yang lebih ramah lingkungan dibandingkan dengan teknik pemulihan konvensional, seperti penggalian ulang atau pencucian tanah secara kimiawi, yang seringkali membutuhkan biaya besar dan berisiko merusak ekosistem lebih lanjut. Fitoremediasi memanfaatkan kemampuan tanaman tertentu untuk menyerap, menstabilkan, atau menguraikan polutan dalam tanah, termasuk logam berat. Di Indonesia, tanaman seperti Belimbing Bajo mulai dikaji potensinya untuk fitoremediasi, mengingat kemampuannya yang alami dalam menyerap logam berat, termasuk nikel.

Belimbing Bajo, atau yang dikenal dengan nama ilmiah *Sarcotheca celebica Veldk*, adalah tanaman yang umumnya ditemukan di daerah tropis dan memiliki adaptasi

tinggi terhadap kondisi lingkungan yang ekstrem. Tanaman ini tidak hanya mampu tumbuh di tanah yang miskin nutrisi, tetapi juga memiliki kemampuan fitoremediasi, yaitu menyerap logam berat dalam tanah. Selain itu, Belimbing Bajo memiliki siklus hidup yang cepat, membuatnya ideal untuk digunakan dalam proyek remediasi yang memerlukan waktu penyelesaian yang relatif singkat (Haruna et al., 2018).

Untuk meningkatkan efektivitas fitoremediasi, berbagai inovasi telah diperkenalkan, seperti penambahan asam sitrat dan pupuk NPK (Nitrogen, Fosfor, Kalium). Asam sitrat berfungsi sebagai agen pengkelat alami yang mampu meningkatkan ketersediaan logam berat dalam tanah, sehingga lebih mudah diserap oleh tanaman. Pupuk NPK menyediakan nutrisi esensial bagi tanaman, mempercepat pertumbuhan, dan meningkatkan kemampuan tanaman untuk melakukan fitoremediasi secara optimal. Sinergi antara Belimbing Bajo, asam sitrat, dan pupuk NPK menciptakan pendekatan yang terpadu untuk memulihkan lahan tambang nikel yang terdegradasi.

Pendekatan ini tidak hanya menawarkan solusi praktis untuk mengatasi degradasi lahan, tetapi juga membuka peluang untuk mengembangkan teknologi lokal yang berkelanjutan. Metode fitoremediasi terpadu ini berpotensi menjadi model pemulihan lahan yang dapat diadopsi secara luas, terutama di wilayah dengan kondisi serupa. Lebih dari itu, metode ini dapat mendukung upaya global dalam menghadapi tantangan perubahan iklim dan degradasi lingkungan dengan cara yang berfokus pada keberlanjutan dan pelestarian sumber daya alam. Pemulihan

lahan pasca tambang nikel bukan hanya tentang mengembalikan kesuburan tanah, tetapi juga memastikan keberlanjutan ekosistem dan mendukung kehidupan masyarakat sekitar. Dengan mengadopsi pendekatan inovatif seperti fitoremediasi terpadu, diharapkan lahan yang terdegradasi akibat tercemar logam berat nikel dapat dipulihkan menjadi lahan yang produktif dan bermanfaat. Tantangan besar ini memerlukan komitmen bersama dari semua pihak, baik dari kalangan akademisi, pemerintah, maupun masyarakat, untuk menciptakan solusi yang tidak hanya efektif, tetapi juga berkelanjutan untuk masa depan.

1.2 Pencemaran Tanah oleh Logam Berat di Lahan Bekas Tambang Nikel

Aktivitas penambangan nikel, terutama dengan metode terbuka (*open-pit mining*), memberikan tekanan besar terhadap kualitas tanah di wilayah sekitarnya. Proses penggalan yang masif menyebabkan hilangnya lapisan tanah subur dan merubah struktur alami tanah. Selain perubahan fisik, persoalan yang lebih serius adalah meningkatnya kadar logam berat, seperti nikel (Ni), kobalt (Co), dan kromium (Cr), yang terakumulasi dalam tanah bekas tambang. Logam berat ini bersifat toksik, tidak mudah terurai, dan dalam banyak kasus melebihi ambang batas aman yang ditetapkan bagi kesehatan lingkungan dan pertumbuhan tanaman (Jolo & Gautama, 2018).

Tanah yang tercemar logam berat menghadapi permasalahan serius dalam hal kesuburan. Konsentrasi nikel yang tinggi, misalnya, dapat menghambat penyerapan unsur hara esensial oleh akar tanaman. Ion Ni dalam kadar

berlebih bersifat antagonis terhadap unsur penting seperti Fe, Mg, dan Zn, yang berperan vital dalam fotosintesis dan metabolisme tanaman. Akibatnya, tanaman yang ditanam di lahan bekas tambang sering menunjukkan gejala klorosis, pertumbuhan terhambat, dan penurunan produktivitas. Kondisi ini diperparah dengan keberadaan logam berat lain seperti Cr dan Co yang bersifat toksik terhadap jaringan akar, sehingga mengganggu perkembangan sistem perakaran dan memperlemah daya serap air serta nutrisi.

Selain menurunkan ketersediaan hara, keberadaan logam berat di dalam tanah juga mengganggu komunitas mikroorganisme tanah. Mikroba tanah, seperti bakteri pelarut fosfat dan mikoriza, berperan penting dalam mendukung pertumbuhan tanaman. Namun, paparan logam berat pada konsentrasi tinggi dapat merusak keseimbangan populasi mikroorganisme tersebut. Hilangnya aktivitas biologis tanah akan semakin menurunkan kualitas tanah, menjadikannya lahan kritis yang sulit mendukung keberlangsungan vegetasi baru. Akibatnya, proses rehabilitasi lahan pascatambang menjadi terhambat, karena kondisi edafik tidak mendukung pertumbuhan spesies tanaman pionir sekalipun.

Dampak lanjutan dari pencemaran tanah oleh logam berat adalah terjadinya bioakumulasi. Tanaman yang masih mampu tumbuh di tanah terkontaminasi cenderung menyerap logam berat ke dalam jaringan mereka. Hal ini tidak hanya menurunkan kualitas dan keamanan produk tanaman, tetapi juga membahayakan rantai makanan ketika tanaman tersebut dikonsumsi manusia atau hewan. Bioakumulasi Ni dan logam berat lain dalam jaringan

tanaman dapat menimbulkan risiko kesehatan, seperti gangguan fungsi hati, ginjal, hingga kerusakan sistem saraf pada organisme yang mengonsumsinya (Ariwati et al., 2023).

Bagi pengembangan pertanian, pencemaran tanah akibat logam berat menjadi kendala serius. Lahan bekas tambang yang mengalami degradasi kimia memerlukan upaya restorasi jangka panjang sebelum bisa dimanfaatkan kembali. Salah satu pendekatan yang dapat diterapkan adalah **fitoremediasi**, yaitu penggunaan tanaman hiperakumulator yang mampu menyerap logam berat dari tanah, misalnya spesies *Alyssum murale* atau *Pteris vittata*. Tanaman ini dapat menurunkan konsentrasi logam berat secara bertahap, meskipun membutuhkan waktu lama dan pengelolaan yang konsisten (Sitorus et al., 2021). Selain itu, penggunaan bahan organik, biochar, atau pupuk hayati juga dapat membantu menurunkan ketersediaan logam berat dalam tanah dengan cara mengikat ion logam sehingga tidak mudah diserap tanaman.

Secara keseluruhan, pencemaran tanah oleh logam berat di lahan bekas tambang nikel bukan hanya merusak kesuburan tanah, tetapi juga menghambat pengembangan pertanian yang berkelanjutan. Tingginya kandungan Ni, Cr, dan Co menyebabkan gangguan fisiologis pada tanaman, mengurangi aktivitas mikroba tanah, serta menimbulkan risiko bioakumulasi dalam rantai makanan. Tanpa adanya intervensi melalui teknologi rehabilitasi berbasis ekologi, lahan bekas tambang akan tetap menjadi lahan kritis yang sulit dimanfaatkan. Oleh karena itu, strategi pengelolaan lingkungan yang komprehensif, meliputi fitoremediasi,

amandemen tanah, dan pemilihan tanaman toleran, mutlak diperlukan untuk mengembalikan fungsi ekologis dan produktivitas tanah pada wilayah bekas tambang nikel.

1.3 Urgensi Pemulihan Lahan Pasca Penambangan

Pemulihan lahan pasca penambangan merupakan langkah krusial dalam mengurangi dampak negatif yang ditimbulkan oleh aktivitas pertambangan terhadap lingkungan dan masyarakat. Aktivitas penambangan, khususnya tambang nikel, sering kali meninggalkan lahan yang terdegradasi, dengan tanah yang kehilangan kesuburan, tercemar logam berat, dan mengalami kerusakan fisik. Kerusakan ini tidak hanya mengancam ekosistem lokal, tetapi juga mempengaruhi keberlanjutan hidup masyarakat di sekitarnya. Diperlukan upaya restorasi yang mengintegrasikan pendekatan ilmiah, teknologi modern, serta partisipasi aktif masyarakat dalam proses pemulihan lahan yang berkelanjutan.

Salah satu pendekatan yang menjanjikan untuk mengatasi degradasi lahan akibat penambangan adalah fitoremediasi. Fitoremediasi merupakan teknik pemulihan lingkungan yang memanfaatkan kemampuan tanaman untuk menyerap, mengakumulasi, atau mendetoksifikasi polutan, termasuk logam berat, dari tanah dan air (Marzuki et al., 2022; Paulina & Faradika, 2024). Teknologi ini tidak hanya ramah lingkungan tetapi juga ekonomis jika dibandingkan dengan metode remediasi fisik atau kimia. Prinsip kerja fitoremediasi melibatkan interaksi kompleks antara tanaman, mikroorganisme tanah, dan polutan, yang memungkinkan detoksifikasi atau pengangkutan

kontaminan secara alami. Teknik ini juga dapat meningkatkan kualitas tanah secara bertahap, menjadikannya lebih layak untuk digunakan kembali.

Salah satu tanaman yang telah terbukti potensial adalah Belimbing Bajo (*Sarcotheca celebica Veldk*). Tanaman ini, yang dikenal secara tradisional sebagai sumber buah asam untuk keperluan kuliner, ternyata memiliki kemampuan luar biasa dalam menyerap logam berat dari tanah melalui akarnya. Kajian menunjukkan bahwa Belimbing Bajo mampu mengakumulasi logam berat seperti nikel di jaringan tanamannya, sehingga mengurangi konsentrasi polutan dalam tanah secara signifikan. Selain itu, tanaman ini mudah tumbuh di berbagai kondisi lingkungan, memiliki adaptasi yang baik terhadap tanah yang tercemar, dan memerlukan perawatan yang relatif sederhana, menjadikannya kandidat ideal untuk aplikasi fitoremediasi di lahan tambang.

Namun, efektivitas fitoremediasi sering kali bergantung pada dukungan tambahan berupa penggunaan aditif atau agen pendukung lainnya. Dalam hal ini, penambahan asam sitrat dan pupuk NPK telah terbukti mampu meningkatkan keberhasilan proses fitoremediasi. Asam sitrat, sebagai senyawa organik alami, berfungsi sebagai agen pemobilisasi logam berat dalam tanah. Mekanismenya adalah dengan membentuk kompleks kelat (chelate) dengan ion logam, sehingga meningkatkan ketersediaan logam berat bagi tanaman. Dengan cara ini, Belimbing Bajo dapat menyerap logam berat dalam jumlah yang lebih besar, mempercepat proses remediasi, dan mengurangi tingkat kontaminasi tanah.

Sementara itu, pupuk NPK (Nitrogen, Fosfor, Kalium) berperan dalam mendukung pertumbuhan tanaman secara keseluruhan. Kandungan nitrogen membantu meningkatkan pembentukan jaringan hijau pada tanaman, fosfor mendukung pertumbuhan akar yang kuat, dan kalium meningkatkan ketahanan tanaman terhadap kondisi lingkungan yang kurang ideal. Dengan kombinasi asam sitrat dan pupuk NPK, Belimbing Bajo tidak hanya mampu bertahan di tanah yang terkontaminasi logam berat, tetapi juga menunjukkan performa yang optimal dalam menyerap polutan (Jiaying et al., 2022).

Pemulihan lahan tambang nikel melalui fitoremediasi terpadu tidak hanya memberikan dampak positif terhadap lingkungan, tetapi juga manfaat sosial dan ekonomi yang signifikan. Lahan yang berhasil direhabilitasi dapat dimanfaatkan kembali untuk berbagai kegiatan produktif, seperti pertanian, kehutanan, atau ekowisata. Pemanfaatan kembali lahan ini dapat meningkatkan pendapatan masyarakat lokal, menciptakan lapangan kerja, dan memperbaiki kualitas hidup secara umum. Misalnya, setelah proses remediasi selesai, tanah dapat ditanami tanaman pangan atau komoditas bernilai ekonomi tinggi, yang pada akhirnya memberikan kontribusi terhadap ketahanan pangan lokal dan regional.

Selain manfaat ekonomi, keberhasilan program pemulihan lahan juga mencerminkan tanggung jawab sosial perusahaan tambang terhadap lingkungan dan masyarakat. Dalam era di mana keberlanjutan menjadi perhatian utama, perusahaan yang proaktif dalam memulihkan lahan pasca penambangan akan mendapatkan apresiasi lebih dari

masyarakat dan pemerintah. Hal ini tidak hanya meningkatkan citra perusahaan di mata publik tetapi juga membuka peluang untuk mendapatkan insentif dari regulator lingkungan dan lembaga donor internasional.

Partisipasi masyarakat dalam proses pemulihan lahan juga menjadi faktor penting dalam keberhasilan jangka panjang. Masyarakat lokal dapat dilibatkan dalam berbagai tahap pemulihan, mulai dari penanaman hingga pemeliharaan tanaman. Selain memberikan kesempatan kerja, keterlibatan ini juga membantu meningkatkan kesadaran masyarakat akan pentingnya menjaga lingkungan. Dengan adanya transfer pengetahuan dan keterampilan, masyarakat setempat dapat melanjutkan upaya rehabilitasi lahan secara mandiri di masa depan.

Namun, tantangan tetap ada dalam implementasi fitoremediasi di lapangan. Proses ini membutuhkan waktu yang relatif lama dibandingkan metode remediasi kimia atau fisik, sehingga memerlukan komitmen jangka panjang dari berbagai pihak. Selain itu, efektivitas fitoremediasi dapat dipengaruhi oleh berbagai faktor, seperti jenis polutan, tingkat kontaminasi, dan kondisi tanah. Kajian lebih lanjut diperlukan untuk mengoptimalkan pendekatan ini, termasuk mengeksplorasi kombinasi tanaman lain yang memiliki sifat serupa dengan Belimbing Bajo.

Secara keseluruhan, pemulihan lahan pasca penambangan melalui fitoremediasi terpadu merupakan pendekatan yang tidak hanya berkelanjutan tetapi juga memberikan nilai tambah bagi lingkungan, masyarakat, dan perusahaan. Dengan memanfaatkan potensi tanaman seperti Belimbing Bajo, serta dukungan aditif seperti asam sitrat

dan pupuk NPK, upaya rehabilitasi lahan tambang nikel dapat dilakukan secara efektif dan efisien. Langkah ini tidak hanya memperbaiki kerusakan lingkungan tetapi juga membuka jalan menuju pembangunan yang lebih inklusif dan berkelanjutan.

Buku ini bertujuan memberikan wawasan yang komprehensif dan mendalam mengenai strategi pemulihan lahan pasca penambangan nikel melalui pendekatan fitoremediasi terpadu. Metode ini memanfaatkan Belimbing Bajo (*Sarcotheca celebica Veldk*) sebagai agen fitoremediasi utama, dikombinasikan dengan penggunaan asam sitrat sebagai agen chelating dan pupuk NPK untuk mendukung pertumbuhan tanaman. Dengan pendekatan ini, diharapkan lahan yang terdegradasi akibat aktivitas penambangan nikel dapat dipulihkan secara efisien, efektif, dan berkelanjutan, baik dari segi ekologi maupun sosial-ekonomi. Buku ini dirancang untuk menjadi panduan praktis bagi praktisi lingkungan, peneliti, dan perusahaan tambang dalam mengatasi permasalahan lingkungan akibat kegiatan eksploitasi tambang.

Karakteristik lahan pasca penambangan nikel menjadi topik pembahasan pertama dalam buku ini, karena memahami kondisi fisik dan kimia tanah yang terdegradasi adalah langkah awal yang penting dalam merancang strategi remediasi yang tepat. Lahan bekas tambang nikel umumnya mengalami penurunan kualitas tanah secara signifikan, termasuk kerusakan struktur tanah, hilangnya unsur hara, dan meningkatnya konsentrasi logam berat seperti nikel (Ni), kobalt (Co), dan kromium (Cr). Selain itu, aktivitas penambangan sering meninggalkan tanah

dengan pH yang rendah, kadar bahan organik yang minim, dan tingkat erosi yang tinggi, sehingga mempersulit proses pemulihan alami. Tantangan utama dalam pemulihan lahan ini adalah menciptakan kondisi yang memungkinkan vegetasi dapat tumbuh kembali dan memulai proses pemulihan ekologis secara alami.

Fitoremediasi menawarkan solusi berbasis ekologi yang efektif. Fitoremediasi merupakan metode pemulihan lingkungan dengan memanfaatkan kemampuan tumbuhan tertentu untuk menyerap, mengakumulasi, atau memetabolisme polutan, termasuk logam berat. Konsep fitoremediasi dijelaskan secara mendalam dalam buku ini, termasuk prinsip dasarnya, keunggulan metode ini dibandingkan teknik pemulihan lainnya, serta aplikasinya pada lahan tambang. Fitoremediasi memiliki beberapa keunggulan, seperti ramah lingkungan, biaya yang relatif rendah dibandingkan metode fisik atau kimia, serta memberikan manfaat jangka panjang untuk pemulihan lahan. Namun, penerapannya juga memiliki keterbatasan, seperti ketergantungan pada kondisi lingkungan, waktu yang relatif lama, serta pemilihan jenis tumbuhan yang sesuai.

Salah satu tumbuhan yang berpotensi besar dalam fitoremediasi adalah Belimbing Bajo, yang menjadi fokus utama buku ini. Potensi Belimbing Bajo dalam menyerap logam berat seperti nikel dan memperbaiki kualitas tanah telah dibuktikan melalui berbagai kajian. Tanaman ini dikenal memiliki daya toleransi yang tinggi terhadap tanah dengan kandungan logam berat, kemampuan untuk mengakumulasi logam di jaringan tanamannya, serta peran

ekologis dalam meningkatkan bahan organik tanah. Di samping itu, Belimbing Bajo juga memiliki nilai ekonomis sebagai tanaman buah, yang dapat memberikan manfaat tambahan bagi masyarakat sekitar tambang. Buku ini akan membahas secara rinci mekanisme fitoremediasi oleh Belimbing Bajo, termasuk strategi optimalisasi penggunaannya dalam skala besar, manajemen pemeliharaan tanaman, dan dampak ekologis yang dihasilkan.

Untuk meningkatkan efektivitas proses fitoremediasi, buku ini juga menguraikan peran asam sitrat dan pupuk NPK sebagai komponen pendukung. Asam sitrat berfungsi sebagai agen chelating yang dapat meningkatkan ketersediaan logam berat dalam tanah, sehingga mempermudah tanaman menyerap logam tersebut. Di sisi lain, pupuk NPK (nitrogen, fosfor, dan kalium) berperan penting dalam mempercepat pertumbuhan tanaman dan mendukung aktivitas fisiologisnya, termasuk akumulasi logam berat di jaringan tanaman. Kombinasi Belimbing Bajo, asam sitrat, dan pupuk NPK telah terbukti mampu meningkatkan efisiensi remediasi secara signifikan, mempercepat waktu pemulihan lahan, dan mendukung keberhasilan fitoremediasi di berbagai kondisi lahan tambang. Selain aspek teknis, buku ini juga menyoroti implikasi hasil kajian terhadap berbagai aspek, seperti ekologi, sosial, dan ekonomi. Dari sudut pandang ekologis, pemulihan lahan tambang yang terdegradasi tidak hanya mengurangi konsentrasi logam berat di tanah tetapi juga memulihkan fungsi ekosistem lokal, termasuk keberagaman hayati dan kapasitas tanah untuk mendukung pertumbuhan