

The background of the cover is a photograph of a mangrove forest. The top half shows the dense canopy of green leaves and brown branches. The bottom half shows a body of water reflecting the trees and their complex root systems. A large green banner with a white scalloped border separates the two images.

Peran Mikroba Indegenous Dalam Bioremediasi

Suatu Teknologi Alternatif Untuk Pelestarian lingkungan di Perairan Mangrove

Peran mikroba indigenous dalam bioremediasi

Suatu Teknologi Alternatif untuk Pelestarian Lingkungan di Perairan Mangrove

Peran mikroba indigenous dalam bioremediasi: suatu teknologi alternatif untuk pelestarian lingkungan di perairan mangrove)

Penulis : Vella Rohmayani, Nurhidayatullah Romadhon, Anindita Riesta Retno Arimurti, H. Hery Purnobasuki, Ni'matuzahroh
Desain Cover : Dayat
Tata Letak : Dayat



Hak Cipta Penerbit UMSurabaya Publishing
Jl Sutorejo No 59 Surabaya 60113
Telp : (031) 3811966, 3811967
Faks : (031) 3813096
Website : <http://www.p3i.um-surabaya.ac.id>
Email : p3iumsurabaya@gmail.com

Hak cipta dilindungi undang-undang. Dilarang memperbanyak sebagian atau seluruh isi buku ini dalam bentuk apapun, baik secara elektronik maupun mekanis, termasuk memfotokopi, merekam, atau dengan menggunakan sistem penyimpanan lainnya, tanpa izin tertulis dari penerbit.

UNDANG- UNDANG NOMOR 28 TAHUN 2014 TENTANG HAK CIPTA

1. Setiap Orang yang dengan tanpa hak/atau tanpa ijin pencipta atau pemegang Hak Cipta melakukan pelanggaran hak ekonomi pencipta yang meliputi Penerjemah dan Pengadaptasian Ciptaan untuk Penggunaan Secara Komersial dipidana dengan pidana paling lama 1 (satu) tahun dan/atau pidana denda paling banyak Rp 500.000.000,00 (lima ratus juta rupiah)
2. Setiap Orang yang dengan tanpa hak dan atau tanpa ijin Pencipta atau pemegang Hak Cipta melakukan pelanggaran hak ekonomi Pencipta yang meliputi Penerbitan, Penggandaan dalam segala bentuknya, dan pendistribusian Ciptaan untuk Penggunaan Secara Komersial, dipidana dengan pidana penjara paling lama 4 (empat) tahun dan/atau pidana denda paling banyak Rp 1.000.000.000,00 (satu miliar rupiah)
3. Setiap Orang yang memenuhi unsur sebagaimana dimaksud pada poin kedua diatas yang dilakukan dalam bentuk Pembajakan, dipidana dengan pidana penjara paling lama 10 (sepuluh) tahun dan/atau pidana denda paling banyak Rp 4.000.000.000,00 (empat miliar rupiah)


Surabaya : UM Surabaya Publishing, 2023
Ukuran Buku : 14.8 X 21 cm, vi + 57
QRCCN : 978-623-433-095-3



Daftar Isi

Kata Pengantar	i
Daftar Isi	iii
Definisi hutan mangrove	1
1.1. Fungsi dan peranan mangrove	3
1.2. Zonasi dan karakteristik mangrove	5
1.3. Biota hutan mangrove	9
1.4. Ancaman ekosistem mangrove	11
Pencemaran Perairan Mangrove	15
2.1.Limbah industri	15
2.2.Limbah Domestik	18
2.3.Erosi dan Sedimentasi	22
2.4.Pencemaran akibat Pelabuhan	22
Bioremediasi	23
3.1.Strategi Bioremediasi dalam Mangrove	24
3.2.Faktor-faktor yang berpengaruh dalam proses bioremediasi	26
3.3.Keuntungan dan Tantangan Bioremediasi	30
3.4. Keuntungan Bioremediasi pada Perairan Mangrove	30
3.5. Tantangan Bioremediasi pada Perairan Mangrove..	31
Bakteri Indegenous.....	33
4.1. Bakteri Indegenous	33
4.2. Isolasi Mikroba	36

Interaksi Mikroba Indigenous dengan Lingkungan Mangrove	41
5.1. Adaptasi Mikroba Terhadap Kondisi Lingkungan di Mangrove	41
5.2. Bioremediasi Polusi Minyak	47
Kesimpulan	51
Daftar Pustaka	55



Kata Pengantar

Dengan rasa hormat dan antusiasme yang mendalam, kami mempersembahkan buku ini, yang berjudul "Peran Mikroba Indigenous dalam Bioremediasi Perairan Mangrove", sebagai upaya untuk memperluas wawasan dan pengetahuan kita tentang salah satu aspek paling vital namun sering terabaikan dalam pelestarian lingkungan. Buku ini dibangun atas dasar penghargaan terhadap keajaiban mikroba indigenous dan peran kunci mereka dalam mengatasi tantangan lingkungan kontemporer, khususnya pencemaran di ekosistem mangrove.

Ekosistem mangrove, yang berfungsi sebagai penjaga garis depan terhadap erosi pantai, penyerap karbon dioksida yang efektif, dan habitat bagi keanekaragaman hayati, saat ini menghadapi ancaman serius akibat aktivitas manusia, termasuk polusi dari limbah pertanian dan industri. Dalam menghadapi tantangan ini, mikroba indigenous muncul sebagai pahlawan tanpa tanda jasa, dengan kemampuan alami mereka untuk mendegradasi polutan dan memulihkan keseimbangan ekologis.

Buku ini ditujukan untuk para ilmuwan, peneliti, praktisi lingkungan, pembuat kebijakan, dan siapa saja yang memiliki kepedulian terhadap kelestarian lingkungan. Melalui pembahasan yang mendalam namun mudah diakses, kami bertujuan untuk menyajikan pengetahuan terkini tentang bioremediasi yang dipimpin oleh mikroba indigenous, termasuk mekanisme kerja, strategi

implementasi, serta tantangan dan peluang yang ada. Kami berharap bahwa pembaca akan mendapatkan pemahaman yang lebih baik tentang pentingnya mikroba indigenus dan potensi mereka dalam memperbaiki kerusakan lingkungan, khususnya dalam konteks konservasi mangrove. Lebih dari itu, kami mengharapkan buku ini dapat memicu lebih banyak inisiatif penelitian dan aplikasi praktis yang berfokus pada pemanfaatan mikroba indigenus dalam upaya pelestarian lingkungan kita.

Akhir kata, kami mengucapkan terima kasih kepada semua pihak yang telah mendukung penulisan buku ini, dari para peneliti yang telah menyumbangkan pengetahuannya, hingga kepada Anda, pembaca, yang kepeduliannya terhadap lingkungan telah membawa Anda untuk mengeksplorasi halaman-halaman ini. Semoga buku ini menjadi sumber inspirasi dan tindakan nyata untuk melindungi dan memulihkan ekosistem mangrove, untuk generasi sekarang dan yang akan datang.



Definisi hutan mangrove

Istilah ‘mangrove’ tidak diketahui secara pasti asal usulnya. Ada yang mengatakan bahwa istilah tersebut kemungkinan merupakan kombinasi dari bahasa Portugis dan Inggris. Bangsa Portugis menyebut salah satu jenis pohon mangrove sebagai ‘mangue’ dan istilah Inggris ‘grove’, bila disatukan akan menjadi ‘mangrove’ atau ‘mangrave’

Mangrove adalah tanaman pepohonan atau komunitas tanaman yang hidup di antara laut dan daratan yang dipengaruhi oleh pasang surut (Romimohtarto and Juwana, 2001).

Hutan mangrove merupakan tipe hutan tropika dan subtropika yang khas, tumbuh di sepanjang pantai atau muara sungai yang dipengaruhi oleh pasang surut air laut. Mangrove banyak di jumpai di wilayah pesisir yang terlindung dari gempuran ombak dan daerah yang landai. Mangrove tumbuh optimal di wilayah pesisir yang memiliki muara sungai besar dan delta yang aliran airnya banyak mengandung lumpur. Sedangkan di wilayah pesisir yang tidak bermuara sungai, pertumbuhan vegetasi mangrove tidak optimal.

Mangrove sulit tumbuh di wilayah pesisir yang terjal dan berombak besar dengan arus pasang surut kuat, karena kondisi ini tidak memungkinkan terjadinya pengendapan lumpur yang diperlukan sebagai substrat bagi pertumbuhannya (Nybakken, 1992; Dahuri, 2003).

Ekosistem mangrove terdapat pada wilayah pesisir, terpengaruh pasang surut air laut dan didominasi oleh spesies pohon atau semak yang khas dan mampu tumbuh dalam perairan asin/payau (Santoso, 2000). Peristiwa pasang-surut yang berpengaruh langsung terhadap ekosistem mangrove menyebabkan komunitas ini umumnya didominasi oleh spesies spesies pohon yang keras atau semak-semak yang mempunyai manfaat pada perairan payau. Faktor lingkungan yang sangat mempengaruhi komunitas mangrove, yaitu salinitas, suhu, pH, oksigen terlarut, arus, kekeruhan, dan substrat dasar (Nybakken, 1992).

Menurut Duke (1992) ekosistem mangrove mempunyai ciri khusus karena lantai hutannya secara teratur digenangi oleh air yang dipengaruhi oleh salinitas serta fluktuasi ketinggian permukaan air karena adanya pasang surut air laut. Hutan mangrove dikenal juga dengan istilah *intertidal forestcoastal* yang terletak di perbatasan antara darat dan laut, tepatnya di daerah pantai dan sekitar muara sungai yang dipengaruhi pasang surut. Sedangkan menurut Kusmana *et al.* (1995), hutan mangrove adalah suatu tipe hutan yang tumbuh di daerah pasang surut (terutama di pantai yang terlindung, laguna, muara sungai) yang tergenang waktu air laut pasang dan

bebas dari genangan pada saat air laut surut, yang komunitas tumbuhannya toleran terhadap garam. Adapun ekosistem mangrove merupakan suatu sistem yang terdiri atas organisme yang berinteraksi dengan faktor lingkungan di dalam suatu habitat mangrove.

Mangrove memiliki ciri-ciri tertentu yang membedakannya dengan vegetasi hutan lainnya. Perbedaan hutan mangrove dengan vegetasi hutan lainnya berupa (1) memiliki jenis pohon yang relatif sedikit, (2) memiliki akar tidak beraturan (*pneumatofora*) misalnya seperti jangkar melengkung dan menjulang pada bakau (*Rhizophora spp*) serta akar yang mencuat vertikal seperti pensil pada pidada (*Sonneratia spp*) dan jenis api-api (*Avicennia spp*), (3) memiliki biji (*propagul*) yang bersifat vivipar atau dapat berkecambah dipohonnya, khususnya pada *Rhizophora spp* dan (4) memiliki banyak lentisel pada bagian kulit pohon (LPP Mangrove Indonesia, 2008).

1. Fungsi dan peranan mangrove

Mangrove merupakan contoh ekosistem yang banyak ditemui di sepanjang pantai tropis dan estuari. Ekosistem ini memiliki fungsi sebagai penyaring bahan nutrisi dan penghasil bahan organik, serta berfungsi sebagai daerah penyangga antara daratan dan lautan. Menurut Arief (1994) dan LPP Mangrove Indonesia (2008), fungsi hutan mangrove dapat dipandang dari beberapa aspek biologi, aspek fisika dan aspek ekonomi. Ditinjau dari aspek biologi, hutan mangrove memiliki

Peran mikroba inogenous dalam bioremediasi

Suatu Teknologi Alternatif untuk Pelestarian Lingkungan di Perairan Mangrove

fungsi sebagai (1) tempat pemijahan (*spawning ground*) dan pertumbuhan pasca larva (*nursery ground*) komoditi perikanan bernilai ekonomis tinggi (ikan, kepiting, udang dan kerang), (2) perlindungan berbagai jenis satwa liar seperti monyet, biawak, buaya, dan burung dan (3) penyerapan karbon dan penghasil oksigen yang sangat berguna bagi peningkatan kualitas lingkungan hidup, (4) tempat terdapatnya sumber makanan dan unsurunsur hara. Daun mangrove berfungsi sebagai sumber bahan organik dan sumber pakan konsumen pertama yaitu pakan cacing, kepiting dan golongan kerang dan keong yang selanjutnya menjadi sumber makanan bagi konsumen di atasnya sesuai siklus rantai makanan dalam suatu ekosistem.

Ditinjau dari aspek fisika hutan mangrove memiliki fungsi sebagai (1) pembangunan lahan dan pengendapan lumpur sehingga dapat memperluas daratan, (2) menjaga garis pantai agar tetap stabil, perlindungan pantai dari abrasi akibat gelombang ombak, arus, banjir akibat laut pasang dan terpaan angin, (3) pencegahan intrusi air laut ke daratan, dan (4) pengelolah limbah organik dan perangkap zat-zat pencemar (*pollutant trap*) baik di udara maupun di rawa dan pantai seperti CO₂.

Ditinjau dari aspek ekonomi hutan mangrove memiliki fungsi sebagai (1) bahan bakar berupa kayu bakar dan arang, (2) bahan bangunan berupa kayu bangunan, tiang dan pagar, (3) alat penangkap ikan berupa tiang sero, bubu, pelampung dan bagan, (4)

makanan, minuman, alkohol dan obat-obatan, (5) bahan baku *pulp* dan kertas, (6) bahan baku untuk membuat alat-alat rumah tangga dan kerajinan, (7) pariwisata. Vegetasi mangrove yang dijadikan sebagai bahan obatobatan berupa daun *Bruguiera sexangula* (Lour) untuk obat penghambat tumor, *Ceriops tagal* (Pers) dan *Xylocarpus mollucensis* (Lamk) untuk obat sakit gigi. Daun nipa dapat digunakan sebagai bahan baku untuk pembuatan atap rumah; tannin yang dihasilkan mangrove berfungsi sebagai bahan baku pembuatan tinta, plastik, lem dan pengawet.

1.2. Zonasi dan karakteristik mangrove

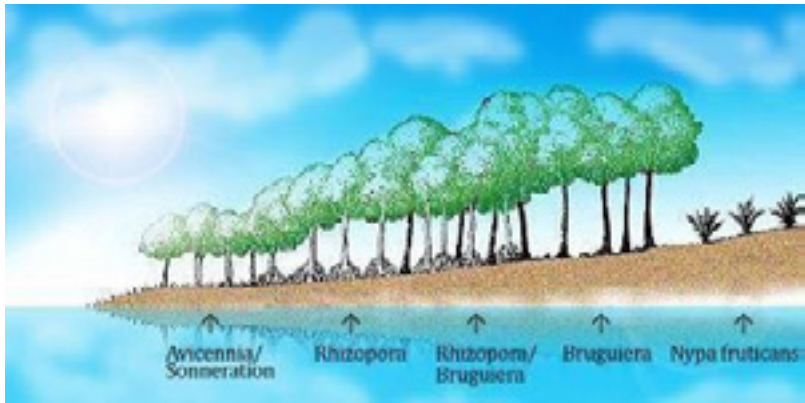
Ekosistem mangrove dapat tumbuh dengan baik pada zona pasangsurut di sepanjang garis pantai daerah tropis seperti baguna, rawa, delta, dan muara sungai. Ekosistem mangrove bersifat kompleks dan dinamis tetapi labil. Kompleks, karena di dalam ekosistem mangrove dan perairan maupun tanah di bawahnya merupakan habitat berbagai jenis satwa daratan dan biota perairan. Dinamis, karena ekosistem mangrove dapat terus tumbuh dan berkembang serta mengalami suksesi serta perubahan zonasi sesuai dengan tempat tumbuh. Labil, karena mudah sekali rusak dan sulit untuk pulihnkembali (Kusmana, 1995). Pertumbuhan mangrove akan menurun jika suplai air tawar dan sedimen rendah.

Menurut Arief (2003), pembagian zonasi dapat dilakuka berdasarkan jenis vegetasi yang mendominasi yaitu sebagai berikut:

Peran mikroba indigenous dalam bioremediasi

Suatu Teknologi Alternatif untuk Pelestarian Lingkungan di Perairan Mangrove

- 1) Zona *Avicennia*, terletak pada lapisan paling luar dari hutan mangrove. Pada zona ini, tanah berlumpur lembek dan berkadar garam tinggi. Jenis *Avicennia* banyak ditemui berasosiasi dengan *Sonneratia* Spp, jenis ini memiliki perakaran yang sangat kuat yang dapat bertahan dari hempasan ombak laut. Zona ini juga merupakan zona perintis atau pioner, karena terjadinya penimbunan sedimen tanah akibat cengkeraman perakaran tumbuhan jenis-jenis ini.
- 2) Zona *Rhizophora*, terletak dibelakang zona *Avicennia* dan *Sonneratia*. Pada zona ini, tanah berlumpur lembek dengan kadar garam lebih rendah. Perakaran tanaman tetap terendam selama air laut pasang.
- 3) Zona *Bruguiera*, terletak dibelakang zona *Rhizophora*. Pada zona ini tanah berlumpur agak keras. Perakaran tanaman lebih peka serta hanya terendam pasang naik dua kali sebulan.
- 4) Zona *Nypah*, yaitu zona pembatas antara daratan dan lautan, namun zona ini sebenarnya tidak harus ada, kecuali jika terdapat air tawar yang mengalir (sungai) ke laut.



Gambar 2.1. Pola Zonasi Mangrove (Bengen, 2002)

Watson (1928) dalam Kusmana (1995) berpendapat bahwa hutan mangrove dapat dibagi menjadi lima bagian berdasarkan frekuensi air pasang, yaitu; zonasi yang terdekat dengan laut, akan didominasi olehn *Avicennia* spp dan *Sonneratia* spp, tumbuh pada lumpur lunak dengan kandungan organik yang tinggi. *Avicennia* spp tumbuh pada substrat yang agak keras, sedangkan *Avicennia alba* tumbuh pada substrat yang agak lunak; zonasi yang tumbuh pada tanah kuat dan cukup keras serta dicapai oleh beberapa air pasang.

Menurut Bengen dan Dutton (2004) dalam Northcote an Hartman (2004) zonasi mangrove dipengaruhi oleh salinitas, toleransi terhadap ombak dan angin, toleransi terhadap lumpur (keadaan tanah), frekuensi tergenang oleh air laut. Zonasi yang menggambarkan tahapan suksesi yang

Peran mikroba indigenous dalam bioremediasi

Suatu Teknologi Alternatif untuk Pelestarian Lingkungan di Perairan Mangrove

sejalan dengan perubahan tempat tumbuh. Perubahan tempat tumbuh sangat bersifat dinamis yang disebabkan oleh laju pengendapan atau pengikisan. Daya adaptasi tiap jenis akan menentukan komposisi jenis tiap zonasi. Ciri khusus habitat vegetasi mangrove adalah keadaan tanah yang berlumpur atau berpasir, salinitas, penggenangan, pasang surut, dan kandungan oksigen tanah. Vegetasi mangrove akan beradaptasi melalui perubahan dan ciri khusus fisiologi, morfologis, fenologi, fisiognomi, dan komposisi struktur vegetasinya. Ekosistem hutan mangrove dengan sifatnya yang khas dan kompleks menyebabkan hanya organisme tertentu saja yang mampu bertahan dan berkembang (Kartawinata *et al*, 1979).

Adaptasi pohon mangrove terhadap keadaan tanah (lumpur) dan kekurangan oksigen dalam tanah adalah pembentukan morfologi system perakaran yang berfungsi sebagai akar nafas (*Pneumatofora*) dan penunjang tegaknya pohon. Menurut Bengen (2004), ada empat bentuk sistem perakaran pada hutan mangrove, yaitu; Akar lutut, seperti yang terdapat pada *Bruguiera* spp; Akar cakar ayam, seperti yang terdapat pada *Sonneratia* spp, *Avicennia* spp, dan kadangkadang *Xylocarpus moluccensis*; Akar tongkat/ penyangga, seperti yang terdapat pada *Rhizophora* spp; dan Akar papan seperti yang terdapat pada *Ceriops* spp.

1.3. Biota hutan mangrove

Hutan mangrove merupakan habitat bagi berbagai biota, baik biota khas mangrove maupun yang berasosiasi dengan mangrove. Kemampuan mangrove sebagai biofilter, agen pengikat dan perangkap polusi yang mampu menciptakan keseimbangan ekologi baik bagi lingkungan perairan maupun yang berasosiasi (Mulyadi *et al.* 2009). Kemudian pengertian biota mangrove adalah kelompok biota menghuni dan memanfaatkan habitat mangrove, zona pesisir intertidal, estuari, muara sungai yang mengalir ke laut untuk memenuhi kebutuhan bertahan hidup dan bereproduksi. Biota yang dijumpai mempunyai keunikan dan kekhasan.

Hal ini yang dapat menjadi potensi daya tarik ekowisata mangrove, maka perlu dikelola dengan baik guna menjaga kelestariannya (Juliana *et al.*, 2010; Tayefeh *et al.*, 2013). Menurut Arumsari (1989) dalam Ismawan (2015), burung berperan sebagai salah satu komponen ekosistem, burung mempunyai hubungan timbal balik dan saling tergantung dengan lingkungannya. Oleh karena peran dan manfaatnya maka kehadiran burung dalam suatu ekosistem perlu dipertahankan. Pimm, (1986) dalam Amir *et al.* (2015), menyebutkan pengamatan burung diperlukan karena burung memegang peranan penting sebagai predator, mangsa, penebar benih tanaman dan membantu dalam proses penyerbukan dalam menjaga keseimbangan ekologi. Kemudian burung juga dapat menjadi sampel perubahan habitat karena sifat burung

yang sensitif, hal ini yang menjadikan burung bermanfaat sebagai indicator lingkungan (Johns, 1992 *dalam* Amir *et al.*, 2015).

Fauna perairan (laut) terdiri dari kelompok ikan dan hewan avertebrata yang meliputi krustasea dan moluska. Kelompok ikan diwakilkan dengan adanya kehadiran ikan gelodok (*mud skipper*), bandeng, belanak dan ikan laut lainnya. Kelompok krustasea diwakili oleh famili kepiting (*Brachyura*), famili udang (*Penaidae*) dan famili kepiting-udang (*Macrura*). Kelompok moluska diwakili oleh famili siput (*gastropoda*) dan kerang (*bivalvia*) (Irwanto, 2006).

Salah satu kelompok biota yang sering ditemukan hidup di bagian dasar ekosistem mangrove adalah biota dari kelas krustasea dan *gastropoda*. Kelompok biota ini telah berkoeksistensi dengan ekosistem hutan mangrove terdiri atas dua tipe yaitu; biota yang hidup di kolom air, terutama berbagai jenis udang dan yang menempati substrat baik keras (akar dan batang mangrove) maupun lunak (lumpur) terutama kepiting, kelomang dan berbagai jenis krustasea lainnya (Irwanto, 2006).

Anggraeni *et al.* (2015) menyatakan bahwa krustasea di ekosistem mangrove berkedudukan sebagai spesies kunci yang melibatkan biota lain dalam aktivitas makan serta sebagai pengurai serasah mangrove untuk sebagian dimakan dan dicacah. Sehingga dengan adanya krustasea di hutan mangrove memberikan kontribusi besar terhadap detritus organik yang sangat penting sebagai sumber energi bagi biota lain yang

hidup di perairan sekitarnya (Susetiono, 2005). Kepiting merupakan biota yang paling umum ditemukan di vegetasi mangrove, seperti pada penelitian Putriningtyas (2011) yang dilakukan di Kelurahan Tugurejo, Kota Semarang didapatkan komposisi krustasea terdiri dari 8 famili yang didominasi oleh infraordo Brachyura (Kepiting), dengan komposisi sebagai berikut: 14 Brachyura (Kepiting laut), 4 Macrura (Kepiting- dang) dan 3 Anomura (Kelomang). Biota dasar perairan ekosistem mangrove selanjutnya ialah Gastropoda memiliki peran dalam rantai di ekosistem mangrove, arena di samping sebagai pemangsa detritus hewan ini berperan dalam proses dekomposisi serasah yang bersifat herbivor (pemakan tumbuhan) dan detrivor (pemakan material organik) (Irwanto, 2006). Dengan kata lain gastropoda berperan sebagai pencacah dedaunan agar menjadi bagian yang lebih kecil kemudian dilanjutkan proses dekomposisi oleh mikroorganisme (Sirante, 2011).

1.4. Ancaman ekosisem mangrove

Ekosistem mangrove merupakan salah satu ekosistem paling produktif dan bio-divers yang menyediakan berbagai manfaat ekologis, ekonomis, dan sosial. Namun, dalam beberapa dekade terakhir, ekosistem ini menghadapi ancaman serius yang berpotensi merusak fungsi dan keberlanjutannya. Kajian teoritis ini bertujuan untuk mengeksplorasi berbagai ancaman yang dihadapi oleh

Peran mikroba indigenous dalam bioremediasi

Suatu Teknologi Alternatif untuk Pelestarian Lingkungan di Perairan Mangrove

ekosistem mangrove, mengidentifikasi akar masalah, dan membahas dampak yang ditimbulkan oleh ancaman-ancaman tersebut.

a) Penebangan Mangrove

Penebangan mangrove, baik legal maupun ilegal, untuk keperluan pembangunan, pertanian, atau akuisisi lahan untuk industri dan perumahan, menyebabkan pengurangan luas area mangrove. Kehilangan habitat ini tidak hanya mengurangi biodiversitas tetapi juga mengganggu siklus hidrologi lokal dan kapasitas mangrove sebagai penyerap karbon.

b) Pencemaran

Pencemaran dari sumber-sumber seperti limbah industri, pertanian, dan domestik berdampak negatif pada kualitas air dan tanah di ekosistem mangrove. Zat-zat berbahaya seperti logam berat, pestisida, dan nutrisi berlebih dapat menghambat pertumbuhan mangrove dan meracuni spesies yang hidup di dalamnya.

c) Perubahan Iklim

Kenaikan permukaan air laut dan perubahan pola cuaca akibat perubahan iklim menimbulkan tekanan pada ekosistem mangrove. Mangrove yang tidak dapat beradaptasi dengan perubahan kondisi ini mungkin akan mati atau mengalami penurunan kualitas habitat.

d) Pembangunan Pesisir

Pembangunan infrastruktur di daerah pesisir seperti hotel, resort, dan pelabuhan sering kali tidak memperhitungkan batasan ekologis, mengakibatkan kerusakan fisik pada ekosistem mangrove. Pembangunan ini juga seringkali mengakibatkan perubahan aliran air yang dapat merugikan mangrove.

e) Sedimentasi dan Penggaraman

Sedimentasi yang berlebihan dari erosi tanah dapat menutup pori-pori tanah mangrove, mengganggu pertukaran gas akar. Sementara itu, penggaraman akibat penarikan air tanah berlebih dan intrusi air laut mengubah komposisi kimia tanah, merugikan pertumbuhan mangrove.

f) Spesies Invasif

Introduksi spesies invasif baik tanaman maupun hewan dapat mengganggu keseimbangan ekologis ekosistem mangrove, mengancam keberadaan spesies asli dan mengurangi keanekaragaman biologis.


g) Kebakaran Hutan

Kebakaran hutan, yang sering terjadi karena aktivitas manusia atau kondisi alam yang sangat kering, dapat menghancurkan ekosistem mangrove secara luas dan mengganggu regenerasi alami.

Peran mikroba inogenous dalam bioremediasi

Suatu Teknologi Alternatif untuk Pelestarian Lingkungan di Perairan Mangrove

Ancaman terhadap ekosistem mangrove memerlukan perhatian serius dan tindakan konservasi yang efektif. Perlunya pendekatan multidisiplin dan kerjasama internasional untuk melindungi ekosistem ini dari kerusakan lebih lanjut. Kebijakan yang berkelanjutan, edukasi masyarakat, dan penelitian lebih lanjut adalah kunci untuk memastikan kelangsungan ekosistem mangrove yang berharga ini



Pencemaran Perairan Mangrove

Perairan mangrove di Surabaya, khususnya di area seperti Wonorejo dan sekitarnya, menghadapi berbagai sumber pencemaran yang mempengaruhi kesehatan ekosistem mangrove. Surabaya, sebagai salah satu kota metropolitan di Indonesia, memiliki tantangan besar dalam mengelola limbah yang dihasilkan oleh aktivitas industri, domestik, dan lainnya. Berikut adalah beberapa sumber pencemaran utama yang mempengaruhi perairan mangrove di Surabaya:

2.1. Limbah Industri

Surabaya, sebagai salah satu kota metropolitan terbesar di Indonesia, memiliki berbagai zona industri yang berkontribusi terhadap pertumbuhan ekonominya. Namun, keberadaan zona industri ini juga membawa dampak negatif berupa pencemaran lingkungan, termasuk pencemaran di perairan mangrove yang ada di sekitar Surabaya. Limbah industri menjadi salah satu sumber utama pencemaran tersebut. Berikut adalah penjelasan lebih detail mengenai dampak limbah industri terhadap perairan mangrove di Surabaya:

- Jenis Limbah Industri

Limbah industri di Surabaya mencakup berbagai jenis, tergantung pada sektor industrinya. Beberapa industri yang berpotensi menghasilkan limbah berbahaya antara lain industri pengolahan makanan, tekstil, kimia, dan logam. Limbah ini dapat berupa limbah cair yang mengandung bahan kimia beracun, limbah padat, serta emisi gas ke atmosfer yang akhirnya menetap ke dalam air hujan dan masuk ke ekosistem mangrove.

- Komponen Berbahaya dalam Limbah Industri

Limbah cair industri sering mengandung logam berat seperti merkuri, kadmium, dan timbal, serta bahan organik dan anorganik lainnya yang dapat meracuni biota mangrove. Selain itu, limbah industri juga dapat mengandung nutrisi berlebih seperti nitrogen dan fosfor yang menyebabkan eutrofikasi, mengakibatkan pertumbuhan alga berlebihan yang mengganggu keseimbangan ekosistem.

- Dampak Terhadap Ekosistem Mangrove**

Kontaminasi oleh limbah industri dapat merusak struktur dan fungsi ekosistem mangrove. Akar mangrove yang terpapar polutan akan mengalami kesulitan dalam pertukaran gas, sementara konsentrasi garam yang berubah akibat pencemaran dapat

mengganggu osmoregulasi pada tumbuhan dan hewan mangrove. Kerusakan pada habitat ini berdampak pada keanekaragaman hayati, mengurangi populasi ikan dan biota lain yang bergantung pada mangrove sebagai tempat perlindungan dan pemijahan.

- Upaya Penanganan

Pemerintah kota Surabaya dan instansi terkait telah melakukan beberapa upaya untuk mengurangi dampak pencemaran limbah industri, seperti memperketat regulasi terhadap pembuangan limbah, mendorong industri untuk menggunakan teknologi ramah lingkungan, dan melakukan pemulihan ekosistem mangrove yang terdegradasi. Selain itu, program edukasi bagi industri dan masyarakat sekitar tentang pentingnya pelestarian mangrove dan pengelolaan limbah yang bertanggung jawab juga terus ditingkatkan.

Pencemaran limbah industri di perairan mangrove Surabaya memerlukan perhatian dan penanganan serius untuk memastikan pelestarian ekosistem mangrove yang berperan penting dalam perlindungan pesisir, penyediaan habitat bagi keanekaragaman hayati, dan sebagai penyangga ekonomi masyarakat sekitar.

2.2.. **Limbah Domestik**

Pencemaran limbah domestik di perairan Surabaya merupakan salah satu masalah lingkungan yang serius. Limbah domestik dapat mencakup limbah dari rumah tangga, perkantoran, dan fasilitas umum lainnya. Beberapa sumber pencemaran limbah domestik di perairan Surabaya meliputi:

- **Penggunaan Tanpa Pengelolaan Limbah Cair**

Banyak rumah tangga dan bangunan di sekitar perairan Surabaya yang tidak memiliki sistem pengelolaan limbah cair yang memadai. Limbah cair seperti air bekas cucian, kamar mandi, dan dapur seringkali langsung dibuang ke saluran air yang kemudian mengalir ke perairan.

- **Sistem Pembuangan Limbah Tidak Tertata**

Beberapa daerah di Surabaya mungkin masih menggunakan sistem pembuangan limbah yang tidak tertata dengan baik, seperti langsung menuju sungai atau saluran air tanpa melalui pengolahan terlebih dahulu.

- **Kurangnya Fasilitas Pengolahan Limbah**

Beberapa wilayah di Surabaya mungkin masih kurang memiliki fasilitas pengolahan limbah yang memadai. Hal ini dapat menyebabkan limbah domestik langsung mencemari perairan sekitarnya.

- Penggunaan Pupuk dan Pestisida di Perkotaan

Penggunaan pupuk dan pestisida di kebun, taman, atau lahan pertanian perkotaan juga dapat menjadi sumber pencemaran perairan jika tidak dikelola dengan baik dan berlebihan.

- Sampah Plastik dan Padat

Sampah plastik dan padat dari rumah tangga dan fasilitas umum juga dapat mencemari perairan jika tidak dikelola dengan baik. Sampah-sampah ini dapat terbawa air hujan ke sungai atau saluran air dan akhirnya sampai ke perairan.

Pencemaran limbah domestik ini dapat mengganggu ekosistem perairan Surabaya, mengurangi kualitas air, dan membahayakan kehidupan biota air dan masyarakat sekitarnya. Oleh karena itu, pengelolaan limbah domestik yang baik dan sistem pengolahan limbah yang memadai sangat penting untuk menjaga kebersihan dan kesehatan perairan Surabaya.

2.3.. Erosi dan Sedimentasi

Pembangunan yang tidak terkontrol di Surabaya dapat meningkatkan erosi dan sedimentasi, yang pada akhirnya mencemari perairan mangrove. Sedimentasi berlebih dapat mengurangi kualitas air dan mengganggu habitat biota mangrove. Erosi dan sedimentasi adalah masalah lingkungan lain yang mempengaruhi perairan Surabaya. Erosi adalah

Peran mikroba indigenous dalam bioremediasi

Suatu Teknologi Alternatif untuk Pelestarian Lingkungan di Perairan Mangrove

proses pengikisan tanah yang disebabkan oleh aliran air atau angin, sedangkan sedimentasi adalah penumpukan endapan tanah atau material lain di dasar perairan. Beberapa faktor yang menyebabkan erosi dan sedimentasi di Surabaya meliputi:

- Pembangunan Perkotaan yang Tidak Teratur

Perkotaan yang tidak teratur dapat mengganggu tata guna lahan dan aliran air, meningkatkan laju erosi tanah, dan mempercepat sedimentasi di perairan.

- Pemanfaatan Lahan yang Tidak Ramah Lingkungan

Penggunaan lahan yang tidak ramah lingkungan, seperti pertanian tanpa konservasi tanah yang baik, dapat meningkatkan risiko erosi dan sedimentasi.

- Kurangnya Pemeliharaan Saluran Air

Saluran air yang tidak dipelihara dengan baik dapat mengalami pendangkalan akibat endapan sedimentasi, yang dapat mengganggu aliran air dan meningkatkan risiko banjir.

- Aktivitas Konstruksi

Aktivitas konstruksi seperti pembangunan gedung, jalan raya, atau infrastruktur lainnya dapat menyebabkan penggalian tanah yang tidak terkontrol dan

meningkatkan laju erosi.

- Penebangan Hutan dan Vegetasi

Penebangan hutan dan vegetasi di sekitar perairan Surabaya dapat meningkatkan erosi tanah dan mengurangi kemampuan vegetasi untuk menahan erosi.

- Perubahan Iklim

Perubahan iklim dapat menyebabkan pola curah hujan yang tidak teratur, yang dapat meningkatkan risiko erosi dan sedimentasi di perairan Surabaya.

Erosi dan sedimentasi dapat menyebabkan berbagai dampak negatif, seperti pencemaran air, penurunan kualitas air, kerusakan habitat, dan bahkan banjir. Oleh karena itu, pengelolaan tata guna lahan yang baik, konservasi tanah, pemeliharaan saluran air, dan penghijauan dapat membantu mengurangi risiko erosi dan sedimentasi di Surabaya

2.4. Pencemaran Akibat Kegiatan Pelabuhan

Surabaya, dengan pelabuhannya yang sibuk, juga menghadapi risiko pencemaran akibat bocoran minyak dan bahan kimia dari kapal serta aktivitas bongkar muat yang dapat mencemari perairan mangrove.

Peran mikroba indigenus dalam bioremediasi
Suatu Teknologi Alternatif untuk Pelestarian Lingkungan di Perairan Mangrove



Bioremediasi

Bioremediasi merupakan suatu metode revitalisasi sebuah lahan dengan memanfaatkan kemampuan mikroorganisme untuk mereduksi polutan di lingkungan menjadi produk akhir yang tidak berbahaya. Bioremediasi mencakup semua proses biotransformasi suatu lingkungan yang telah berubah oleh kontaminan, seperti herbisida, insektisida, bahan kimia pembersih, bahan kimia yang digunakan dalam rantai makanan dan logam berat agar kembali pada kondisi aslinya. Dalam proses bioremediasi terdapat variasi yang digunakan, namun, prinsipnya sama, yaitu menggunakan mikroorganisme atau enzim mereka. Enzim-enzim yang dihasilkan memungkinkan dapat distimulasi dengan penambahan nutrisi atau optimalisasi kondisi, atau dapat disebarkan ke tanah untuk mengubah kontaminan menjadi zat yang dapat diserap dan digunakan oleh organisme autotrofik tanpa efek toksik pada mereka (Hawumbawa *et al.*, 2010).

Bioremediasi telah digunakan dalam pemulihan tanah dan air tanah yang terkontaminasi melalui: (a) stimulasi aktivitas mikroorganisme asli dengan penambahan nutrisi, pengaturan kondisi redoks, mengoptimalkan kondisi pH, (b) inokulasi situs oleh mikroorganisme dengan kemampuan biotransformasi spesifik, (c) aplikasi enzim amobil, dan (d)

penggunaan tanaman (fitoremediasi) untuk menghilangkan dan/atau mengubah polutan. Adapun jenis-jenis bioremediasi yaitu biostimulasi, bioaugmentasi dan bioremediasi intrinsik.

Biostimulasi adalah metode pemberian nutrisi dan oksigen dalam bentuk cair atau gas yang ditambahkan ke dalam air atau tanah tercemar untuk menyediakan nutrisi bagi pertumbuhan dan aktivitas bakteri yang telah ada di lingkungan tersebut. Bioaugmentasi merupakan penambahan mikroorganisme yang mampu mendegradasi polutan ke dalam air atau tanah yang tercemar. Sedangkan bioremediasi intrinsik tergolong metode remediasi yang terjadi secara alami di lingkungan air atau tanah yang tercemar. Dengan kata lain, sudah tersedia nutrisi untuk mendukung aktivitas mikroorganisme begitu pula keberadaan mikroorganisme itu sendiri secara alami (Brooker, 2008).

3.1. Strategi Bioremediasi dalam Mangrove

Bioremediasi merupakan salah satu metode yang dapat digunakan untuk mengatasi pencemaran lingkungan, termasuk di ekosistem mangrove. Berikut adalah beberapa strategi bioremediasi yang dapat diterapkan dalam mangrove:

- **Fitoremediasi** : Menggunakan tanaman untuk menyerap, mengakumulasi, dan mengurangi toksisitas zat pencemar dalam tanah atau air. Beberapa tanaman yang cocok untuk fitoremediasi di mangrove antara lain *Avicennia* spp. dan *Rhizophora* spp.

- Bioremediasi Bakteri : Menggunakan bakteri untuk mendegradasi zat pencemar dalam lingkungan mangrove. Bakteri yang umum digunakan adalah jenis yang dapat mendegradasi minyak, hidrokarbon, atau bahan kimia lainnya.
- Bioremediasi Mikroba Indigenus : Menggunakan mikroorganisme yang berasal dari lingkungan mangrove itu sendiri untuk menguraikan zat pencemar. Mikroba indigenus memiliki kemampuan yang baik untuk mendegradasi pencemar yang spesifik dalam ekosistem mangrove.
- Bioremediasi Fungsi Mangrove : Mengoptimalkan fungsi-fungsi alami dari ekosistem mangrove untuk mengatasi pencemaran, seperti pengikisan tanah (phytostabilization), penyerapan logam berat, dan penyaringan air.
- Bioremediasi Air : Menggunakan teknologi seperti wetland buatan (constructed wetland) yang menggunakan tanaman dan mikroorganisme untuk membersihkan air dari limbah organik dan bahan pencemar lainnya sebelum mencapai ekosistem mangrove.
- Bioaugmentasi : Menambahkan mikroorganisme yang telah dimodifikasi genetiknya untuk meningkatkan kemampuan bioremediasi dalam menguraikan zat pencemar tertentu.
- Biostimulation : Memberikan nutrisi atau kondisi lingkungan yang optimal bagi mikroorganisme yang ada di ekosistem mangrove agar dapat menguraikan zat pencemar dengan lebih efisien.

Peran mikroba indigenous dalam bioremediasi

Suatu Teknologi Alternatif untuk Pelestarian Lingkungan di Perairan Mangrove

- Phytostabilization : Menggunakan tanaman untuk mengurangi mobilitas logam berat dalam tanah, sehingga mencegah pencemaran lebih lanjut.

Strategi bioremediasi dalam mangrove haruslah diterapkan dengan hati-hati dan mempertimbangkan berbagai faktor seperti kondisi lingkungan, jenis pencemar, dan dampak terhadap ekosistem mangrove itu sendiri. Kombinasi beberapa metode bioremediasi yang sesuai dengan kondisi lokal dapat memberikan hasil yang optimal dalam mengatasi pencemaran di ekosistem mangrove.

3.2. Faktor-faktor yang berpengaruh dalam proses bioremediasi

Faktor-faktor yang mempengaruhi efektivitas proses bioremediasi adalah faktor lingkungan, fisik, dan kimia. Faktor lingkungan meliputi suhu, pH, ketersediaan oksigen, nutrisi, dan kelembapan. Faktor fisik terdiri atas ketersediaan air, kesesuaian jumlah mikroorganisme dengan senyawa pencemar, dan tersedianya akseptor yang sesuai. Sementara faktor kimia terdiri atas bentuk struktur kimia dari senyawa pencemar yang akan memengaruhi sifat fisik dan kimia pencemar tersebut (Eweis *et al.*, 1998).

a) Kadar Oksigen

Bakteri yang biasa digunakan untuk mendegradasi logam berat adalah bakteri aerob, yaitu bakteri yang

membutuhkan oksigen dalam aktivitasnya. Oksigen dalam tanah dapat diperoleh dari proses difusi antara udara dengan tanah. Oksigen ini mudah habis terutama jika jumlah mikroorganisme yang memanfaatkan oksigen tersebut sangat banyak sedangkan proses difusi sendiri membutuhkan waktu yang lama. Keterbatasan jumlah oksigen diperkirakan dapat menjadi faktor penghambat biodegradasi logam berat di bawah tanah (Nugroho, 2006). Pada proses pengolahan yang dilakukan secara aerob, pemberian oksigen (aerasi) perlu dilakukan dengan cara mengalirkan oksigen melalui pipa-pipa, pengadukan manual atau dengan alat berat (Kementerian Lingkungan Hidup, 2003). Kebutuhan oksigen juga dapat diperoleh melalui proses pengadukan dan pembalikan secara berkala yang bertujuan untuk menjaga suhu tanah tetap ideal serta untuk menghomogenitaskan campuran pada tanah (Thapa *et al.*, 2012).

b) Kadar Air

Kondisi tanah yang lembab mengakibatkan degradasi bakteri dapat optimal karena terpenuhinya nutrient dan substrat. Kelembaban ideal bagi pertumbuhan bakteri adalah 25-28% (Thapa *et al.*, 2012), sedangkan kelembaban optimum untuk bioremediasi tanah tercemar adalah sekitar 80% kapasitas lapang atau sekitar 15% air dari berat tanah. Ketika kelembaban tanah mencapai 70%, hal tersebut dapat mengganggu proses transfer

gas oksigen secara signifikan sehingga mengurangi aktivitas aerobik (Cookson, 1995). Selain itu, kadar air yang terkandung dalam tanah juga akan mempengaruhi keberadaan dan tingkat toksisitas kontaminan, transfer gas serta pertumbuhan dan distribusi dari mikroorganisme (Cookson, 1995).

c) Suhu

Suhu tanah dapat memberi efek pada aktivitas mikroorganisme dan laju biodegradasi kontaminan senyawa logam berat. Suhu optimum bagi hampir semua mikroorganisme tanah umumnya pada kisaran 10-40°C, walaupun ada beberapa yang dapat hidup hingga suhu 60°C (bakteri *termofilik*) (Retno dan Mulyana, 2013). Pada keadaan suhu rendah (< 5°C) maka akan memperlambat atau menghentikan proses biodegradasi (Antizar *et al.*, 2007).

d) pH

Nilai pH tanah berpengaruh pada kondisi optimum mikroorganisme pendegradasi karbon. Nilai pH akan mempengaruhi kemampuan mikroorganisme untuk menjalankan fungsi-fungsi sel, transpor sel membran maupun keseimbangan reaksi yang terkatalis oleh enzim (Notodarmojo, 2005). Pertumbuhan mikroorganisme akan meningkat apabila pH berada pada kisaran 6-9 (Eweis *et al.*, 1998).

e) Nutrient

Nutrisi merupakan faktor yang berpengaruh besar dalam sintesis dan pertumbuhan sel serta aktivitas enzim yang dihasilkan bakteri untuk mendegradasi polutan. Penambahan nutrisi juga diketahui dapat mempercepat pertumbuhan mikroba lokal yang terdapat pada daerah tercemar (Komarawidjaja and Lysiastuti, 2009). Beberapa nutrisi penting yang dibutuhkan mikroorganisme adalah karbon, nitrogen, dan fosfor (Wulan *et al.*, 2012).

Nutrisi yang paling sering ditambahkan untuk bioremediasi adalah nitrogen. Nitrogen biasanya ditambahkan sebagai sumber nitrogen untuk pertumbuhan sel, tetapi juga dapat berfungsi sebagai akseptor elektron alternatif. Sebagai sumber nutrisi, nitrogen biasanya ditambahkan dalam bentuk urea atau garam amonia (Cookson, 1995). Kandungan unsur N yang tinggi akan meningkatkan emisi dari nitrogen sebagai amonium sehingga dapat menghalangi perkembangbiakan dari bakteri. Sebaliknya jika kandungan unsur N relatif rendah maka akan menyebabkan proses degradasi berlangsung lebih lambat karena nitrogen akan menjadi faktor penghambat (*growth-rate limiting factor*) (Alexander, 1994). Untuk mengatasi keterbatasan nitrogen dan fosfor di dalam tanah dapat diatasi dengan penambahan pupuk NPK, garam amonium dan garam fosfat (Nugroho, 2006).

3.3. Keuntungan dan Tantangan Bioremediasi

Bioremediasi adalah proses menggunakan organisme hidup untuk menghilangkan atau mengurangi kontaminan dari lingkungan. Dalam konteks perairan mangrove, bioremediasi dapat menjadi pilihan yang menarik karena mangrove memiliki kemampuan alami untuk menyerap dan mengakumulasi polutan dari air dan lumpur.

3.4. Keuntungan Bioremediasi pada Perairan Mangrove:

- a) Ramah lingkungan: Bioremediasi menggunakan organisme hidup yang tidak berbahaya bagi lingkungan, sehingga lebih ramah lingkungan dibandingkan dengan metode remediasi kimia.
- b) Biaya rendah: Bioremediasi seringkali lebih ekonomis daripada metode remediasi kimia atau fisik lainnya.
- c) Mempertahankan ekosistem: Proses bioremediasi dapat membantu mempertahankan keanekaragaman hayati dan fungsi ekosistem mangrove.
- d) Berkelanjutan: Bioremediasi dapat menjadi solusi berkelanjutan untuk mengatasi pencemaran perairan mangrove jika dilakukan dengan benar.

3.5. Tantangan Bioremediasi pada Perairan Mangrove:

- a) Keterbatasan informasi: Masih kurangnya informasi mengenai organisme yang dapat efektif dalam bioremediasi perairan mangrove.
- b) Waktu yang dibutuhkan: Proses bioremediasi membutuhkan waktu yang relatif lama untuk menghilangkan kontaminan secara efektif.
- c) Pengaruh cuaca dan kondisi lingkungan: Faktor-faktor seperti curah hujan, suhu, dan salinitas air dapat mempengaruhi efektivitas bioremediasi.
- d) Pemantauan yang intensif: Proses bioremediasi memerlukan pemantauan yang intensif untuk memastikan organisme bioremediasi berfungsi dengan baik dan tidak menimbulkan dampak negatif.

Dengan memperhitungkan keuntungan dan tantangan ini, bioremediasi tetap menjadi pilihan yang menarik untuk mengatasi pencemaran perairan mangrove, terutama jika dilakukan dengan pendekatan yang hati-hati dan terencana.

Peran mikroba indigenus dalam bioremediasi
Suatu Teknologi Alternatif untuk Pelestarian Lingkungan di Perairan Mangrove

Bakteri Indigenus

4.1. Bakteri Indigenus

Bakteri indigenus merupakan kelompok bakteri asli atau pribumi yang mendiami suatu lingkungan tertentu serta mampu beradaptasi dengan memanfaatkan berbagai nutrisi yang ada dan mengkonversinya menjadi sumber energi untuk tumbuh dan bereproduksi (Yazid, 2014). Kelompok bakteri ini mayoritas dieksplor dan dipergunakan sebagai komponen bioremediator suatu lahan yang tercemar ataupun suatu bahan yang bersifat resistan dan sulit untuk terdegradasi.



Gambar 1. Isoalt bakteri Indegenous

Secara umum ada beberapa cara mikroba untuk mengurangi bahaya pencemaran logam berat yaitu: detoksifikasi (biopresipitasi), *biohidrometalurgi*, *bioleaching*, dan

Peran mikroba indigenus dalam bioremediasi

Suatu Teknologi Alternatif untuk Pelestarian Lingkungan di Perairan Mangrove

bioakumulasi (Mallick and Rai, 1994). Pada saat logam berat di suspensikan (*mixing*) dengan suatu isolat mikroba, maka akan terbentuk suatu ligand kompleks yang bervariasi (Hussein *et al*, 2001). Ada dua fase pengikatan logam berat oleh bakteri, yaitu fase pengikatan dan transport aktif. Fase pengikatan terjadi di dinding sel dan fase transport aktif terjadi di bagian internal sel (Oktaviana, 1995). Beberapa bakteri telah diuji dan telah diketahui bahwa memiliki potensi untuk melakukan bioremediasi terhadap logam berat dengan cara melakukan degradasi logam. Adapun beberapa bakteri yang dapat mengikat logam berat adalah *Thiobacillus ferrooxidans*, *Bacillus cereus*, *Oogloea sp.*, *Citrobacter sp* (Gadd, 1992), *Micrococcus*, *Corynebacterium*, *Phenylobacterium*, *Enhydrobacter*, *Flavobacterium* (Wulandari, 2005).

Mikroba indigenus, atau mikroba asli yang ada secara alami di lingkungan tertentu, memainkan peran penting dalam bioremediasi. Mereka memiliki kemampuan untuk mendegradasi atau menghilangkan polutan secara alami karena telah beradaptasi dengan lingkungan tersebut. Berikut adalah beberapa peran utama mikroba indigenus dalam bioremediasi:

- Degradasi polutan : Mikroba indigenus dapat menghasilkan enzim dan metabolit yang dapat mendegradasi polutan seperti minyak, logam berat, dan senyawa organik berbahaya lainnya menjadi bentuk yang lebih aman atau tidak berbahaya.

- Biostimulasi : Mikroba indigenus dapat digunakan untuk merangsang pertumbuhan mikroba lain yang lebih efektif dalam mendegradasi polutan. Hal ini dapat dilakukan dengan memberikan nutrisi tambahan atau kondisi lingkungan yang mendukung pertumbuhan mikroba tersebut.
- Biodegradasi senyawa kompleks : Beberapa polutan, seperti hidrokarbon aromatik polisiklik (PAH) atau senyawa organik lain yang kompleks, sulit untuk diuraikan oleh mikroba non-indigenus. Mikroba indigenus cenderung lebih efektif dalam mendegradasi senyawa-senyawa ini karena telah beradaptasi dengan kondisi lingkungan yang khas.
- Stabilisasi logam berat : Mikroba indigenus juga dapat membantu dalam mengurangi toksisitas logam berat dengan mengubahnya menjadi bentuk yang kurang berbahaya atau stabil.
- Resistensi terhadap kondisi lingkungan yang ekstrem : Mikroba indigenus sering kali telah berkembang untuk bertahan hidup dalam kondisi lingkungan yang ekstrem, seperti tingginya salinitas atau suhu yang tinggi, sehingga mereka dapat tetap aktif dalam mengatasi pencemaran bahkan dalam kondisi lingkungan yang tidak mendukung.

Dengan memahami peran mikroba indigenus, kita dapat mengembangkan strategi bioremediasi yang lebih efektif dan berkelanjutan dengan memanfaatkan potensi mikroba yang sudah ada secara alami di lingkungan tersebut.

4.2. Isolasi dan Identifikasi Mikroba

Isolasi dan identifikasi mikroba indigenus dari perairan mangrove merupakan langkah penting dalam memahami potensi mikroba untuk bioremediasi dan pemulihan lingkungan. Berikut adalah teknik umum yang digunakan untuk isolasi dan identifikasi mikroba indigenus pada perairan mangrove:

a) Pengambilan Sampel

- Pilih lokasi sampling yang representatif dari perairan mangrove yang ingin diteliti.
- Ambil sampel air, lumpur, atau akar mangrove dengan menggunakan alat yang steril untuk menghindari kontaminasi.

b) Isolasi Mikroba

- Dilakukan dengan cara menumbuhkan mikroba dari sampel di media pertumbuhan yang sesuai, seperti agar atau cairan nutrien.
- Pengenceran sampel mungkin diperlukan untuk memisahkan mikroba satu sama lain.

c) Purifikasi Kultur

- Pilih koloni tunggal yang muncul dari media pertumbuhan untuk menghasilkan kultur murni.
- Lakukan subkultur berulang kali jika diperlukan untuk memastikan kemurnian kultur.

d) Identifikasi Mikroba

- Identifikasi mikroba dapat dilakukan menggunakan berbagai metode, termasuk mikroskopi, uji biokimia, dan analisis molekuler.
- Mikroskopi digunakan untuk mengamati morfologi sel dan struktur koloni mikroba.

- Uji biokimia seperti uji fermentasi gula, oksidase, katalase, dll., dapat memberikan informasi tentang karakteristik metabolik mikroba.
 - Analisis molekuler, seperti PCR dan sekuensing DNA, digunakan untuk identifikasi genetik yang lebih spesifik.
- e) Analisis Fungsional
- Setelah identifikasi, dilakukan uji fungsional untuk memahami kemampuan mikroba dalam mendegradasi polutan atau berinteraksi dengan lingkungan.
 - Uji ini melibatkan penempatan mikroba dalam kondisi laboratorium yang mengandung polutan tertentu untuk melihat responsnya.
- f) Pemantauan dan Karakterisasi Lanjutan
- Pemantauan terus-menerus diperlukan untuk memahami peran mikroba dalam bioremediasi perairan mangrove.
 - Karakterisasi lebih lanjut dapat dilakukan untuk memahami ekofisiologi mikroba, interaksi antarjenis, dan adaptasi terhadap kondisi lingkungan yang berubah

Proses isolasi dan identifikasi mikroba indigenus pada perairan mangrove memerlukan kombinasi keterampilan teknis, pengetahuan ekologi mikroba, dan penggunaan metode analisis yang tepat untuk memahami potensi bioremediasi dan konservasi lingkungan.

Peran mikroba indigenus dalam bioremediasi
Suatu Teknologi Alternatif untuk Pelestarian Lingkungan di Perairan Mangrove



Interaksi Mikroba Indigenus dengan Lingkungan Mangrove

Interaksi mikroba indigenus dengan lingkungan mangrove sangat kompleks dan penting dalam menjaga keseimbangan ekosistem mangrove. Berikut adalah beberapa interaksi utama antara mikroba indigenus dan lingkungan mangrove:

- **Dekomposisi Bahan Organik** : Mikroba indigenus memainkan peran kunci dalam dekomposisi bahan organik, seperti daun mangrove yang gugur dan akar yang mati. Proses ini penting untuk sirkulasi nutrisi dalam ekosistem mangrove dan menyediakan sumber makanan bagi organisme lainnya.
- **Siklus Nutrien** : Mikroba indigenus berperan dalam siklus nutrisi, seperti siklus nitrogen dan fosfor. Mereka dapat melakukan fiksasi nitrogen, mengubah nitrogen atmosfer menjadi bentuk yang dapat digunakan oleh tanaman dan organisme lainnya. Selain itu, mikroba juga memainkan peran dalam mineralisasi fosfor dan siklus unsur hara lainnya.
- **Simbiosis dengan Tanaman Mangrove** : Beberapa mikroba indigenus membentuk hubungan simbiotik dengan akar tanaman mangrove. Misalnya, bakteri rhizosfer dan mikoriza arbuskular dapat meningkatkan penyerapan nutrisi oleh tanaman, sementara bakteri pengikat nitrogen membantu meningkatkan ketersediaan nitrogen.
- **Pertahanan Terhadap Stres Lingkungan** : Mikroba indigenus dapat membantu tanaman mangrove dalam mengatasi stres

Peran mikroba indigenus dalam bioremediasi

Suatu Teknologi Alternatif untuk Pelestarian Lingkungan di Perairan Mangrove

lingkungan, seperti kekeringan, salinitas tinggi, dan kelebihan logam berat. Mereka dapat menghasilkan senyawa antimikroba, enzim antioksidan, dan lain-lain untuk meningkatkan ketahanan tanaman terhadap stres.

- **Penyediaan Energi** : Beberapa mikroba indigenus terlibat dalam proses fotosintesis bakteri atau oksidasi senyawa organik, yang menghasilkan energi yang dapat dimanfaatkan oleh organisme lain dalam ekosistem mangrove.
- **Bioremediasi Polutan** : Mikroba indigenus memiliki kemampuan untuk mendegradasi polutan yang masuk ke dalam ekosistem mangrove, baik dari sumber alami maupun aktivitas manusia. Mereka dapat menguraikan senyawa kimia berbahaya seperti hidrokarbon dan logam berat, membantu membersihkan lingkungan mangrove dari pencemaran.

Pada peran bioremediasi polutan Bioremediasi polutan mangrove dengan bantuan mikroba adalah metode yang menjanjikan untuk membersihkan lingkungan mangrove dari kontaminan berbahaya. Mikroba memiliki kemampuan untuk mendegradasi polutan organik maupun anorganik menjadi senyawa yang kurang berbahaya atau tidak berbahaya sama sekali. Berikut adalah langkah-langkah umum dalam bioremediasi polutan mangrove dengan bantuan mikroba:

- Penentuan Jenis Polutan dan Tingkat Kontaminasi:
- Pemilihan Mikroba Indigenus yang Cocok
- Persiapan Mikroba dan Penambahan ke Lingkungan
- Monitor dan Evaluasi
- Pemantauan Jangka Panjang
- Pemulihan Lingkungan
- Pemantauan Pasca-Bioremediasi

Bioremediasi polutan mangrove dengan bantuan mikroba dapat menjadi solusi yang ramah lingkungan dan berkelanjutan untuk membersihkan lingkungan yang tercemar dan memulihkan ekosistem mangrove yang penting. Diperlukan perencanaan dan pelaksanaan yang cermat untuk memastikan keberhasilan dan keberlanjutan dari metode ini.

5.1. Adaptasi Mikroba Terhadap Kondisi Lingkungan di Mangrove

Adaptasi mikroba terhadap kondisi lingkungan mangrove adalah proses penting yang memungkinkan mikroba untuk bertahan hidup dan berkembang biak di lingkungan yang unik ini. Lingkungan mangrove merupakan wilayah perbatasan antara daratan dan laut yang dipengaruhi oleh pasang surut air laut, kadar garam yang tinggi, dan kondisi tanah yang sering kali kurang oksigen. Berikut adalah beberapa contoh adaptasi mikroba terhadap kondisi lingkungan mangrove:

- a) Toleransi terhadap kadar garam yang tinggi : Mikroba di lingkungan mangrove telah mengembangkan mekanisme untuk bertahan hidup dalam konsentrasi garam yang tinggi. Beberapa mikroba memiliki struktur sel yang kuat dan mampu mengatur keseimbangan ion di dalam sel mereka untuk mengatasi tekanan osmotik yang dihasilkan oleh kadar garam yang tinggi.
- b) Adaptasi terhadap kondisi tanah yang kurang oksigen : Lingkungan tanah mangrove seringkali memiliki kadar oksigen yang rendah karena pembatasan aliran

Peran mikroba indigenous dalam bioremediasi

Suatu Teknologi Alternatif untuk Pelestarian Lingkungan di Perairan Mangrove

udara oleh akar mangrove dan penumpukan bahan organik yang cepat terdekomposisi. Mikroba di lingkungan ini telah mengembangkan kemampuan untuk menggunakan sumber energi alternatif, seperti fermentasi anaerobik, untuk mengatasi kondisi tanpa oksigen.

- c) Kemampuan untuk mendekomposisi bahan organik yang sulit terurai : Mikroba di lingkungan mangrove telah mengembangkan enzim dan mekanisme lain untuk mendekomposisi bahan organik yang sulit terurai, seperti lignin dan selulosa dari tumbuhan mangrove yang jatuh. Ini membantu dalam daur ulang nutrisi dan mempertahankan produktivitas ekosistem mangrove.
- d) Symbiosis dengan tanaman mangrove** : Beberapa mikroba membentuk hubungan simbiotik dengan tanaman mangrove, seperti mikoriza arbuskula yang membantu meningkatkan penyerapan nutrisi oleh tanaman. Symbiosis ini memberikan manfaat bagi kedua belah pihak dan membantu tanaman mangrove bertahan hidup di lingkungan yang keras.

Adaptasi ini menunjukkan betapa pentingnya peran mikroba dalam menjaga keseimbangan ekosistem mangrove dan memberikan dukungan bagi kehidupan beragam organisme lain di ekosistem tersebut. Sedangkan pola-pola mikroba dalam bioremediasi dapat bervariasi tergantung pada jenis

kontaminan, kondisi lingkungan, dan strategi yang digunakan. Berikut ini adalah beberapa pola umum yang terlihat dalam penggunaan mikroba untuk bioremediasi:

- a) Degradasi Hidrokarbon : Beberapa mikroba, seperti bakteri *Pseudomonas*, *Alcanivorax*, dan fungi dari genus *Aspergillus*, memiliki kemampuan untuk mendegradasi hidrokarbon, yang merupakan komponen utama dalam polusi minyak dan bahan bakar fosil. Mereka melakukan ini dengan menggunakan hidrokarbon sebagai sumber energi dan karbon, mengubahnya menjadi CO₂, air, dan biomassa.
- b) Bioremediasi Logam Berat : Mikroba seperti bakteri dan beberapa jenis fungi dapat mengimobilisasi atau mengubah logam berat menjadi bentuk yang kurang toksik. Bakteri seperti species dari *Bacillus* dan *Pseudomonas* dapat mengubah merkuri, kromium, dan timbal, mengurangi toksisitasnya melalui proses seperti presipitasi, reduksi, atau volatilisasi.
- c) Pengolahan Limbah Radioaktif : Beberapa mikroba memiliki kemampuan untuk mengurangi radioaktivitas dengan cara mengubah bentuk fisik atau kimia dari isotop radioaktif. Misalnya, bakteri dari genus *Deinococcus* dan *Shewanella* dapat mengurangi uranium dan teknisium dari bentuk yang larut dan lebih berbahaya menjadi bentuk yang tidak

larut dan lebih stabil.

- d) **Phytoremediation** : Meskipun bukan mikroba, tanaman yang bekerja sama dengan mikroba tertentu (seperti mikoriza dan bakteri rhizosfer) dapat digunakan untuk bioremediasi. Tanaman ini menyerap kontaminan dari tanah dengan bantuan mikroba, yang kemudian dapat mendegradasi, mengimobilisasi, atau menyimpan kontaminan.
- e) **Bioremediasi Senyawa Organik Polutan** : Mikroba dapat digunakan untuk mendegradasi berbagai polutan organik, seperti pestisida, pelarut organik, dan bahan kimia industri. Bakteri dari genus *Rhodococcus*, misalnya, dikenal karena kemampuannya yang luas dalam mendegradasi berbagai jenis polutan organik.
- f) **Biostimulasi dan Bioaugmentasi** : Dua strategi utama dalam bioremediasi adalah biostimulasi, yang melibatkan penambahan nutrisi atau oksigen untuk merangsang aktivitas mikroba endogen yang dapat mendegradasi polutan, dan bioaugmentasi, yang melibatkan penambahan mikroba eksogen yang telah diadaptasi atau direkayasa untuk mendegradasi kontaminan secara efisien.

Pola-pola mikroba dalam bioremediasi menunjukkan potensi besar mikroorganisme dalam mengatasi masalah polusi dan kontaminasi. Namun, efektivitas bioremediasi bergantung pada pemahaman mendalam tentang ekologi mikroba,

genetika, dan biokimia proses degradasi, serta desain strategi yang tepat untuk kondisi spesifik kontaminasi.

Implementasi bioremediasi dalam konservasi mangrove adalah strategi penting untuk mengatasi polusi dan memperbaiki ekosistem mangrove yang terdegradasi. Mangrove, yang berfungsi sebagai penyangga antara darat dan laut, sering kali terpapar berbagai jenis polutan, seperti limbah industri, pertanian, dan minyak bumi. Bioremediasi di ekosistem mangrove melibatkan penggunaan mikroorganisme untuk mengurai atau menetralkan kontaminan ini, sehingga memperbaiki kualitas lingkungan dan mendukung keberlangsungan ekosistem mangrove. Berikut adalah beberapa cara implementasi bioremediasi dalam konservasi mangrove:

5.2. Bioremediasi Polusi Minyak

Mikroba tertentu memiliki kemampuan untuk mendegradasi hidrokarbon yang ditemukan dalam tumpahan minyak. Dalam ekosistem mangrove yang terkontaminasi minyak, teknik ini dapat diterapkan untuk mempercepat pemulihan. Mikroba pengurai minyak diperkenalkan atau dikondisikan untuk berkembang biak dalam area yang terkontaminasi, dimana mereka mengurai hidrokarbon menjadi senyawa yang lebih aman.

Implementasi bioremediasi untuk mengatasi polusi minyak, khususnya dalam konteks konservasi mangrove, merupakan

Peran mikroba indigenous dalam bioremediasi

Suatu Teknologi Alternatif untuk Pelestarian Lingkungan di Perairan Mangrove

strategi penting yang bertujuan untuk memulihkan ekosistem mangrove yang telah terkontaminasi oleh tumpahan minyak. Mangrove memiliki peran ekologis yang sangat penting, termasuk melindungi garis pantai dari erosi, menyediakan habitat bagi kehidupan liar, dan menyimpan karbon. Namun, polusi minyak dapat merusak ekosistem mangrove dengan mengganggu fotosintesis pada tanaman mangrove, meracuni fauna yang bergantung pada habitat tersebut, dan mengganggu proses-proses mikrobiologis.

Strategi Bioremediasi untuk Mangrove

- a) Biostimulasi : Proses ini melibatkan penambahan nutrien ke lingkungan yang terkontaminasi untuk merangsang aktivitas mikroba alami yang mampu mendegradasi hidrokarbon minyak. Di ekosistem mangrove, biostimulasi harus dilakukan dengan hati-hati untuk menghindari eutrofikasi, yang dapat menyebabkan pertumbuhan alga berlebih dan merusak lingkungan lebih lanjut.
- b) Bioaugmentasi : Bioaugmentasi melibatkan pengenalan mikroba tertentu yang telah diidentifikasi memiliki kapasitas tinggi dalam mendegradasi hidrokarbon ke dalam area yang terkontaminasi. Mikroba ini bisa berasal dari lokasi lain atau dikembangkan di laboratorium untuk meningkatkan efisiensi degradasi minyak.
- c) Fitoremediasi : Memanfaatkan tanaman mangrove

dan tanaman lain yang mampu bertoleransi terhadap hidrokarbon dan membantu dalam proses degradasi. Akar tanaman bisa menyediakan oksigen, yang meningkatkan aktivitas mikroba pengurai minyak, dan beberapa tanaman dapat menyerap polutan melalui akarnya.

- d) Teknik Kombinasi : Pendekatan terintegrasi yang menggunakan kombinasi dari biostimulasi, bioaugmentasi, dan fitoremediasi seringkali lebih efektif. Pendekatan ini dapat disesuaikan dengan kondisi spesifik dari ekosistem mangrove yang terkontaminasi.

5.3. Pertimbangan Penting dalam Implementasi

- a) Analisis Situs : Memahami tingkat dan jenis kontaminasi, serta karakteristik ekosistem mangrove, adalah langkah penting sebelum memulai proses bioremediasi.
- b) Pemilihan Mikroba : Mikroba yang digunakan harus efisien dalam mendegradasi jenis hidrokarbon yang spesifik dan cocok dengan kondisi lingkungan setempat.
- c) Pemantauan dan Evaluasi : Proses bioremediasi harus dipantau secara teratur untuk menilai efektivitasnya dan melakukan penyesuaian jika diperlukan
- d) Perlindungan Biodiversitas : Menghindari penggunaan mikroba atau tanaman yang dapat menjadi invasif atau merusak keanekaragaman hayati setempat.

Implementasi bioremediasi dalam konservasi mangrove membutuhkan pendekatan yang hati-hati dan terencana untuk memastikan bahwa upaya pemulihan tidak hanya efektif dalam mengurangi polusi minyak tetapi juga mendukung pemulihan dan pelestarian ekosistem mangrove yang berharga.

Pengolahan Limbah Pertanian dan Industri

Limbah yang mengandung pestisida, herbisida, logam berat, dan bahan kimia industri lainnya dapat merusak ekosistem mangrove. Penggunaan mikroba yang dapat mengurai atau mengubah bentuk kontaminan ini menjadi kurang berbahaya dapat membantu dalam membersihkan area mangrove dari polutan tersebut.

Pemulihan Tanah dan Air

Bioremediasi juga melibatkan pemulihan kualitas tanah dan air dalam ekosistem mangrove yang telah terdegradasi oleh akumulasi bahan organik beracun atau kelebihan nutrisi. Mikroba dapat membantu dalam mengurai bahan organik tersebut dan mengurangi eutrofikasi, proses yang dapat menyebabkan pertumbuhan berlebih dari alga yang mengganggu keseimbangan ekosistem.

Peningkatan Penyerapan Karbon

Mangrove merupakan salah satu ekosistem dengan tingkat penyerapan karbon yang tinggi. Melalui proses bioremediasi, dapat dilakukan peningkatan kesehatan ekosistem mangrove

yang secara tidak langsung meningkatkan kemampuannya dalam menyerap dan menyimpan karbon, membantu dalam mitigasi perubahan iklim.

Strategi Implementasi

- a) Pemilihan Mikroba Spesifik : Mengidentifikasi dan menggunakan mikroba yang paling efektif dalam mendegradasi jenis polutan tertentu di ekosistem mangrove.
- b) Monitoring dan Evaluasi : Melakukan pemantauan berkala terhadap efektivitas bioremediasi dan kondisi ekologis mangrove untuk menyesuaikan strategi jika diperlukan.
- c) Pendekatan Terintegrasi : Menggabungkan bioremediasi dengan strategi konservasi lainnya, seperti reboisasi mangrove dan pengelolaan sumber daya air, untuk pemulihan ekosistem yang lebih komprehensif.

Implementasi bioremediasi dalam konservasi mangrove menawarkan pendekatan yang ramah lingkungan dan berkelanjutan untuk mengatasi masalah polusi dan degradasi ekosistem. Dengan memanfaatkan kemampuan alami mikroba, dapat dilakukan pemulihan dan pelestarian ekosistem mangrove yang vital bagi kesehatan lingkungan global.

Peran mikroba indigenus dalam bioremediasi
Suatu Teknologi Alternatif untuk Pelestarian Lingkungan di Perairan Mangrove



Kesimpulan

Buku tentang peran mikroba indigenous dalam bioremediasi perairan mangrove memberikan wawasan mendalam tentang bagaimana organisme mikroskopis yang berasal dari lingkungan mangrove dapat memainkan peran krusial dalam mengurangi polusi dan memulihkan kesehatan ekosistem perairan mangrove. Melalui eksplorasi teoritis dan praktis, buku ini mengungkapkan potensi besar yang dimiliki oleh mikroba indigenous dalam proses bioremediasi, menawarkan solusi yang berkelanjutan dan efektif untuk mengatasi berbagai bentuk pencemaran yang mengancam ekosistem mangrove.

Kesimpulan utama yang dapat diambil dari buku ini meliputi:

- a) **Peran Vital Mikroba Indigenous** : Mikroba indigenous, termasuk bakteri, fungi, dan mikroalga, memiliki peran penting dalam ekosistem mangrove, terutama dalam mendegradasi polutan organik dan anorganik, seperti hidrokarbon, logam berat, dan nutrisi berlebih. Mereka secara alami menyesuaikan diri dengan kondisi ekstrem ekosistem mangrove, membuat mereka sangat efektif dalam proses bioremediasi.

- b) Mekanisme Bioremediasi :** Buku ini menjelaskan secara rinci berbagai mekanisme bioremediasi yang digunakan oleh mikroba indigenus, termasuk biodegradasi, bioakumulasi, biotransformasi, dan fitoremediasi. Mekanisme-mekanisme ini berkontribusi pada pengurangan konsentrasi polutan dalam ekosistem mangrove, mendukung pemulihan dan pelestarian lingkungan.
- c) Strategi Implementasi Bioremediasi :** Buku ini menyediakan panduan tentang bagaimana teknik bioremediasi dapat diterapkan secara efektif dalam konservasi mangrove, termasuk seleksi strain mikroba yang tepat, metode aplikasi, dan pemantauan hasil bioremediasi. Penekanan diberikan pada pendekatan terintegrasi yang melibatkan komunitas lokal, pemerintah, dan sektor swasta.
- d) Tantangan dan Peluang :** Meskipun mikroba indigenus menawarkan solusi yang menjanjikan untuk bioremediasi ekosistem mangrove, terdapat tantangan, seperti variabilitas kondisi lingkungan, skala waktu bioremediasi, dan kebutuhan akan penelitian lebih lanjut untuk memahami interaksi kompleks dalam ekosistem mangrove. Namun, potensi untuk inovasi dan aplikasi teknologi baru dalam bioremediasi menawarkan peluang signifikan untuk peningkatan efektivitas di masa depan.

e) Pentingnya Konservasi Mangrove dan Bioremediasi

: Akhirnya, buku ini menegaskan kembali pentingnya ekosistem mangrove bagi kesehatan lingkungan global dan peran kritis bioremediasi dalam menjaga keberlanjutan ekosistem ini. Melalui penggunaan mikroba indigenus, kita dapat mengambil langkah penting menuju pemulihan dan pelestarian mangrove, yang pada gilirannya mendukung keanekaragaman hayati, perlindungan terhadap erosi pantai, dan mitigasi perubahan iklim.

Secara keseluruhan, buku ini menawarkan pandangan yang komprehensif dan optimis tentang potensi bioremediasi yang dipimpin oleh mikroba indigenus dalam menjaga dan memulihkan ekosistem mangrove yang sehat, menekankan pentingnya penelitian, kolaborasi, dan implementasi strategi yang inovatif dan berkelanjutan.

Peran mikroba indigenus dalam bioremediasi
Suatu Teknologi Alternatif untuk Pelestarian Lingkungan di Perairan Mangrove



Daftar Pustaka

- Agustien, A., Mifhahul J. and Akmal D. 2016. Screening Polyethylene Synthetic Plastic Degrading-Bacteria from Soil. *Der Pharmacia Lettre*, 8 (7): 183 – 187.
- Arora, P.K., Ashutosh S. and Hanhong Bae. 2015. Review article: Microbial Degradation of Indole and Its Derivatives. *Journal of Chemistry*, Vol. 2015. 1 – 13.
- Arutchelvi, J., Ambika A., Mukesh D., Sumit B. dan Parasu V.U. 2008. Biodegradation of Polyethylene and Polypropylene. *Indian Journal of Biotechnology*. 7:9 – 22.
- Aryal, Sagar. 2014. Differences between Gram Positive and Gram Negative Bacteria. <http://www.microbiologyinfo.com/differences-between-gram-positive-and-gram-negative-bacteria/>. Dibuka pada tanggal 4 Juni 2017.
- Asmita, K., Tanwar S. dan Shanbhag T. 2015. Isolation of Plastic Degrading Micro-organisms from Soil Samples Collected at Various Locations in Mumbai, India. *International Research Journal of Environment Sciences*. 4(3): 77 – 85.
- BCI Central. 2022. Plastik Sebagai Bagian Dari Konstruksi Berkelanjutan. <https://www.constructionplusasia.com/id/plastik-sebagai-bagian-dari-konstruksi-berkelanjutan/>. Diakses pada tanggal 10 Juli 2023.
- Charkoudian, Louise K. Jay T. Fitzgerald, Chaitan Khosla and Andrea Champlin. 2010. In *Living Color: Bacterial Pigments as an Untapped Resource in the Classroom and Beyond*. *PLOS Biology* 8(10): 1 – 6.

Peran mikroba inogenous dalam bioremediasi

Suatu Teknologi Alternatif untuk Pelestarian Lingkungan di Perairan Mangrove

- Daily, Investor. 2016. Banjir Impor, Investasi Kendur. <http://www.kemenperin.go.id/artikel/6316/Banjir-Impor,-Investasi-Kendur>. Dibuka tanggal 20.10.2016.
- Devi, R.S., Velu R.K., Krishnan N., Duraisamy N., Kanthaiah K., Sekar C. dan Arokiaswamy R.A. 2015. The Role of Microbes in Plastic Degradation, dalam Buku Environmental Waste Management (Chandra, R., 2015), pp 341 – 370. CRC Press. India.
- Eriksen, M., Laurent C.M.L., Henry S.C., Martin T., Charles J.M., Jose C.B., Francois G., Peter G.R. dan Julia R. 2014. Plastic Pollution in the World's Oceans: More than 5 Trillion Plastic Pieces Weighing over 250,000 Tons Afloat at Sea. Plos One. 10: 1 – 15.
- Fadlilah, Fiki Rahmah dan Maya Shovitri. 2014. Potensi Isolat Bakteri Bacillus dalam Mendegradasi Plastik dengan Metode Kolom Winogradsky. Jurnal Teknik Pomits. 3(2): 40 – 43.
- Julina, S., Bakri, U. S., Syam, S., Indrianti, L., & Aishy, D. (2022). Penyuluhan Prinsip 4 R Untuk Menangani Sampah Plastik Di Perumnas Suradita Cisauk Tangerang, Banten. Jurnal Pulomas-Jurnal Pengabdian untuk Loyalitas Kemasyarakatan, 1(1), 13-29.
- Marjayandari, L., & Shovitri, M. (2016). Potensi Bakteri Bacillus sp. dalam Mendegradasi Plastik. Jurnal Sains dan Seni ITS, 4(2).
- Martinez, Priscilla. 2015. Soil Sample Pseudomonas aeruginosa. https://microbewiki.kenyon.edu/index.php/Soil_Sample_Pseudomonas_aeruginosa. Dibuka pada tanggal 4 Juni 2017.
- Panjaitan, F. J., Bachtiar, T., Arsyad, I., Lele, O. K., & Indriyani, W. (2020). Karakterisasi mikroskopis

- dan uji biokimia bakteri pelarut fosfat (bpf) dari rhizosfer tanaman jagung fase vegetatif. *CIWAL (Jurnal Ilmu Pertanian dan Lingkungan)*, 1(1), 9-17.
- Permatasari, D. R., & Radityaningrum, A. D. (2020, September). Kajian Keberadaan Mikroplastik Di Wilayah Perairan. In *Prosiding Seminar Nasional Sains dan Teknologi Terapan (Vol. 1, No. 1, pp. 499-506)*.
- Puiggené, Ò., Espinosa, M. J. C., Schlosser, D., Thies, S., Jehmlich, N., Kappelmeyer, U., ... & Eberlein, C. (2022). Extracellular degradation of a polyurethane oligomer involving outer membrane vesicles and further insights on the degradation of 2, 4-diaminotoluene in *Pseudomonas capeferrum* TDA1. *Scientific Reports*, 12(1), 2666.
- Riandi, M. I., Kawuri, R., & Sudirga, S. K. (2017). Potensi Bakteri *Pseudomonas* sp. dan *Ochrobactrum* sp. yang di Isolasi dari Berbagai Sampel Tanah Dalam Mendegradasi Limbah Polimer Plastik Berbahan Dasar High Density Polyethylene (HDPE) dan Low Density Polyethylene. *Jurnal Simbiosis*, 2, 58-63.
- Rochman, C. M., Browne, M. A., Underwood, A. J., Van Franeker, J. A., Thompson, R. C., & Amaral-Zettler, L. A. (2016). The ecological impacts of marine debris: unraveling the demonstrated evidence from what is perceived. *Ecology*, 97(2), 302-312.
- Sagel, Esteban. 2012. Polyethylene Global Overview. Makalah dipresentasikan pada Forum PeMex Ciudad de Mexico, Juni 2012. Mexico. pp 1 - 31.
- Sari, D. P., Amir, H., & Elvia, R. (2020). Isolasi bakteri dari tanah tempat pembuangan akhir (TPA) air sebakul sebagai agen biodegradasi limbah plastik polyethylene. *ALOTROP*, 4(2), 98-106.



Buku ini ditujukan untuk para ilmuwan, peneliti, praktisi lingkungan, pembuat kebijakan, dan siapa saja yang memiliki kepedulian terhadap kelestarian lingkungan. Melalui pembahasan yang mendalam namun mudah diakses, kami bertujuan untuk menyajikan pengetahuan terkini tentang bioremediasi yang dipimpin oleh mikroba indigenus, termasuk mekanisme kerja, strategi implementasi, serta tantangan dan peluang yang ada. Kami berharap bahwa pembaca akan mendapatkan pemahaman yang lebih baik tentang pentingnya mikroba indigenus dan potensi mereka dalam memperbaiki kerusakan lingkungan, khususnya dalam konteks konservasi mangrove. Lebih dari itu, kami mengharapkan buku ini dapat memicu lebih banyak inisiatif penelitian dan aplikasi praktis yang berfokus pada pemanfaatan mikroba indigenus dalam upaya pelestarian lingkungan kita.