

BOTEKNOLOGI LINGKUNGAN: BIOREMEDIASI

A. Tujuan Pembelajaran

Setelah mempelajari materi ini, mahasiswa diharapkan dapat:

1. Menguasai konsep bioremediasi
2. Menguasai konsep bioremediasi tanah baik insitu maupun ex-situ
3. Menguasai konsep bioremediasi minyak tanah
4. Menguasai konsep mikoremediasi
5. Menguasai konsep Fitoremediasi

B. Pendahuluan

Pencemaran lingkungan merupakan masalah global yang semakin mendesak untuk diatasi. Seiring dengan perkembangan industri dan aktivitas manusia, jumlah polutan yang terlepas ke lingkungan pun meningkat. Polutan-polutan ini dapat berupa senyawa organik maupun anorganik yang berbahaya bagi makhluk hidup dan ekosistem. Untuk mengatasi permasalahan ini, berbagai teknologi telah dikembangkan, salah satunya adalah bioremediasi. Pada bab ini akan dibahas mengenai: bioremediasi, bioremediasi in-situ dan ex-situ, bioremediasi minyak tanah, mikoremediasi, dan fitoremediasi.

C. Bioremediasi

Pengendalian lingkungan akibat pencemaran buangan industri merupakan salah satu masalah yang perlu ditanggulangi. Kondisi tersebut berpotensi menimbulkan perubahan kualitas air akibat masuknya limbah yang berasal dari kegiatan industri, terutama limbah industri yang mengandung senyawa organik bahkan logam berat, dimana akan menyebabkan semakin tingginya bahan pencemar yang dibawa oleh aliran sungai menuju muara dan akan terakumulasi di laut. Permasalahan tersebut selanjutnya dapat berpengaruh pada biota air tawar dan biota laut yang ada didalamnya hingga berdampak pada kehidupan manusia yang ketergantungannya terhadap lingkungan perairan tawar maupun laut sangat besar. Salah satu proses pengolahan limbah untuk mengurangi masalah pencemaran oleh senyawa organik, logam berat adalah dengan **bioremediasi**, yaitu suatu proses pengolahan cemar limbah sebagai upaya untuk melakukan perbaikan kualitas lingkungan dengan memanfaatkan makhluk hidup. Makhluk hidup yang berpotensi besar sebagai agen bioremediasi adalah mikroba. Mikroba banyak dimanfaatkan di bidang lingkungan, terutama untuk mengatasi pencemaran lingkungan (bioremediasi), baik di lingkungan perairan maupun tanah. Jenis bahan pencemar bermacam-macam, mulai dari sumber-sumber alami hingga bahan sintetik, dengan sifat yang mudah dirombak (*biodegradable*) sampai sangat sulit bahkan tidak bisa dirombak (*non biodegradable*), maupun bersifat meracuni bagi jasad hidup dengan bahan aktif tidak rusak dalam waktu lama (persisten).

Bioremediasi telah dikenal luas dan menjadi teknologi dekontaminasi yang dipandang lebih aman, lebih bersih, harga murah, lebih efektif, mudah dilakukan, efisiensi tinggi, dan ramah lingkungan sehingga dapat dimaknai sebagai teknologi hijau (*green technology*) di dalam sistem manajemen lingkungan. Secara umum, aplikasi bioremediasi menggunakan organisme hidup, khususnya mikroorganisme yang digunakan untuk mereduksi polutan. Agen biologi di dalam proses bioremediasi disebut bioremediator.

Bioremediasi merupakan pengembangan dari bidang bioteknologi lingkungan dengan memanfaatkan proses biologi dalam mengendalikan pencemaran. Mikroorganisme telah banyak digunakan dalam mengurangi senyawa organik dan bahan beracun baik yang berasal dari limbah rumah tangga maupun industri. Hal yang baru adalah bahwa teknik bioremediasi terbukti sangat efektif dan murah dari sisi ekonomi untuk membersihkan tanah dan air yang terkontaminasi oleh senyawa-senyawa kimia toksik atau beracun (Kurniawan & Nuraeni Ekowati, 2016).

Bioremediasi berasal dari dua kata yaitu **bio dan remediasi** yang dapat diartikan sebagai proses dalam menyelesaikan masalah. Bioremediasi merupakan pengembangan dari bidang bioteknologi lingkungan dengan memanfaatkan proses biologi dalam mengendalikan pencemaran. Bioremediasi mempunyai potensi untuk menjadi salah satu teknologi lingkungan yang bersih, alami, dan paling murah untuk mengantisipasi masalah-masalah lingkungan. Dengan demikian, bioremediasi adalah salah satu teknologi untuk mengatasi masalah lingkungan dengan memanfaatkan bantuan mikroorganisme. Mikroorganisme yang dimaksud adalah khamir, alga, jamur dan bakteri yang berfungsi sebagai agen bioremediator (Endah Rita Sulistya Dewi, 2020).

Mikroba dalam mengolah senyawa kimia berbahaya dapat berlangsung apabila adanya mikroba yang sesuai dan tersedia kondisi lingkungan yang ideal tempat tumbuh mikroba seperti suhu, pH, nutrient, dan jumlah oksigen. Aplikasi bioremediasi di Indonesia mengacu pada keputusan Menteri Negara Lingkungan Hidup Nomor 128 Tahun 2003 mengatur tentang tatacara dan persyaratan teknis pengolahan limbah dan tanah terkontaminasi oleh minyak bumi secara biologis. Bioremediasi dapat dilakukan dengan menggunakan mikroba lokal. Pada umumnya, di daerah yang tercemar jumlah mikroba yang ada tidak mencukupi untuk terjadinya bioproses secara alamiah. Teknologi bioremediasi dalam menstimulasi pertumbuhan mikroba secara umum dilakukan dengan dua cara yaitu

- a. Biostimulasi merupakan upaya untuk memperbanyak dan mempercepat pertumbuhan mikroba yang sudah ada di daerah tercemar dengan cara memberikan lingkungan pertumbuhan yang diperlukan, yaitu penambahan nutrien dan oksigen. Jika jumlah mikroba yang ada dalam jumlah sedikit, maka harus ditambahkan mikroba dalam konsentrasi yang tinggi sehingga bioproses dapat terjadi. Mikroba yang ditambahkan adalah mikroba yang sebelumnya diisolasi dari lahan tercemar kemudian setelah melalui proses penyesuaian di laboratorium di perbanyak dan dikembalikan ke tempat

asalnya untuk memulai bioproses. Namun sebaliknya, jika kondisi yang dibutuhkan tidak terpenuhi, mikroba akan tumbuh dengan lambat atau mati. Secara umum kondisi yang diperlukan ini tidak dapat ditemukan di area yang tercemar.

- b. Bioaugmentasi merupakan penambahan produk mikroba komersial ke dalam limbah cair untuk meningkatkan efisiensi dalam pengolahan limbah secara biologi. Hambatan mekanisme ini yaitu sulit untuk mengontrol kondisi situs yang tercemar agar mikroba dapat berkembang dengan optimal. Selain itu mikroba perlu beradaptasi dengan lingkungan tersebut. Dalam beberapa hal, Teknik bioaugmentasi juga diikuti dengan penambahan nutrisi tertentu.

Umumnya proses bioremediasi ion logam berat terdiri atas dua mekanisme yang melibatkan proses pengambilan aktif (*active uptake*) dan penyerapan pasif (*passive uptake*). Prosesnya berlangsung dengan cepat dan bolak balik. Proses bolak balik ikatan ion logam berat di permukaan sel ini dapat terjadi pada sel mati dan sel hidup dari suatu biomassa.

Berdasarkan kajian beberapa hasil penelitian tentang bioremediasi yang diaplikasikan pada perairan yang telah tercemar oleh jenis limbah tertentu, maka teknik bioremediasi memiliki beberapa keuntungan diantaranya:

- a. Bioremediasi sangat aman digunakan karena menggunakan mikroba yang secara alamiah sudah ada di lingkungan (air).
- b. Bioremediasi tidak menggunakan/menambahkan bahan kimia berbahaya.
- c. Tidak melakukan proses pengangkatan polutan.
- d. Teknik pengolahannya mudah diterapkan dan murah.
- e. Waktu yang digunakan untuk menyelesaikan pengolahan tergantung pada faktor jenis dan jumlah senyawa kimia yang berbahaya yang akan diolah, ukuran dan kedalaman area yang tercemar, jenis tanah dan kondisi setempat dan teknik yang digunakan.

Di sisi lain, bioremediasi juga memiliki kelemahan antara lain sebagai berikut:

- a. Tidak semua bahan kimia dapat diolah secara bioremediasi.
- b. Membutuhkan pemantauan yang intensif
- c. Berpotensi menghasilkan produk yang tidak dikenal
- d. Membutuhkan lokasi tertentu

Keberhasilan proses biodegradasi banyak ditentukan oleh aktivitas enzim. Dengan demikian mikroorganisme yang berpotensi menghasilkan enzim pendegradasi hidrokarbon perlu dioptimalkan aktivitasnya dengan pengaturan kondisi dan penambahan suplemen yang sesuai. Dalam hal ini perlu diperhatikan faktor-faktor lingkungan yang mempengaruhi proses bioremediasi, yang meliputi kondisi tanah, temperature, oksigen, dan nutrisi yang tersedia.

D. Bioremediasi In-Situ dan Ex-Situ

Secara strategi, bioremediasi dapat dilakukan melalui:

1. Bioremediasi In Situ

Merupakan metode dimana mikroorganisme diaplikasikan langsung pada tanah atau air dengan kerusakan yang minimal. Bioremediasi in situ (*In situ bioremediation*) juga terbagi atas:

- a. Biostimulasi/Bioventing: dengan penambahan nutrient (N, P) dan aseptor elektron (O_2) pada lingkungan pertumbuhan mikroorganisme untuk menstimulasi pertumbuhannya.
- b. Bioaugmentasi: dengan menambahkan organisme dari luar (exogenous microorganism) pada subpermukaan yang dapat mendegradasi kontaminan spesifik.
- c. Biosparging: dengan menambahkan injeksi udara dibawah tekanan ke dalam air sehingga dapat meningkatkan konsentrasi oksigen dan kecepatan degradasi. Suatu contoh penerapan bioremediasi insitu adalah kasus sungai Citarum yang mengandung polutan. Telah dilakukan penuangan cairan bakteri pengurai limbah yang berfungsi untuk membersihkan air sungai dari polutan yang terkandung di oxbow Bojongsoang, Kabupaten Bandung, pada Jumat 23 Agustus 2019, sebanyak 372 jerigen berkapasitas masing-masing 30 liter cairan bakteri pengurai limbah dituangkan ke aliran Sungai Citarum. Bakteri MR 8 diperkirakan bisa menjernihkan air dan menetralisasi racun di dalamnya selama sekira 7 hari. Pada dasarnya bakteri bekerja menguraikan kandungan (racun) dalam air sehingga kadar COD, BOD, dan oksigennya terpenuhi. Dengan kadar tiga senyawa tersebut yang memadai, mahluk hidup seperti ikan bisa bertahan di dalamnya serta airnya setidaknya aman untuk irigasi.



Gambar 1. Cairan Bakteri Pengurai Limbah yang Dituangkan ke Aliran Sungai Citarum

2. Bioremediasi Ex Situ

Merupakan metode dimana mikroorganisme diaplikasikan pada tanah atau air terkontaminasi yang telah dipindahkan dari tempat asalnya. Teknik ek situ terdiri atas:

- a. Landfarming: teknik dimana tanah yang terkontaminasi digali dan dipindahkan pada lahan khusus yang secara periodic diamati sampai polutan terdegradasi.
- b. Composting: teknik yang melakukan kombinasi antara tanah terkontaminasi dengan tanah yang mengandung pupuk atau senyawa organik yang dapat meningkatkan populasi mikroorganisme.
- c. Biopiles: merupakan perpaduan antara landfarming dan composting.
- d. Bioreactor: dengan menggunakan aqueous reaktor pada tanah atau air yang terkontaminasi.

Contoh penerapan bioremediasi exsitu adalah pemulihan lahan terkontaminasi.

E. Bioremediasi Minyak Bumi

Minyak bumi memiliki peranan yang penting dalam industri transportasi dan rumah tangga. Aktifitas industri minyak bumi terdiri atas berbagai rangkaian proses pengolahan yang kompleks dari hulu ke hilir. Minyak bumi terdiri atas campuran senyawa yang sangat kompleks terutama senyawa organik yang hanya mempunyai unsur karbon dan hidrogen atau biasa disebut sebagai senyawa hidrokarbon.

Perkembangan sektor industri minyak bumi yang semakin pesat tidak hanya memberikan dampak yang positif seperti meningkatkan kesejahteraan rakyat, namun juga dapat memberikan dampak negatif yaitu pencemaran lingkungan. Strategi yang dapat dilakukan untuk mengatasi hal tersebut adalah dengan bioremediasi. Bioremediasi merupakan aplikasi proses dari prinsip biologi dalam mengolah air tanah, tanah dan lumpur yang terkontaminasi zat-zat kimia berbahaya.

Penambahan nutrisi seperti unsur hara makro N, P, dan K pada tanah tercemar minyak bumi dapat meningkatkan kadar hara pada tanah sehingga kadar hara pada tanah tercukupi. Kadar hara yang tercukupi pada tanah dapat menstimulasi kehidupan mikroorganisme yang ada dalam tanah. Mikroorganisme yang mampu hidup dan berperan penting pada tanah tercemar minyak bumi, yaitu lingkungan yang mengandung hidrokarbon adalah bakteri. Aktivitas bakteri memerlukan molekul karbon sebagai salah satu sumber nutrisi dan energi dalam pertumbuhan dan perkembangbiakannya. Kelompok mikroorganisme yang memanfaatkan karbon dari senyawa hidrokarbon disebut mikroorganisme hidrokarbonoklastik (Nabela Nur Hanifah & Fitrihidajati, 2018).

Beberapa teknik bioremediasi yang dapat digunakan untuk mengatasi pencemaran minyak bumi yaitu:

1. Memanfaatkan bakteri

Selama proses bioremediasi, akan terjadi degradasi fraksi parafinik, naftenik, dan aromatik yang terkandung dalam minyak bumi. Beberapa faktor yang mempengaruhi biodegradasi hidrokarbon oleh bakteri adalah proses adaptasi, hidrokarbon sebagai substrat, suhu, keasaman, ketersediaan oksigen, dan ketersediaan nutrisi.

Pseudomonas sp. dan *Bacillus sp.* Merupakan bakteri yang sering ditemukan di lingkungan minyak bumi. Dari limbah cair kilang minyak, telah dapat diisolasi bakteri, *Acinetobacter sp.*, *Alcaligenes sp.*, *Bacillus sp.*, *Chromobacterium sp.*, *Pseudomonas sp.*, *Streptococcus sp.*, *StreptoBacillus sp.*. Upaya untuk mendegradasi cemaran minyak bumi telah dilakukan melalui metode bioremediasi menggunakan isolat tunggal dan campuran. Hasil menunjukkan bahwa bakteri campuran yang mengandung *Pseudomonas* memberikan hasil terbaik. Proses degradasi limbah minyak bumi dapat dipercepat dengan memilih inokulan yang sesuai dan menciptakan lingkungan yang sesuai untuk kehidupan bakteri. Oleh sebab itu bioremediasi dilakukan dengan menambahkan unsur N dan P dengan perbandingan 5:1. Bioremediasi juga dilakukan dengan menambahkan *Pseudomonas aeruginosa* dan *Bacillus lentimorbus* ke dalam kultur indigenus. Hasilnya menunjukkan kemampuan biodegradasi hidrokarbon lebih baik daripada penambahan kultur mikroba tersebut secara terpisah. Usaha untuk mendegradasi naftalena sebagai satu-satunya sumber karbon telah pula dilakukan menggunakan *Bacillus naphthovorans sp. nov. galur MN-003*. Degradasi alkana dari tumpahan minyak dilakukan menggunakan 7 galur bakteri *Pseudomonas* (Moch. Fierdaus, 2015).

2. Biopile

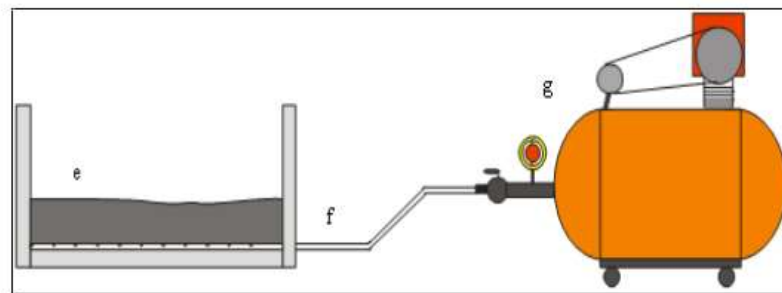
Biopile ialah suatu sistem di mana material yang akan didegradasi dipersiapkan pada suatu tempat dan diberi sistem perpipaan yang dihubungkan dengan blower atau kompresor (Hendrasarie & Novi Eka, 2011). Aerasi pada sistem biopile dicapai melalui cara positif atau negatif (hisap). Aerasi, pada umumnya, memakai, yaitu vacum (hisap) karena mampu meminimasi emisi dari komponen yang mudah menguap (volatile). Aliran udara dalam biopile digunakan untuk mengontrol suhu dan kandungan oksigen dalam tanah. Layout dari lubang pipa dan laju aerasi digunakan sebagai parameter penting dalam merancang sistem biopile dan biasanya disesuaikan dengan kebutuhan. Pipa di dasar biasanya ditanam pada sebuah lapisan yang mempunyai permeabilitas tinggi. Jaringan pipa pada beberapa elevasi untuk aerasi dan untuk mengantarkan nutrisi dan kelembapan.

Beberapa hal yang perlu diperhatikan dalam pelaksanaan sistem biopile antara lain adalah bahan penggembur, komposisi tumpukan tanah, kelembaban tanah, nutrisi, dan sistem aerasi biopile. Penambahan dari bahan penggembur ditujukan untuk mencegah pemadatan tanah serta menambah porositas dan penyediaan oksigen. Macam-macam bulking agent (penggembur) antara lain, jerami, rumput kering, sekam padi, serat tanaman yang lain, woodchips, dan material sintesis. Salah satu kunci kesuksesan proses komposting, yaitu mengetahui komposisi campuran yang benar. Suatu amandemen tentang kombinasi sumber panas dan bulking agent diberikan untuk mempercepat pengomposan, selain itu amandemen ini juga digunakan sebagai sumber bibit mikroba. Stegman et al. (1991) menyebutkan bahwa dari hasil studi laboratorium pada tanah terkontaminasi bahan bakar diesel menunjukkan massa kompos yang lebih

tinggi (campuran tanah dengan kompos) akan meningkatkan aktivitas mikroba dan baik untuk menurunkan hidrokarbon. Hasil terbaik adalah dalam rasio tanah:kompos = 2:1 (pada berat kering).

Penjagaan kelembaban dapat meningkatkan pertumbuhan mikroba. Kelembaban diukur sebagai persentase dari kapasitas simpanan air lebih tinggi daripada yang tidak ditambahkan penggembur. Persamaan kelembaban tanah sekitar 60% dari kapasitas simpanan air sudah optimal untuk aktivitas mikroba pada campuran kompos dan tanah. Nutrisi yang diperlukan oleh mikroorganisme dalam proses bioremediasi, yaitu berupa nutrisi alami dalam tanah dan nutrisi tambahan. Nutrisi alami berupa elemen-elemen kimia dalam tanah, sumber karbon yang diperoleh dari pencemar, hidrogen dan oksigen yang disuplai oleh air. Perbandingan C:N:K = 100:10:1.

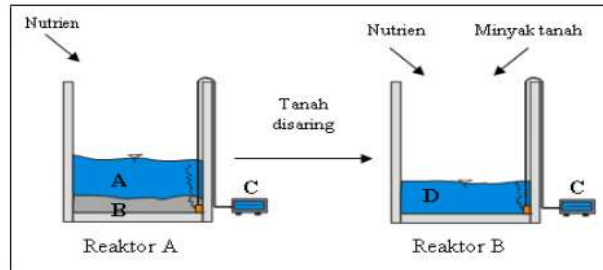
Laju aerasi yang digunakan harus cocok untuk aktivitas mikroba. Ketika proses degradasi dimulai dan percepatan aktivitas mikroba yang dibutuhkan adalah oksigen dalam jumlah yang tinggi, suhu dibangun dengan cepat, dan diperlukan aliran udara yang tinggi.



Keterangan: e = Tanah tercemar minyak tanah + kompos organik + mikroorganisme
f = Selang suplai udara
g = Kompresor

Gambar 2. Reaktor Bioremediasi

Pada penelitian yang telah dilakukan oleh, (Hendrasarie & Eka 2011) dinyatakan bahwa metoda biopile dilakukan melalui dua tahap utama, yaitu pendahuluan dan penelitian utama. Pada tahap pendahuluan, dilakukan proses aklimatisasi mikroorganisme. Tahapan ini dilakukan untuk mengkondisikan dan membiasakan mikroorganisme untuk menggunakan minyak tanah sebagai sumber karbon dalam pertumbuhannya. Mikroorganisme yang akan diaklimatisasi diperoleh dari sampel tanah yang tercemar. Sampel tanah tercemar tersebut ditambahkan air dan diaerasi. Selanjutnya sampel tanah dan air dipisahkan. Tahapan ini berlangsung selama 30 hari



Keterangan: A = Air PDAM sebanyak ± 1 L
 B = Tanah yang tercemar minyak tanah
 C = Aerator
 D = Air hasil saringan dari Reaktor A

Gambar 3. Reaktor Aklimatisasi

F. Mikoremediasi

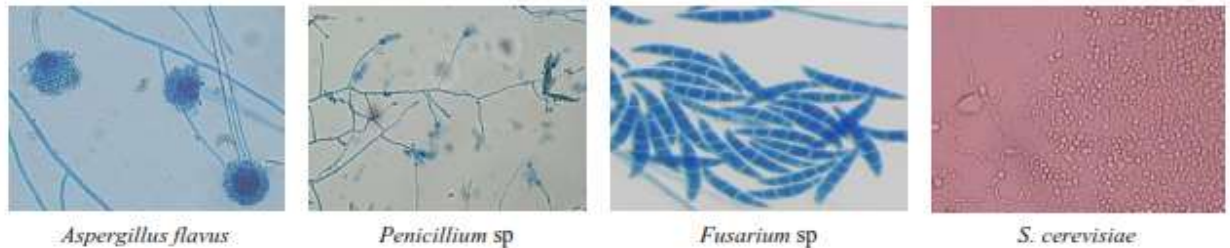
Istilah miko-bioremediasi (mikoremediasi) berasal dari miko (cendawan) bio (hidup) dan remediasi (pemulihan kembali) yang berarti menggunakan cendawan untuk menghilangkan senyawa yang toksik dari air, lumpur dan tanah sehingga lingkungan kembali menjadi bersih dan alamiah. Bioremediasi pada lahan terkontaminasi logam berat didefinisikan sebagai proses membersihkan lahan dari bahan-bahan pencemar/polutan secara biologis atau dengan menggunakan organisme hidup. Melalui bioremediasi, lahan dapat dibersihkan, khususnya lahan peternakan yang berdekatan dengan pabrik sehingga bebas dari cemaran logam berat (Ahmad, 2018).

Bioremediasi sudah banyak dilakukan pada pengolahan limbah minyak bumi (Keputusan Menteri Lingkungan Hidup Nomor 128 K Tahun 2003), sedangkan untuk lahan peternakan belum ada aturannya. Mikoremediasi dapat dilakukan bila lingkungan tempat tumbuh cendawan sesuai dengan habitatnya seperti suhu, pH, nutrisi, kelembaban dan oksigen. Mikoremediasi dapat dilakukan dengan biostimulasi (memperbanyak cendawan) yang sudah ada di dalam tanah yang tercemar dengan cara memberikan lingkungan pertumbuhan yang diperlukan dan bioaugmentasi (menambahkan populasi cendawan).

Di dalam proses bioremediasi dibedakan menjadi dua golongan, yaitu in situ untuk polutan yang tidak dipindahkan dan ex situ untuk polutan yang dipindahkan. Proses remediasi berdasarkan kemampuan toleransi cendawan terbagi atas dua mekanisme, yaitu pemisahan ekstrak seluler melalui khelasi dan pengikatan dinding sel serta pemisahan intraseluler fisik logam melalui pengikatan protein atau ligan lainnya untuk mencegah kerusakan target seluler sensitif logam. Enzim juga memegang peranan dalam proses mikoremediasi yang akan mendegradasi sejumlah jenis substrat dan polutan.

Cendawan, atau jamur yang masuk dalam kingdom fungi, sebagai bioremediator lebih baik daripada bakteri. Bakteri mengurai senyawa organik polutan logam berat dengan cara menangkap/ mengambil senyawa tersebut ke dalam sel dan memanfaatkan enzim intraseluler. Dalam hal ini, difusi dengan polutan dibatasi oleh ukuran molekul, dinding

sel, toksisitas senyawa tertentu yang akan mematikan bakteri. Sebaliknya, pada cendawan enzim pendegradasi disekresi oleh cendawan dan miselia (enzim ekstraseluler) dan proses biodegradasi (pengurai) dilakukan di luar sel cendawan sehingga ukuran molekul dan toksisitasnya dapat diabaikan. Gambar 4 menunjukkan beberapa spesies cendawan yang sering dipakai untuk proses miko-bioremediasi.



Gambar 4. Cendawan yang potensial sebagai mikoremediasi

Mekanisme bioremediasi menggunakan mikroorganisme dikembangkan untuk mentoleransi konsentrasi logam berat (Ahmad & Malik 2012). Secara umum, kemampuan toleransi yang ditunjukkan oleh cendawan terjadi melalui dua mekanisme, yaitu pemisahan secara ekstraselular melalui khelasi dan pengikatan dinding sel, serta pemisahan intraselular fisik logam melalui pengikatan ke protein atau ligan lainnya untuk mencegah kerusakan target selular yang sensitif terhadap logam tersebut. Mekanisme ekstraselular berupaya menghindarkan sel dari masuknya logam, sedangkan sistem atau mekanisme intraselular bertujuan untuk mengurangi beban logam dalam sitosol (Anahid et al. 2011).

Pada proses remediasi cemaran di lingkungan melibatkan cendawan beserta mekanisme reduksinya, baik secara intraselular maupun ekstraselular. Beberapa jenis fungi yang sering dijadikan agen remediator antara lain *Aspergillus sp*, *Fusarium sp*, *Penicillium sp*, *Hanerochaete sp*, *Saccharomyces cerevisiae*, *Trichoderma sp* (Gambar 4). Cendawan mereduksi logam berat dengan beberapa cara yaitu biosorpsi, bioakumulasi, biopresipitasi, bioreduksi dan bioleaching dengan proses kimiawi melalui modifikasi ataupun mengubah bioavailabilitas.

1. Biosorpsi

Biosorpsi adalah proses penghilangan logam dari suatu larutan dengan menggunakan bahan biologis. Proses penghilangan logam berat melalui pengikatan pasif ke biomassa tidak hidup dari suatu larutan dan mekanisme reduksinya tidak dikendalikan secara metabolik. Biosorpsi merupakan proses penyerapan logam secara pasif oleh sel-sel mikroorganisme, hasil dari formasi organik kompleks-logam dengan penyusun dinding sel mikroorganisme, kapsul atau polimer ekstraseluler yang disintesis dan diekresikan oleh mikroorganisme (Gavrilescu 2004). Mekanisme biosorpsi dapat dikelompokkan menjadi mekanisme yang bergantung pada metabolisme (*metabolism dependent mechanisms*) dan mekanisme yang tidak bergantung dengan metabolisme (*metabolism independent mechanisms*). Pengikatan logam tidak bergantung metabolisme (*metabolism-independent metal binding*) ke

dinding sel dan permukaan eksternal hanya terjadi pada biosorpsi yang melibatkan biomassa tidak hidup (*non-living biomass*). Sedangkan pada *metabolism-independent metal binding* melibatkan proses adsorpsi seperti ionik, kimiawi dan fisik oleh grup fungsional dinding sel biomassa. Biosorben memiliki berbagai sisi fungsional yaitu karboksil, imidazole, sulfidril (thiol), amino, fosfat, sulfat, thioether, fenol, karbonil (keton), amida, gugus hidroksil, fosfonat dan fosfodiester yang memiliki potensi. Interaksi pasif dinding sel dengan ion logam dalam proses biosorpsi juga melibatkan makromolekul seperti lipid, protein dan polisakarida yang terdapat pada permukaan dinding sel. Biosorpsi adalah proses mikoremediasi paling banyak dilakukan dalam melakukan remediasi.

2. Bioakumulasi

Mikroorganisme memiliki kapasitas untuk mengakumulasi logam berat lebih tinggi dibandingkan dengan konsentrasi yang umumnya ada di lingkungan. Proses akumulasi ini dapat dikelompokkan menjadi biokonsentrasi dan bioakumulasi. Biokonsentrasi merupakan proses peningkatan konsentrasi polutan secara langsung sewaktu berpindah dari lingkungan ke suatu organisme. Sedangkan bioakumulasi adalah absorpsi polutan secara langsung yang terakumulasi melalui nutrisi yang ditambahkan pada organisme (Smical et al. 2008). Bioakumulasi logam berat pada organisme hidup dideskripsikan sebagai suatu proses dan jalur migrasi polutan dari satu level trofik ke level lainnya, termasuk melalui rantai makanan sehingga dapat terakumulasi pada jaringan organ. Keberadaan logam berat tergantung pada karakteristik bioakumulasi logam yang terkonsentrasi. Bioakumulasi logam berat terjadi secara aktif dan dikendalikan secara metabolik oleh organisme. Sedangkan bioavailabilitas logam berat, akumulasi dan toksisitasnya tergantung pada variabel-variabel yang terdapat di lingkungan.

3. Biopresipitasi

Proses reaksi kimiawi terhadap logam berat dilakukan sehingga terbentuk presipitat tidak larut dan kemudian presipitat tersebut dipisahkan melalui proses sedimentasi atau filtrasi (Fu & Wang 2011). Presipitasi diikuti oleh proses koagulasi atau penggumpalan yang terjadi di dalam pembentukan presipitat hidroksida logam melalui penambahan bahan alkali untuk menghilangkan kation logam berat seperti Pb(II), Cd(II), Cu(II) dan Ni(II) (Dhakal et al. 2005). Di dalam biopresipitasi, pereduksian logam berat menjadi presipitat dilakukan oleh mikroorganisme dalam kondisi anaerob dimana proses ini berbeda dengan biomineralisasi yang terjadi secara aerob.

4. Bioreduksi

Pereduksian racun dari suatu lingkungan atau detoksifikasi dengan menggunakan mikroorganisme adalah merupakan pendekatan perlindungan lingkungan yang ramah. Proses bioreduksi atau biodetoksifikasi oleh mikroorganisme dapat terjadi secara langsung maupun tidak langsung. Bioreduksi secara langsung terjadi dengan melibatkan aktivitas enzimatis, sedangkan mekanisme tidak langsung melibatkan

produk metabolisme (reduktan maupun oksidan) melalui reaksi reduksi oksidasi kimiawi.

5. Bioremediation

Proses pelarutan logam dari substrat padatan secara langsung dapat dilakukan melalui metabolisme mikroorganisme seperti cendawan dan bakteri, serta secara tidak langsung dilakukan oleh produk metabolisme. Unsur-unsur dapat mengalami proses asimilasi, degradasi dan metabolisme senyawa organik serta anorganik seperti C, H, O. Selain itu, pada unsur N terjadi dekomposisi senyawa, denitrifikasi dan nitrifikasi, oksidasi amonia dan nitrit, atau sintesis biopolimer yang mengandung nitrogen (N). Delusi fosfat anorganik dan mineral yang mengandung fosfor (P); degradasi senyawa organik yang mengandung sulfur (S); pelapukan biologis pada mineral yang mengandung besi (Fe); pelarutan Fe oleh siderofor atau asam organik dan metabolit lainnya, seperti biomineralisasi dan oksidasi; bioakumulasi, immobilisasi, biosorpsi, presipitasi intraselular, oksidasi, reduksi dan biomineralisasi Mn; oksidasi, reduksi dan akumulasi kromium (Cr); pelapukan, biosorpsi, biopresipitasi dan penyerapan, serta akumulasi pada unsur magnesium (Mg), kalsium (Ca), kobalt (Co), nikel (Ni), seng (Zn) dan kadmium (Cd); reduksi, biosorpsi dan akumulasi perak (Ag); akumulasi, translokasi melalui miselium dan mobilisasi kalium (K) serta natrium (Na); mobilisasi mineral yang mengandung tembaga (Cu); volatilisasi raksa (Hg) menjadi Hg(0), biometilasi Hg dan reduksi Hg(II) menjadi Hg(0); dan peran lainnya di dalam siklus mineral, termasuk proses dehalorespirasi. Tabel 1 menunjukkan beberapa cendawan yang dapat digunakan sebagai cendawan mikoremediasi. Sejumlah cendawan lainnya yang telah diteliti dan digunakan sebagai agen mikoremediasi antara lain *Aspergillus sp*, *Fusarium sp* dan *Penicillium sp* yang telah diuji memiliki toleransi terhadap logam berat Zn, Pb, Ni dan Cd. *A. flavus*, *A. niger*, *Fusarium solani*, *Penicillium chrysogenum* resisten terhadap Cr dan Pb, cendawan *Filamentus* yang mampu mengabsorpsi sejumlah logam berat seperti Zn, Cd, Pb, Fe, Ni dan lainnya. Fungi dari jenis *A. awamori*, *A. flavus*, *Phanerochaete chrysosporium* dan *Trichoderma viride* mampu toleran Pb, Cd, Cr dan Ni. Kelompok *Trichoderma*, yaitu jenis *Trichoderma asperellum*, *Trichoderma harzianum* dan *Trichoderma tomentosum* dapat menurunkan Cd. Selain itu, *A. niger* dan strain *Phanerochaete chrysosporium* mampu menghambat dan mendegradasi total organic carbons (TOC). *Aspergillus fumigatus* dapat meremediasi tanah dari logam berat Fe, Cu dan Cr dengan cara biosorpsi logam tersebut dari tanah yang tercemar. *S. cerevisiae* mampu mengabsorpsi cemaran ion timbal (Pb^{2+}) 67-82% dan ion kadmium (Cd) sebanyak 73-79% dalam 30 hari. Proses reduksi Co^{2+} , Ni^{2+} , Cu^{2+} , dan Cd^{2+} menjadi bentuk metaliknya dapat dilakukan oleh *S. cerevisiae* di dalam larutan buffer. Mikoriza dapat mengurangi toksisitas logam berat terhadap tanaman pada tanah tercemar. Hasil penelitian menunjukkan bahwa Endomikoriza menurunkan kadar Cu dan Pb yang tersedia di dalam tanah. Pada tanaman, pemberian Endomikoriza menurunkan serapan Pb.

Tabel 1. Cendawan mikoremediasi dan logam berat yang diremediasi

Cendawan	Remediasi Logam
<i>Acrimonium sp</i>	Cd, Cu, Ni
<i>Aspergillus flavus*</i>	Cr, Pb
<i>Aspergillus fumigatus</i>	Pb, Cu, Cr
<i>Aspergillus niger</i>	Cd, Zn
<i>Aspergillus sp*</i>	Zn, Cr, Cu, Ni, Cd
<i>Curvularia sp</i>	Cd, Cu, Ni
<i>Endomikoriza</i>	Cd, Cu, Pb
<i>Fusarium sp</i>	Cd, Cr, Zn
<i>Penicillium sp</i>	Cd, Cr, Zn
<i>Pithyum sp</i>	Cd, Cu, Ni
<i>Rhizopus spp</i>	Cd, Cr
<i>Saccharomyces cerevisiae</i>	Pb, Cd
<i>Trichoderma harzianum, T. virens</i>	Pb, Cu, Ni, Zn

Cendawan	Remediasi logam
<i>Acrimonium sp</i>	Cd, Cu, Ni
<i>Aspergillus flavus*</i>	Cr, Pb
<i>Aspergillus fumigatus</i>	Pb, Cu, Cr
<i>Aspergillus niger</i>	Cd, Zn
<i>Aspergillus sp*</i>	Zn, Cr, Cu, Ni, Cd
<i>Curvularia sp</i>	Cd, Cu, Ni
<i>Endomikoriza</i>	Cd, Cu, Pb
<i>Fusarium sp</i>	Cd, Cr, Zn
<i>Penicillium sp</i>	Cd, Cr, Zn
<i>Pithyum sp</i>	Cd, Cu, Ni
<i>Rhizopus spp</i>	Cd, Cr
<i>Saccharomyces cerevisiae</i>	Pb, Cd
<i>Trichoderma harzianum, T. virens</i>	Pb, Cu, Ni, Zn

G. Fitoremediasi

Selain mikroorganisme, jenis tanaman tertentu dapat digunakan sebagai teknik bioremediasi yang disebut dengan fitoremediasi. Fitoremediasi merupakan salah satu cara pembersihan polutan menggunakan tumbuhan, umumnya terdefinisi seperti pembersihan

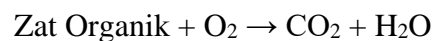
kontaminan dari lingkungan dengan menggunakan tumbuhan hiperakumulator. Fitoremediasi berasal dari dua kata yaitu Phyto dalam bahasa Yunani yang berarti tumbuhan dan remediare yang berasal dari bahasa Latin yaitu memperbaiki atau membersihkan sesuatu. Fitoremediasi merupakan salah satu metode remediasi dengan mengandalkan peran tumbuhan untuk menyerap, mendegradasi, mentransformasi dan mengimobilisasi bahan pencemar logam berat atau polutan. Hasil penelitian menyatakan bahwa karakteristik tumbuhan hiperakumulator adalah: (i) Tahan terhadap unsur logam dalam konsentrasi tinggi pada jaringan akar dan tajuk; (ii) Tingkat laju penyerapan unsur dari tanah yang tinggi dibanding tanaman lain; (iii) Memiliki kemampuan mentranslokasi dan mengakumulasi unsur logam dari akar ke tajuk dengan laju yang tinggi. Translokasi ini merupakan komponen yang harus diperhatikan dalam penentuan tumbuhan hiperakumulator.

Salah satu agen biologi yang memiliki potensi sebagai fitoremediator adalah tumbuhan air. Pada umumnya tumbuhan air mampu mengakumulasi logam berat maupun zat organik dengan cara menyimpan pada bagian organ tertentu pada tanaman, misalnya *Ipomea* sp, *Eclipta* sp, *Marsilea* sp (Gupta et al., 2008). Logam berat yang mampu diserap oleh tumbuhan air antara lain: Pb (Timbal), Cd (cadmium), Cr (Kromium), Hg (Merkuri), dan Zn (seng), sedangkan zat organik yang mampu diakumulasi adalah protein, karbohidrat, lipid, dan lain-lain. Semua spesies tanaman air dapat melakukan penyerapan logam berat dan zat organik melalui akar yang dapat digunakan sebagai indikator pencemaran pada perairan (Popova et al., 2009). Semanggi air dapat dijumpai pada lahan basah maupun saluran irigasi sawah yang merupakan habitat aslinya. Tanaman Semanggi air sebagai tanaman dapat digunakan untuk remediasi dikarenakan tanaman semanggi termasuk tanaman agen fitoremediator yang dapat digunakan dalam proses fitoremediasi. Tanaman Semanggi air (*Marsilea crenata*) memiliki kecepatan tumbuh yang tinggi, hidup pada habitat yang kosmopolitan, mampu mengkonsumsi air dalam jumlah banyak dan dalam waktu yang singkat, mampu meremediasi lebih dari satu jenis polutan, mempunyai toleransi tinggi terhadap polutan, dan mudah dipelihara. Berdasarkan kisaran hidup tersebut diharapkan tanaman Semanggi air berpotensi sebagai agen fitoremediasi limbah cair tahu. Sebuah penelitian telah dilakukan Rohmawati, I, Endah Rita Sulistyia Dewi dan Maria Ulfah (2019) bertujuan untuk mengetahui efektifitas tanaman semanggi air dalam mengurai kadar COD limbah organik industri pembuatan tahu dengan harapan hasil yang diperoleh akan dapat dipergunakan industri tahu agar dapat mengolah limbahnya.



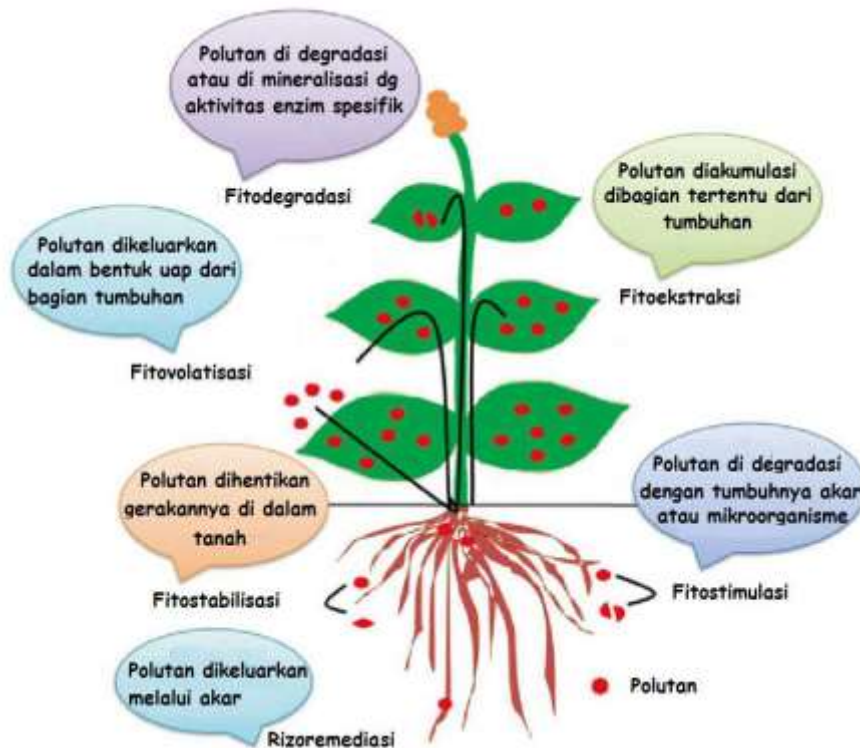
Gambar 1. Semanggi Air (*Marsilea crenata*)

Tanaman Semanggi air (*Marsilea crenata*) memiliki efektivitas dalam menurunkan kadar COD pada limbah cair tahu. Penurunan ini juga dikarenakan suplai oksigen terlarut cukup banyak terutama dari hasil fotosintesis tanaman sehingga menyebabkan dekomposisi bahan organik menjadi lebih efektif. Proses fotosintesis pada tanaman memungkinkan adanya pelepasan oksigen pada daerah sekitar perakaran (zona rhizosphere). Kondisi zona rhizosphere yang kaya akan oksigen, menyebabkan perkembangan bakteri aerob di zona tersebut. Penguraian bahan organik secara biologis oleh mikroorganisme menyangkut reaksi oksidasi dengan hasil akhir karbon dioksida (CO_2) dan air (H_2O). Proses penguraian bahan organik dapat digambarkan sebagai berikut:



Mekanisme fitoremediasi yang terjadi pada tanaman Semanggi air dimulai pada tahap Rhizofiltrasi, yaitu proses adsorpsi atau pengendapan kontaminan limbah cair tahu berupa zat organik protein, lemak, dan karbohidrat oleh akar untuk menempel pada akar. Setelah polutan menembus endodermis akar, polutan atau senyawa asing lain mengikuti aliran transpirasi ke bagian atas tanaman melalui jaringan pengangkut (xilem dan floem) ke bagian tanaman lainnya.

Tanaman Semanggi air menyerap melalui akar, kemudian didistribusikan ke seluruh bagian tanaman. Kemudian zat kontaminan berupa zat organik yang mempunyai rantai molekul yang kompleks diurai menjadi bahan yang tidak berbahaya menjadi susunan molekul yang lebih sederhana yang dapat berguna bagi tumbuhan itu sendiri (*phytodegradation*). Enzim yang berperan pada tahap *phytodegradation* biasanya adalah dehalogenase, oxygenase, dan reductase. Proses terakhir yaitu proses menarik zat kontaminan yang tidak berbahaya yang selanjutnya diupkan ke atmosfer (*phytovolazation*) dalam bentuk senyawa volatil.



Gambar 4. Ilustrasi Fitoremediasi

Proses fitoremediasi meliputi fitoakumulasi, rhizofiltrasi, fitostabilisasi, rizodegradasi, fitodegradasi, dan fitovolatisasi.

- a. **Fitoekstraksi atau fitoakumulasi** yaitu proses tumbuhan menarik zat kontaminan dari media sehingga berakumulasi di sekitar akar tumbuhan.
- b. **Rhizofiltrasi** yaitu proses adsorbs atau pengendapan zat-zat kontaminan pada akar (menempel pada akar).
- c. **Fitostabilisasi** yaitu penempelan zat-zat kontaminan tertentu pada akar yang tidak mungkin terserap ke dalam batang tumbuhan. Zat-zat tersebut menempel erat (stabil) pada akar sehingga tidak akan dibawa oleh aliran air dalam media.
- d. **Rhizodegradasi atau fitostimulasi** yaitu penguraian zat-zat kontaminan dengan aktivitas mikroba yang berada di sekitar akar tumbuhan. Misalnya ragi, fungi dan bakteri.
- e. **Fitodegradasi atau fitotransformasi** yaitu proses yang dilakukan tumbuhan untuk menguraikan zat kontaminan yang mempunyai rantai molekul yang kompleks menjadi bahan yang tidak berbahaya dengan susunan molekul yang lebih sederhana yang dapat berguna bagi pertumbuhan tanaman itu sendiri. Proses ini dapat berlangsung pada daun, batang, akar atau di luar di sekitar perakaran dengan bantuan enzim berupa bahan kimia yang mempercepat proses degradasi.

- f. **Fitovolatilisasi** yaitu proses menarik dan transpirasi zat-zat kontaminan oleh tumbuhan dalam bentuk yang telah menjadi larutan terurai sebagai bahan yang tidak berbahaya lagi untuk selanjutnya diuapkan ke atmosfer.

Selain tanaman *Marsilea crenata*, tanaman air lain yang berpotensi dalam fungsi bioremediasi adalah eceng gondok (*Eichhornia crassipes*). Berdasarkan penelitian Ratnani (2012) menjelaskan bahwa penggunaan tanaman eceng gondok dalam mengolah limbah cair tahu yang menunjukkan semakin tinggi biomassa maka akan semakin efektif dalam menurunkan COD. Hal ini dibuktikan dengan perlakuan biomassa 0; 0,5; 1 dan 1,5 kg didapatkan penyisihan COD dengan biomassa terbesar (1,5 kg) mampu menurunkan nilai COD berkisar 92,4%. Berat eceng gondok yang tinggi memberikan kontribusi yang tinggi untuk menurunkan konsentrasi COD, karena akar tanaman pada berat eceng gondok 1,5 kg lebih banyak dan panjang pula dibandingkan dengan berat yang lain, sehingga disekitar akar eceng gondok akan terdapat mikroorganisme yang akan mendegradasi senyawa organik yang terkandung dalam limbah, senyawa organik tersebut dijadikan sebagai sumber nutrisi bagi mikroba dan selanjutnya diubah menjadi senyawa yang lebih sederhana. Proses penurunan pencemar dalam limbah cair dengan menggunakan tumbuhan air merupakan kerjasama antara tumbuhan dan mikroba yang berada pada tumbuhan tersebut. Selanjutnya dijelaskan bahwa bahan-bahan pencemar tersebut akan diserap oleh akar tanaman setelah didegradasi oleh mikroorganisme menjadi senyawa yang lebih sederhana.

DAFTAR PUSTAKA

- Ahmad, R. Z. (2018). Mycoremediation to Remove Heavy Metal Pollution in Post-Mining Areas for Farmland Utilization. *Indonesian Bulletin of Animal and Veterinary Sciences*, 28(1), 41. <https://doi.org/10.14334/wartazoa.v28i1.1785>
- Endah Rita Sulistya Dewi. (2020). *Bioremediasi: Mikroorganisme sebagai Fungsi Bioremediasi pada Perairan Tercemar*. Universitas PGRI Semarang Press.
- Hendrasarie, N., & Novi Eka. (2011). Bioremediasi Lahan Tercemar Minyak Tanah dengan Metoda Biopile. *Jurnal Purifikasi*, 12(1), 29–38.
- Kurniawan, A., & Nuraeni Ekowati. (2016). Mikoremediasi Logam Berat. *Jurnal Bioteknologi Biosains Indoensia*, 3(1), 36–45. <https://www.researchgate.net/publication/308719710>
- Moch. Fierdaus. (2015). Pemulihan Tanah Tercemar dengan Teknik Bioremediasi Menggunakan *Bacillus* sp. dan *Pseudomonas* sp. *LEmbaran Publikasi Minyak Dan Gas Bumi*, 49(2), 111–118.
- Nabela Nur Hanifah, & Fitrihidajati, H. (2018). Bioremediasi Tanah Tercemar Minyak Bumi dengan Penambahan Kompos Berbahan Baku Limbah Cair Tahu dan Kulit Pisang. *LenteraBio*, 7(1), 61–65. <http://ejournal.unesa.ac.id/index.php/lenterabio>