

Peranan Mikroba Tanah

Sopialena

Kata Pengantar

Selamat datang dalam lembaran-lembaran buku ini yang akan membawa kita menggali lebih dalam tentang peran yang sangat vital namun seringkali terlupakan—mikroba tanah. Buku ini, berjudul "Peranan Mikroba Tanah," mengajak pembaca untuk memahami betapa pentingnya mikroba tanah dalam menjaga keseimbangan ekosistem tanah dan dampaknya terhadap kehidupan manusia.

Mikroba tanah, yang terdiri dari berbagai jenis bakteri, fungi, dan organisme mikroskopis lainnya, ternyata memainkan peran yang tak tergantikan dalam menyokong produktivitas tanah. Dengan keragaman fungsi dan aktivitasnya, mikroba tanah berkontribusi secara signifikan dalam siklus hara, dekomposisi bahan organik, serta membantu tanaman dalam penyerapan nutrisi. Pengetahuan mendalam mengenai mikroba tanah bukan hanya penting bagi ilmuwan tanah, tetapi juga bagi para praktisi pertanian, pengelola lingkungan, dan semua pihak yang peduli terhadap keberlanjutan bumi.

Buku ini disusun dengan tujuan memberikan pemahaman yang komprehensif mengenai berbagai aspek peran mikroba tanah. Mulai dari struktur dan fungsi mikroba tanah, interaksi dengan tanaman, hingga dampaknya terhadap kesehatan manusia dan lingkungan. Kami berharap buku ini dapat menjadi panduan yang bermanfaat dan memberikan wawasan baru dalam memahami ekosistem tanah yang kompleks.

Penyusunan buku ini tidak terlepas dari dukungan berbagai pihak. Kami mengucapkan terima kasih kepada para peneliti, praktisi, dan akademisi yang telah memberikan kontribusi ilmiahnya. Semoga buku ini dapat menjadi sumber inspirasi dan pengetahuan bagi pembaca yang ingin menjelajahi dunia mikroba tanah.

Selamat membaca dan mari bersama-sama menjaga kelestarian tanah untuk masa depan yang lebih baik.

Penulis

PERANAN MIKROBA TANAH

Mikroba merupakan organisme yang memiliki relung yang sangat sempit sehingga sangat rentan terhadap perubahan lingkungan. Kerentanan ini memacu mikroba bermutasi untuk bertahan hidup pada kondisi lingkungan yang baru (Toor dan Adnan, 2020). Banyak ditemukan mikroba yang menghuni lahan yang terkontaminasi logam berat seperti lahan bekas tambang. Mikroba memiliki banyak peran, baik menguntungkan maupun merugikan manusia di lahan bekas tambang. Di satu sisi mikroba tanah dapat memperburuk kondisi tanah, misalnya mikroba yang berperan sebagai biokatalis DAL, namun ada yang aktif mereduksi logam menjadi tidak tersedia, ada pula yang membantu pertumbuhan tanaman sehingga proses revegetasi menjadi lebih baik. Secara rinci peran mikroba tersebut diuraikan sebagai berikut:

Sebagai Biokatalis AMD dan sebagai Agen Biomining

Peristiwa DAL terjadi karena oksidasi mineral belerang sisa penambangan terbuka dan pelepasan asam sulfat seperti reaksi $FeS_2 + 14Fe^{3+} + 8H_2O \rightarrow 15Fe^{2+} + 2SO_4^{2-} + 16H^+$. Asam sulfat merupakan asam kuat sehingga akan menurunkan pH tanah dan air secara drastis. Penurunan pH dapat meningkatkan kelarutan logam.

Penurunan pH dan hilangnya bahan organik (akibat penambangan terbuka) akan memacu inisiasi bakteri pengoksidasi belerang (BOS) seperti *Thiobacillus* spp., *Leptospirillum* spp., *Sulfolobus* spp., dan *Ferroplasma* spp. Mikroba ini bersifat asam (asidofilik), menggunakan sumber C dari bahan anorganik (lithotrof atau Muscrof) dan menggunakan sumber energi dari oksigen (Widyati, 2007). Spesies

T. ferrooxidans, yang dikenal sebagai chemolithotrophs dan mensintesis selnya dari karbon yang diperoleh secara enzimatik dari CO₂, ternyata mampu menggunakan karbon organik secara terbatas (Miche dan Balandreau 2001). Kehadiran BOS akan memacu laju DAL hingga 500.000-1.000.000 kali dibandingkan dengan reaksi geokimia (Cui et al. 2021) sehingga dalam hal ini kelompok mikroba tersebut sangat merugikan lingkungan tempat tinggalnya. Namun, BOS dapat digunakan untuk “memanen” sisa logam yang memiliki nilai ekonomi tinggi seperti tembaga, seng, nikel bahkan dapat melepaskan emas dan perak dari mineral pirit (Miche dan Balandreau 2001).

Kelompok mikroba ini dikenal sebagai “mikroba penambang” atau biominer dan kegiatan penambangan menggunakan mikroba disebut biomining. Menurut (Rawlings 2004) biomining adalah istilah untuk memfasilitasi ekstraksi logam dari mineral yang mengandung belerang atau besi dengan menggunakan mikroba. Proses pelarutan logam merupakan gabungan antara proses kimia dan mikrobiologi, dimana proses kimia terjadi karena adanya Fe³⁺ dan atau asam yang dihasilkan oleh aktivitas mikroba. Ekstrak logam dalam proses biomining dilarutkan ke dalam air, sehingga proses ini disebut bioleaching sedangkan khusus untuk pemulihan emas dari lumpur tailing digunakan istilah bio-oksidasi (Rawlings 2004). Menurut (Rawlings 2004), tidak semua mineral dapat dipanen oleh logam melalui teknologi bioleaching tetapi hanya logam yang terikat pada mineral yang mengandung belerang, besi atau belerang yang direduksi, sehingga proses bioleaching selalu menghasilkan limbah berupa Fe³⁺ dan asam sulfat.

Menurut (Rawlings 2004) ekstraksi logam dengan mikroba lebih ekonomis dan lebih ramah lingkungan daripada ekstraksi kimia. Kadar logam yang terlalu rendah dibandingkan dengan mineral yang mengikatnya menyebabkan ekstraksi kimia menjadi tidak ekonomis dibandingkan dengan pemulihan logam. Metode

bioleaching juga tidak membutuhkan energi yang besar seperti yang digunakan untuk proses peleburan dan pembakaran pada proses ekstraksi logam tradisional. Selain itu, metode bioleaching lebih ramah lingkungan dibandingkan dengan proses fisikokimia karena proses ini menggunakan proses yang terjadi di alam. Misalnya pada proses peleburan dan pembakaran akan menghasilkan gas berbahaya seperti SO_2 , hal ini tidak terjadi pada proses bio-leaching. Mekanisme pelarutan mineral sulfida menunjukkan pola yang berbeda ditemukan bahwa oksidasi sulfida logam yang berbeda dimulai dengan reaksi perantara yang berbeda. Untuk pirit (FeS_2) dan molibdenit (MoS_2) melalui reaksi antara yang disebut mekanisme tiosulfat. Sedangkan spalerit (ZnS), chalcopyrite (CuFeS_2) atau galena (PbS) melalui mekanisme polisulfida.

Bakteri yang telah terbukti efektif melepaskan logam komersial antara lain: *T. ferrooxidans* dan *L. ferrooxidans* dengan kepadatan populasi 10^6 - 10^7 unit pembentuk koloni/ml media tanam. Beberapa kelompok mikroba ditemukan bekerja pada temperatur yang berbeda sehingga dapat digunakan untuk biomining pada mineral yang berada pada kedalaman lapisan tanah yang berbeda. Pada oksidasi mineral yang dioperasikan pada kisaran suhu 40°C , mikroba yang paling efektif adalah campuran gugus (konsorsium) BOS gram negatif, yang terdiri dari *Acidithiobacillus ferrooxidans* (sebelumnya *Thiobacillus ferrooxidans*), *At. thiooxidans* (sebelumnya *T. thiooxidans*), dan *At. caldus* (sebelumnya *T. caldus*), dan bakteri pengikat ikatan besi *Leptospirillum ferrooxidans* dan *L. ferriphilum* (Rawlings 2004).

Sebagai Agen Bioremediasi Logam

Sebagai penghuni tanah, kehidupan mikroba selalu dipengaruhi secara langsung oleh perubahan tanah. Pada lahan bekas tambang terjadi perubahan tanah (fisik, kimia, dan biologi) secara drastis, sehingga mikroba harus beradaptasi dengan lingkungan baru, atau punah. Menurut (Helbig et al. 2008) salah satu mekanisme adaptasi adalah mengubah ekspresi gen sehingga aktivitas enzim dan protein memungkinkan mereka untuk terus hidup di lingkungan tersebut. Beberapa mekanisme mikroba beradaptasi pada lahan bekas tambang yang terkontaminasi logam, antara lain mikroba mampu menggunakan logam sebagai sumber energi, meresepkan logam dalam garam logam yang tidak larut, melumpuhkan logam dalam dinding sel, memproduksi agen pengkhelet, mengubah permeabilitas membran sel mikroba menjadi logam. dan mereduksi logam menjadi bentuk yang tidak beracun (Helbig et al. 2008). Kemampuan mikroba tersebut dapat dimanfaatkan dalam proses detoksifikasi logam yang dikenal dengan bioremediasi.

Bioremediasi adalah proses pemulihan polutan dengan memanfaatkan jasa makhluk hidup seperti mikroba (bakteri, jamur, khamir), tumbuhan hijau atau enzim yang dihasilkan dalam proses metabolismenya (diekstraksi dari berbagai sumber). Untuk mikroba tertentu, polutan dapat digunakan sebagai sumber energi untuk pertumbuhannya (Alexander 1978).

Pada lahan bekas tambang ditemukan logam yang pada awalnya dalam keadaan reduktif yang berikatan dengan sulfida membentuk mineral kompleks. Namun, logam ini menjadi tersedia karena teroksidasi akibat bereaksi dengan udara dan atau air. Fe, Mn, Zn, Cu, Ni, dan lainnya banyak dijumpai pada lahan bekas tambang. Selain itu, penambangan yang membutuhkan pemurnian bijih banyak ditemukan logam berat seperti arsenik (As), merkuri (Hg) atau bahan berbahaya lainnya seperti sianida (CN). Salah satu jenis mikroba yang terbukti mampu

melakukan bioremediasi sianida adalah *Pseudomonas pseudoalcaligenes* (Helbig et al. 2008), yang dapat menurunkan ketersediaan CN di kolam tailing hingga 90% dalam waktu 2-3 hari pada pH 10,5. Untuk mendegradasi merkuri (Hg) beberapa mikroba diketahui memiliki enzim merkuri reduktase seperti *Pseudomonas putida*, *Geobacter metal-reducens*, *Shewanella putrefaciens*, *Desulfovibrio desulfuricans*, dan *D. vulgaris*. Dua spesies terakhir adalah kelompok bakteri pereduksi sulfat (BPS). Penelitian yang dilakukan oleh Lovley (Widyati 2007) menunjukkan bahwa remediasi merkuri dengan mikroba jauh lebih baik dibandingkan dengan cara kimia karena cara kimia selain lebih mahal juga masih menghasilkan lumpur yang mengandung Hg.

Akar permasalahan pada lahan bekas tambang terbuka (misalnya pada lahan bekas tambang batu bara) telah diidentifikasi oleh (Widyati 2007) yaitu pH yang sangat rendah akibat akumulasi sulfat pada lahan yang mengakibatkan peningkatan kelarutan bahan tambang. logam. Oleh karena itu kegiatan rehabilitasi pada lahan tersebut harus dimulai dengan penurunan konsentrasi sulfat dan pencegahan oksidasi mineral lebih sulfida lebih lanjut. Kelompok bakteri pereduksi sulfat (BPS) dapat digunakan untuk mereduksi sulfat. Hasil penelitian oleh (Widyati 2007) menunjukkan bahwa BPS dapat digunakan untuk mereduksi sulfat di lahan bekas tambang batubara dengan efisiensi 80% dalam waktu 10 hari. Selain itu, inokulum BPS dengan dosis inokulum 25% dari total volume tanah dapat menurunkan ketersediaan Fe, Mn, Zn, dan Cu dengan efisiensi mencapai 90% dengan waktu inkubasi 15 hari. Aplikasi pada air asam tambang (AAT) yang dilakukan oleh (Widyati 2007) penambahan inokulum BPS 1% dari volume AAT dapat meningkatkan pH menjadi netral dalam beberapa jam setelah aplikasi. Untuk menurunkan kandungan logam dosis efektif adalah 10% dengan waktu inkubasi 2-4 hari.

Sebagai Plant Booster Melakukan Proses Fitoremediasi

Fitoremediasi adalah istilah yang dikhususkan untuk proses bioremediasi yang dilakukan oleh tanaman. Salah satu mekanisme tanaman dalam melakukan fitoremediasi adalah memfasilitasi aktivitas mikroba di dalam tanah melalui pembentukan asosiasi sehingga dikenal dengan fitostimulasi. Untuk mengoptimalkan proses fitoremediasi, tanaman merangsang aktivitas mikroba tanah dalam mendegradasi logam. Untuk menarik mikroba agar mendekati akar dan berasosiasi dengan tanaman, maka akar mengeluarkan eksudat akar yang umumnya berupa protein, asam organik atau senyawa lain yang dibutuhkan oleh mikroba (Toor dan Adnan 2020). Mikroba akan bergerak lebih dekat ke akar dan ini dikenal sebagai kemotaksis. Contohnya adalah tanaman kacang-kacangan yang mengeluarkan flavonoid yang dapat merangsang asosiasi antara tanaman kacang-kacangan dan bakteri rhizobium. Beberapa genus rhizobium diketahui berperan dalam proses bioremediasi logam pada lahan yang terkontaminasi karena memiliki enzim metalothionine (Widyati 2013). Contoh lain adalah asosiasi tanaman dengan jamur pembentuk mikoriza, khususnya jamur mikoriza arbuskula (FMA). Menurut (Davies et al. 2001), dalam membantu tanaman inang yang hidup pada lahan yang memiliki kandungan logam berat tinggi CMA mensekresikan senyawa pengkhelat logam berat (seperti asam organik dan siderofor) ke dalam rizosfer atau menghasilkan enzim metalreduktase sehingga dapat melumpuhkan logam. Sedangkan menurut (Joner dan Leyval 1997), hifa ekstra radikal FMA dapat menyerap logam berat lebih banyak tetapi logam tersebut tidak bergerak sehingga tidak dapat diserap oleh tanaman inang. Hasil penelitian (Gonzalez-Chavez et al. 2002) menunjukkan bahwa hifa ekstradadikal *Glomus caledonium*, *G. mossae*, dan *G. claroideum* dapat menyerap dan mengakumulasi Cu pada bagian mucilaginous dinding sel luar hifa, pada dinding sel hifa atau dalam sitoplasma.

Dengan demikian tanaman tidak akan menyerap logam berat dalam jumlah yang melebihi ambang toleransi tanaman.

Penelitian yang dilakukan oleh (Toler, Morton, dan Cumming 2005) menunjukkan bahwa FMA yang diisolasi dari lahan yang terkontaminasi Cu dan Zn memiliki mekanisme yang berbeda untuk melindungi tanaman inang dari keracunan, penyerapan logam ke dalam hifa, dan transfer ke pucuk jaringan tanaman. WPP yang diisolasi dari tanah tercemar meningkatkan serapan Cu tetapi tidak menyebabkan keracunan inang. Di sisi lain, FMA yang diisolasi dari tanah yang tidak tercemar akan mencegah tanaman menyerap Cu dalam jumlah yang melebihi ambang batas toleransi tanaman inangnya. Hasil penelitian oleh (Widyati 2007) menunjukkan bahwa *Acacia crassicarpa* yang ditanam pada lahan bekas tambang batubara, kemampuan mengakumulasi Mn, Zn, dan Cu meningkat secara signifikan setelah diinokulasi dengan konsorsium *Rhizobium* sp., *Glomus* sp. 6, dan *Bacillus* sp. bakteri pelarut fosfat. yang juga diisolasi dari lahan bekas tambang batubara. Dengan demikian peran mikroba tanah dalam membantu proses fitoremediasi adalah menyediakan lingkungan yang optimal agar benih dapat tumbuh dan berperan secara optimal atau membantu meningkatkan penyerapan logam tanpa tanaman mengalami keracunan. Hal ini akan mempercepat penyingkiran logam dari lingkungan sehingga kualitas lingkungan menjadi lebih baik.

Pengelolaan tanah mempengaruhi struktur komunitas mikroba tanah telah banyak dilaporkan Penggunaan pestisida, amandemen kitin (Toler, Morton, dan Cumming 2005), kompos atau pupuk kandang dan pengenalan mutan mikroba akan mempengaruhi struktur komunitas mikroba di tanah. tanah. Sifat fisikokimia tanah (Sopialena et al. 2018), distribusi ukuran partikel tanah, keberadaan dan umur jenis tumbuhan serta rotasi tanaman merupakan faktor kunci penentu struktur

komposisi mikroba tanah. Jenis tanaman dan tanah mempengaruhi struktur komunitas mikroba, namun informasi rinci tentang interaksinya tidak dapat diperoleh dan masih perlu studi lebih lanjut. Komunitas mikroba tanah sangat sulit untuk dikarakterisasi, karena adanya keragaman fenotipik dan genotipik, heterogenitas, dan kriptisitas. Populasi bakteri pada tanah pucuk $> 10^9$ sel/g tanah dan sebagian besar tidak dapat dibudidayakan.

Kehidupan mikroba di dalam tanah berperan penting dalam mengendalikan stabilitas ekosistem tanah. Faktor yang mempengaruhi struktur komunitas mikroba di dalam tanah adalah jenis tanah dan tumbuhan, serta pengelolaan tanah. Selain terdapat mikroba tanah yang bermanfaat bagi tanaman dengan menghasilkan unsur hara dan hormon pertumbuhan tanaman, terdapat pula mikroba dalam tanah yang menyebabkan penyakit tanaman. Pada kondisi ekosistem tanah yang stabil, tekanan mikroba patogen dapat ditekan secara alami (Sopialena dan Palupi 2017). Dengan memahami kondisi lingkungan tanah baik dari aspek fisik, kimia dan biologi maka tindakan pengelolaan tanah untuk menjaga kesuburan tanah dapat dilakukan dengan tepat. Pengelolaan ekologi kesuburan tanah memberi harapan lebih dalam mewujudkan sistem pertanian berkelanjutan, dengan memperhatikan interaksi antara mikroba dengan tanah dan mikroba dengan tanaman oleh pengaruh ruang dan waktu di dalam tanah. Memahami luasnya pengaruh tumbuhan dalam ruang dan waktu akan menjadi tantangan besar bagi pertanian di masa depan, didukung lagi oleh fluktuasi kondisi abiotik tanah (seperti kadar air dan suhu tanah) yang mempengaruhi struktur komunitas mikroba.