

Mikroorganisme telah menjadi pilihan sejak lama sebagai salah satu alternatif dalam bidang mikrobiologi terapan yang dimanfaatkan pada aplikasi pengelolaan limbah dan dikenal sebagai bioremediasi. Seiring perkembangan jaman dan kemajuan dalam dunia penelitian, teknologi bioremediasi semakin maju sehingga metode ini menjadi semakin efektif. Pemecahan masalah lingkungan dengan menggunakan pendekatan bioteknologi merupakan sebuah peluang yang menjanjikan, karena sifatnya yang ramah lingkungan, cenderung mudah dilaksanakan, serta menjanjikan hasil yang efisien.

Perkembangan bioremediasi dan bioteknologi merupakan tantangan tersendiri bagi para peneliti, khususnya pada aspek keberagaman lingkungan, teknik yang digunakan, jenis kontaminan, hingga berbagai pendekatan dalam aplikasinya. Buku ini membahas prinsip dasar bioremediasi dan penerapannya dalam berbagai kasus, khususnya pada pencemaran yang terjadi pada air dan tanah di Indonesia. Berbagai contoh aplikasi bioremediasi juga disertakan agar pembaca dapat memahami implementasi bioremediasi di lapangan, serta dapat menganalisis kelebihan maupun kendala yang dijumpai pada berbagai kasus tersebut.

Buku ini merupakan produk dari skim penelitian perguruan antar perguruan tinggi (PKPT) antara Universitas Tribhuwana Tunggaladewi dan Universitas Negeri Malang tahun pendanaan 2018-2019.

Bioremediasi Limbah Industri

Pemanfaatan mikroba dalam pengolahan limbah industri



Bioremediasi Limbah Industri

Pemanfaatan mikroba dalam pengolahan limbah industri

Hasminar Rachman Fidiastuti, S.Si., S.Pd., M.Pd
 Chandra Adi Prabowo, S.Pd., M.Pd
 Anis Samrotul Lathifah, S.Pd., M.Pd
 Prof. Dr. agr. H. Mohamad Amin, S.Pd., M.Si
 Dr. Drs. Yudhi Utomo, M.Si

BIOREMEDIASI LIMBAH INDUSTRI

Pemanfaatan Mikroba Dalam Pengolahan Limbah Industri

Hasminar Rachman Fidiastuti, S.Si., S.Pd., M.Pd

Anis Samrotul Lathifah, S.Pd., M.Pd

Prof. Dr. agr. H. Mohamad Amin, S.Pd., M.Si

Dr. Drs. Yudhi Utomo, M.Si

Chandra Adi Prabowo, S.Pd., M.Pd



Penerbit Forind

BIOREMEDIASI LIMBAH INDUSTRI

Pemanfaatan Mikroba Dalam Pengolahan Limbah Industri

Copyright © 2019 by:

Hasminar Rachman Fidiastuti, S.Si., S.Pd., M.Pd

Anis Samrotul Lathifah, S.Pd., M.Pd

Prof. Dr. agr. H. Mohamad Amin, S.Pd., M.Si

Dr. Drs. Yudhi Utomo, M.Si

Chandra Adi Prabowo, S.Pd., M.Pd

ISBN: 978-602-61177-5-5

Desain Sampul & Layout:

Hermawan Purwanto, ST

Diterbitkan oleh Forind

Jl. Raya Tlogomas 05 No. 24 Tlogomas

Malang Jawa Timur

Malang: Forind, Juli 2019

14,8 x 21 cm

vi + 90 hlm

Hak cipta dilindungi undang-undang. Dilarang memperbanyak buku ini sebagian atau seluruhnya, dalam bentuk dan dengan cara apapun juga, baik secara mekanis maupun elektronik, termasuk fotokopi, rekaman, dan lain-lain tanpa izin tertulis dari penerbit.

Kata Pengantar

Pemecahan masalah lingkungan dengan pendekatan bioteknologi menjadi sebuah pilihan di masyarakat karena selain ramah lingkungan juga murah, mudah dan efisien. Bioremediasi adalah salah satu aplikasi bioteknologi terutama pada bidang mikrobiologi terapan dalam pemecahan pengolahan limbah. Walaupun mikroorganisme telah sejak lama dimanfaatkan sebagai alternatif dalam upaya pengolahan limbah organik maupun bahan kimia berbahaya, dan dalam beberapa dekade terakhir bioremediasi mulai digunakan secara masif khususnya dalam bidang industri, Hal ini seiring dengan perkembangan teknologi bioremediasi yang semakin maju sehingga menyebabkan metode ini menjadi semakin efektif dan terjangkau dalam upaya membersihkan tanah maupun air yang terkontaminasi berbagai senyawa yang membahayakan lingkungan.

Bioremediasi juga menjadi salah satu bidang yang banyak dikembangkan dalam kegiatan penelitian akademis, pemerintahan, maupun industri. Hasilnya, perkembangan bioremediasi menjadi semakin pesat khususnya pada aspek efektivitas dan ekonominya. Dampak lain dari perkembangan bioremediasi adalah meningkatnya minat dalam mempelajari bidang 'mikrobiologi lingkungan' yaitu sebuah bidang multidisiplin yang merupakan interaksi

sejumlah disiplin ilmu seperti fisiologi mikroba, ekologi, genetika molekuler, kimia organik, biokimia, geologi, hidrologi, dan teknik (engineering).

Perkembangan bioremediasi menjadi tantangan tersendiri bagi para peneliti untuk tetap mengikuti perkembangan teknologi bioremediasi yang makin pesat khususnya pada aspek keberagaman lingkungan dan jenis kontaminan serta berbagai pendekatan dalam bioremediasi. Bidang ini memerlukan lebih banyak ilmuwan yang memahami implikasi penggunaan berbagai pendekatan bioremediasi serta dapat berkolaborasi secara multidisiplin untuk pengembangan teknik bioremediasi yang lebih efektif.

Buku ini membahas mengenai prinsip dasar bioremediasi dalam berbagai kasus khususnya pada pencemaran air dan tanah. Berbagai contoh pengolahan limbah juga disertakan pada bagian akhir agar pembaca dapat memahami implementasi bioremediasi di lapangan serta dapat menganalisis kelebihan maupun kendala yang ditemui dalam berbagai contoh kasus tersebut.

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Kemenristekdikti atas dukungan dana penelitian skim Penelitian Kerjasama Antar Perguruan Tinggi (PKPT) yang hasilnya menjadi bagian dalam penulisan buku ini. Semoga buku ini dapat memberikan manfaat bagi pembacanya.

Malang, Juli 2019

Penulis

DAFTAR ISI

Kata Pengantar (iii)

Daftar Isi (v)

- Bab 1 Pendahuluan (1)
- Bab 2 Prinsip Dasar Bioremediasi (7)
- Bab 3 Peran Mikroba dalam Bioremediasi (16)
- Bab 4 Teknik-Teknik Bioremediasi (27)
- Bab 5 Faktor-Faktor yang Mempengaruhi Keberhasilan Bioremediasi (35)
- Bab 6 Aplikasi Bioremediasi (40)
- Bab 7 Bioremediasi Limbah Industri Penyamakan Kulit di Malang (54)
- Bab 8 Bioremediasi Limbah Cair Kain Batik Tulungagung (60)
- Bab 9 Bioremediasi Insektisida Jenis Chlorpyrifos secara In Vitro (65)
- Bab 10 Aplikasi Pemanfaatan Mikroorganisme Hasil Rekayasa Genetik dalam Bioremediasi (70)
- Bab 11 Biodegradasi Plastik & Inovasi Plastik Biodegradable (74)

Daftar Pustaka (77)

Tentang Penulis (88)

BIOREMEDIASI LIMBAH INDUSTRI

Pemanfaatan Mikroba Dalam Pengolahan Limbah Industri

PENDAHULUAN

Pertumbuhan jumlah populasi penduduk bumi yang tidak terkontrol saat ini berdampak pada meningkatnya eksploitasi sumber daya alam untuk mencukupi semakin tingginya kebutuhan terhadap makanan, energi, dan kebutuhan pokok lain. Revolusi industri adalah salah satu respon manusia dari meningkatnya kebutuhan tersebut. Namun, revolusi industri juga menghasilkan masalah baru berupa limbah kimia dalam jumlah yang sangat besar yang dapat mencemari lingkungan dan berdampak pada ketidakseimbangan ekosistem. Umumnya limbah kimia akan bertahan lama di lingkungan karena sulit didegradasi. Polusi air tanah terutama yang disebabkan oleh industrialisasi dan urbanisasi yang semakin berkembang, tidak lagi memperhatikan konsekuensi yang terjadi pada lingkungan. Berdasarkan hasil penelitian oleh *The Environmental Protection Agency* (EPA) hanya sekitar 10% limbah industri yang aman untuk dibuang ke lingkungan (Reddy & Mathew, 2001). Migrasi limbah dari sumber asal (tempat pembuangan limbah akhir) akan menimbulkan resiko yang tinggi terhadap

sumber air tanah, jika tidak dikelola secara memadai (Abhishek *et al.*, 2018).

Perlindungan air tanah menjadi masalah utama dalam pengelolaan lingkungan, karena pentingnya kualitas air dalam indikator kesehatan manusia menarik banyak perhatian belakangan ini. Kualitas air tanah serta pengembangan strategi untuk melindungi akuifer dari kontaminasi menjadi penting dalam upaya perencanaan dan perancangan sumber daya air yang tepat. Kontaminasi pada air tanah umumnya berasal dari bahan kimia.

Bahan kimia baik yang bersifat organik maupun anorganik sebenarnya dapat didegradasi secara alami melalui aktivitas metabolisme mikroba yang disebut biodegradasi. Namun, terkadang hasil dari proses biodegradasi yang terjadi secara alami menghasilkan produk atau hasil samping yang justru membahayakan lingkungan sehingga perlu untuk dipelajari dan dikendalikan dampaknya. Contohnya, polutan berupa xenobiotik secara alami dapat mengalami proses mineralisasi melalui bantuan mikroba yaitu perubahan menjadi produk yang teroksidasi sempurna seperti karbondioksida, berubah menjadi senyawa lain yang bersifat ramah lingkungan atau justru membahayakan, terakumulasi dalam tubuh organisme hidup, atau terpolimerisasi yaitu berikatan dengan senyawa lain seperti tanah, sedimen, atau air.

Sumber pencemaran selain yang berasal dari industri dan berdampak besar pada lingkungan misalnya pada kasus bencana alam, kecelakaan atau akibat kelalaian manusia. Contoh pencemaran yang berasal dari peristiwa kecelakaan dan bencana misalnya

tumpahan minyak *Exxon Valdez* yang menyebabkan kerusakan habitat laut dan hutan konifer di Kanada dan beberapa bagian benua eropa, pencemaran zat radioaktif di Chernobyl, dan kebocoran reaktor nuklir di Fukushima Jepang.

Para ahli terus berupaya untuk mencari cara menyelesaikan masalah pencemaran lingkungan oleh zat kimia dengan cara yang ramah lingkungan dengan pendekatan bioteknologi.

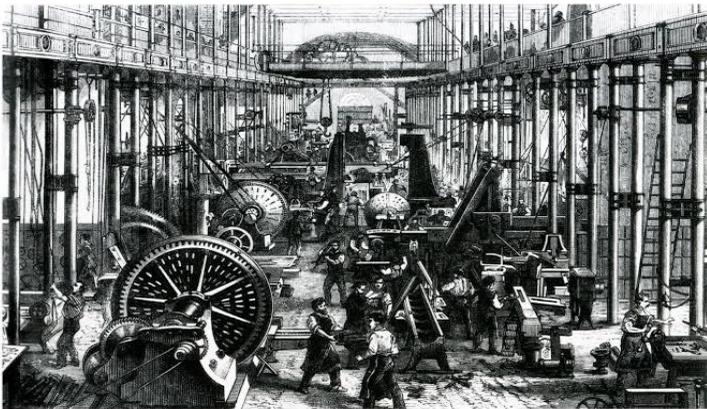
Bioteknologi adalah cabang ilmu yang mempelajari pemanfaatan makhluk hidup (bakteri, fungi, virus, dan lain-lain) maupun produk dari makhluk hidup (enzim, alkohol) dalam proses produksi untuk menghasilkan barang dan jasa. Bioteknologi secara umum berarti meningkatkan kualitas suatu organisme melalui aplikasi teknologi. Aplikasi teknologi tersebut dapat memodifikasi fungsi biologis suatu organisme dengan menambahkan gen dari organisme lain atau merekayasa gen pada organisme tersebut. Selain itu bioteknologi juga memanfaatkan sel tumbuhan atau sel hewan yang dibiakkan sebagai bahan dasar sebagai proses industri.

Prinsip-prinsip bioteknologi telah digunakan untuk membuat dan memodifikasi tanaman, hewan, dan produk makanan. Bioteknologi yang menggunakan teknologi yang masih sederhana ini disebut bioteknologi konvensional atau tradisional. Penerapan bioteknologi konvensional ini sering diterapkan dalam pembuatan produk-produk makanan. Seiring dengan perkembangan dan penemuan dibidang molekuler maka teknologi yang digunakan dalam bioteknologi pada saat ini semakin canggih. Bioteknologi

yang menggunakan teknologi canggih ini disebut bioteknologi modern.

Mikroba berperan utama dalam bioteknologi. Dalam masalah-masalah lingkungan bioteknologi mikroba memberikan sumbangan besar antara lain dalam produksi biopestisida, pupuk biologis, pengkomposan, penanganan limbah, produksi biogas, penambahan minyak dan pelindihan logam.

Peran tersebut dapat menggantikan teknologi yang selama ini digunakan dan memberi sumbangan bagi perbaikan kualitas lingkungan. Ancaman sisa pestisida, cemaran senyawa toksik, penurunan kualitas tanah dapat dikurangi dengan memanfaatkan mikroba indigen untuk mengolah limbah dan pencemaran bahan toksik tersebut dikenal dengan istilah bioremediasi.



Gambar 1.1 Revolusi Industri di Eropa

Bioremediasi adalah pemanfaatan reaksi biodegradatif mikroba untuk menurunkan bahkan menghilangkan atau detoksifikasi

polutan yang mencemari lingkungan dan mengancam kesehatan, umumnya berupa kontaminan pada air dan tanah. Teknologi biodegradasi sebenarnya telah ditemukan sejak lama, namun baru dalam beberapa dekade terakhir upaya serius memanfaatkan kemampuan biodegradasi alami dengan tujuan untuk restorasi lingkungan yang efektif dan terjangkau dikembangkan.



Gambar 1.2 Limbah pewarnaan batik menyebabkan aliran sungai berwarna hitam (Sumber: dokumen pribadi)

Perkembangan ini membutuhkan kombinasi penelitian laboratorium dasar untuk mengidentifikasi dan mengkarakterisasi proses biologis yang paling efektif, pengembangan skala percobaan dan pengujian teknologi bioremediasi baru, meyakinkan pemerintah dan masyarakat mengenai manfaat bioremediasi, hingga akhirnya

aplikasi lapangan untuk mengetahui bahwa proses bioremediasi efektif, aman, dan dapat diprediksi dampaknya.

Levin dan Gealt (1993) memperkirakan biaya yang diperlukan dalam proses bioremediasi kontaminan pada tanah hanya berkisar antara 40 hingga 100 dolar per meter³ jika dibandingkan dengan teknik lain seperti insinerasi (pembakaran) yang menghabiskan 250 hingga 800 dolar per meter³ atau *landfilling* (penimbunan) yang dapat memakan biaya hingga 150-250 dolar per meter³. Rendahnya biaya yang diperlukan dalam proses bioremediasi menyebabkan banyak ahli dan pemerintah yang mulai mempertimbangkan potensi bioremediasi sebagai alternatif pengolahan limbah yang lebih murah.

PRINSIP DASAR BIOREMEDIASI

Aplikasi bioremediasi sebagai sebuah proses bioteknologi yang melibatkan mikroorganisme telah menjadi salah satu kajian yang populer dalam bidang mikrobiologi karena semakin meningkatnya potensi untuk menyelesaikan permasalahan limbah melalui biodegradasi. Mikroorganisme mulai dipertimbangkan sebagai alternatif untuk membersihkan limbah dari air maupun tanah karena memiliki banyak keuntungan dibandingkan teknik pengelolaan limbah yang lain.

2.1. Pengertian Bioremediasi

Bioremediasi terdiri atas dua kata yaitu “bio” yang berarti hidup atau merujuk pada organisme hidup dan “remediasi” yang berarti tindakan atau proses penyembuhan yang merujuk pada proses menanggulangi permasalahan. Bioremediasi adalah pemanfaatan organisme hidup untuk mengatasi permasalahan lingkungan seperti pencemaran air dan tanah. Tujuan bioremediasi adalah untuk mendegradasi polutan menggunakan mikroorganisme

hidup agar tidak menimbulkan pencemaran lebih lanjut dan mengembalikan kondisi lingkungan seperti kondisi alaminya (Sasikumar dan Papinazath, 2003).

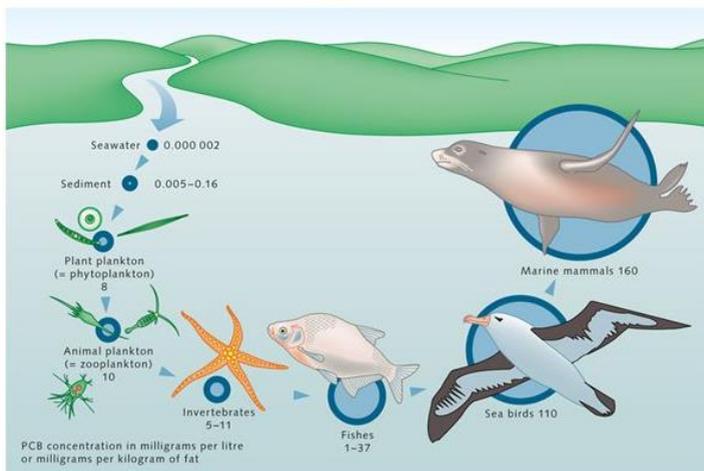
Prinsip dasar bioremediasi adalah proses membersihkan lingkungan dengan memanfaatkan aktivitas metabolik mikroorganisme yang merubah polutan menjadi zat lain yang tidak berbahaya melalui proses mineralisasi, pembentukan karbon (IV) oksida dan air, atau merubahnya menjadi biomassa mikroba (Sayler & Ripp, 2000). Polutan khususnya yang berasal dari industri sangat berbahaya apabila dibuang tanpa dilakukan pengolahan terlebih dahulu. Umumnya limbah industri mengandung bahan pencemar berbahaya seperti logam berat yang apabila langsung berinteraksi dengan ekosistem dapat menimbulkan berbagai dampak salah satunya bioakumulasi.

Prinsip aplikasi bioremediasi dapat dibagi menjadi tiga jenis metode yaitu pelemahan alami, bioaugmentasi, dan biostimulasi (Olaniran *et al.*, 2006). Metode pelemahan alami adalah jenis metode paling sederhana yaitu dilakukan dengan memonitor variasi konsentrasi populasi untuk memastikan transformasi limbah berjalan. Bioaugmentasi umumnya digunakan pada kasus dimana jumlah komunitas mikroba alami yang terdapat pada lokasi pencemaran terlalu sedikit atau bahkan tidak ada sehingga memerlukan penambahan mikroba ke lokasi. Sedangkan biostimulasi yaitu penambahan faktor lingkungan misalnya nutrisi pada lokasi pencemaran untuk mempercepat kerja mikroba alami dalam mendegradasi bahan pencemar.

2.2. Bioakumulasi

Bioakumulasi adalah istilah yang digunakan untuk menggambarkan penumpukan atau masuknya bahan kimia berbahaya dalam tubuh makhluk hidup. Bioakumulasi sering ditemukan pada ekosistem perairan dimana bahan kimia berbahaya seperti logam berat sisa limbah industri masuk ke tubuh ikan.

Limbah industri berupa logam berat seperti PCB, DDT, Dioksin, dan merkuri bersifat stabil dan sangat sulit terurai di lingkungan. Oleh karena itu, logam berat yang masuk ke ekosistem perairan akan berpotensi terakumulasi dalam tubuh ikan. Apabila ikan tersebut dimakan oleh manusia maka zat logam berat tersebut juga akan terakumulasi dalam tubuh sehingga menimbulkan berbagai masalah kesehatan. Salah satu alternatif untuk menguraikan limbah logam berat agar tidak membahayakan lingkungan adalah melalui bioremediasi.



Gambar 2.1 Proses terjadinya bioakumulasi

2.3. Biodegradasi sebagai Dasar Bioremediasi

Biodegradasi didefinisikan sebagai proses penguraian senyawa kimia yang dikatalis secara biologis. Biodegradasi juga dapat diartikan sebagai proses pemecahan senyawa organik kompleks menjadi senyawa yang lebih sederhana oleh organisme mikroskopis. Ketika biodegradasi selesai, proses tersebut disebut mineralisasi.

Untuk memahami proses biodegradasi diperlukan pemahaman mengenai mikroorganisme yang membuat proses tersebut bekerja. Mikroba merubah senyawa melalui proses metabolik atau enzimatis untuk dua tujuan, pertumbuhan dan kometabolisme. Pada proses pertumbuhan, polutan organik digunakan sebagai sumber karbon dan energi. Proses ini menghasilkan degradasi sempurna (mineralisasi) dari polutan. Kometabolisme didefinisikan sebagai metabolisme senyawa organik dengan keberadaan substrat pertumbuhan sebagai sumber energi dan karbon utama. Beberapa mikroorganisme yang melakukan proses biodegradasi meliputi fungi, bakteri, dan kapang namun jarang ditemukan pada alga dan protozoa. Proses biodegradasi sangat bervariasi namun umumnya menghasilkan produk berupa karbondioksida. Senyawa organik dapat didegradasi secara aerob (memerlukan oksigen) maupun anaerob (tidak melibatkan oksigen).

Senyawa yang dapat didegradasi oleh mikroba umumnya adalah senyawa organik yaitu senyawa yang berasal dari makhluk hidup atau material buatan yang memiliki struktur mirip dengan senyawa organik. Beberapa mikroorganisme secara mengejutkan juga diketahui mampu mendegradasi senyawa-senyawa meliputi

hidrokarbon (misalnya minyak), polychlorinated biphenyls (PCBs), polyaromatic hydrocarbon (PAHs), dan berbagai jenis logam (Leitao, 2009).

Hal yang perlu ditekankan adalah bioremediasi tidak sama dengan biodegradasi. Biodegradasi hanya salah satu mekanisme yang dapat diterapkan dalam upaya bioremediasi karena tidak semua kontaminan bersifat biodegradable dan saat ini baru beberapa jenis mikroorganisme saja yang diketahui memiliki kemampuan untuk mendegradasi polutan (Walsh, 1999). Oleh karena itu, penelitian untuk mengidentifikasi potensi biodegradasi mikroorganisme sangat penting untuk dilakukan saat ini.

2.4. Bioremediasi sebagai Solusi Mengatasi Pencemaran

Manusia telah mengenal teknik penggunaan mikroorganisme dalam pengolahan dan daur ulang limbah selama satu abad terakhir. Bioremediasi adalah teknologi baru yang ramah lingkungan untuk membersihkan lingkungan yang tercemar. Bioremediasi lebih mudah diterima oleh masyarakat karena pada prinsipnya adalah suatu proses alami sehingga lebih murah dan tidak menimbulkan efek samping yang bersifat negatif pada lingkungan. Mikroba pendegradasi polutan akan secara alami bertambah jumlahnya ketika terdapat polutan. Hasil samping dari proses teknik ini umumnya bersifat tidak membahayakan yang meliputi karbondioksida, air, dan biomassa sel.

Secara teoritis, terdapat cukup banyak agen bioremediasi di alam yang dapat digunakan untuk mendegradasi berbagai jenis

polutan. Bioremediasi merubah berbagai jenis zat yang berbahaya dan merugikan menjadi zat lain yang lebih ramah lingkungan sehingga jauh lebih efisien dan mudah dibandingkan memindahkannya dari satu tempat ke tempat yang lain yang justru berpotensi mencemari lingkungan lain, sebagai contoh yaitu polutan di darat dibuang ke laut. Agen bioremediasi juga memungkinkan untuk digunakan pada lingkungan diluar lingkungan aslinya tanpa menyebabkan gangguan pada proses alami yang terjadi pada lingkungan target. Teknik ini juga menyebabkan kita tidak memerlukan untuk memindahkan limbah keluar dari lingkungan yang juga berpotensi menimbulkan berbagai gangguan kesehatan selama proses pemindahan tersebut. Berbagai kelebihan tersebut menyebabkan bioremediasi lebih ekonomis secara biaya dan tenaga dibandingkan teknik penanganan pencemaran yang lain (Vidali, 2001).

Selain berbagai kelebihan yang telah disebutkan di atas, bioremediasi pada dasarnya memiliki dua kekurangan. Pertama yaitu hanya terdapat beberapa bakteri atau fungi yang memiliki kemampuan untuk bereaksi terhadap banyak jenis material organik dan zat kimia yang terdapat di alam. Kekurangan ini hanya dapat diatasi dengan melakukan *screening* untuk menemukan spesies mikroba baru dan mendeteksi potensinya dalam teknik bioremediasi.

Kekurangan lain adalah bioremediasi membutuhkan waktu yang tergolong cukup lama untuk dapat menunjukkan hasilnya. Terdapat beberapa solusi untuk mengatasi kekurangan tersebut.

Teknik rekayasa genetika adalah solusi paling instan untuk mengatasi permasalahan tersebut dengan cara memodifikasi strain agar proses bioremediasi berlangsung lebih cepat. Solusi lain adalah dengan menambahkan zat katalis reaksi pada lingkungan yang tercemar untuk membantu proses bioremediasi. Solusi ketiga adalah dengan mengombinasikan dua atau lebih mikroorganisme yang dapat saling mendukung proses bioaktivitas dari tiap agen bioremediasi. Solusi keempat dan yang paling sederhana adalah dengan memperbanyak populasi agen bioremediasi.

Bioremediasi hanya dapat dilakukan untuk pencemaran yang diakibatkan polutan yang bersifat *biodegradable* atau dapat diuraikan. Tidak semua jenis polutan dapat diuraikan dengan cepat dan sempurna, selain itu juga terdapat kekhawatiran produk biodegradasi justru dapat lebih berbahaya bagi lingkungan. Proses biologis umumnya bersifat sangat spesifik, dibutuhkan kondisi lingkungan yang mendukung, keberadaan populasi mikroba pengurai yang cukup, dan ketersediaan nutrisi untuk mikroba. Penelitian lebih lanjut diperlukan untuk mengembangkan teknologi bioremediasi yang sesuai untuk lingkungan dengan polutan yang kompleks. Bioremediasi umumnya juga membutuhkan waktu yang lebih lama dibandingkan teknik yang lain.



Gambar 2.2 Bioremediasi In Situ pada lahan yang tercemar

Bioremediasi meskipun dianggap sebagai salah satu solusi terbaik untuk mengatasi permasalahan lingkungan saat ini namun juga berpotensi menimbulkan permasalahan baru seperti penambahan zat katalis untuk mempercepat proses biologis mikroba yang dapat mengganggu organisme lain yang ada di lokasi tersebut. Selain itu, melepaskan organisme hasil rekayasa genetika secara langsung di lingkungan memiliki resiko tersendiri yaitu sulit untuk dimusnahkan kembali. Oleh karena itu, bioremediasi memerlukan kontrol yang sangat intensif dan memerlukan waktu yang cukup panjang untuk mendapatkan hasil yang dapat optimal.

Bioremediasi memiliki potensi sebagai salah satu teknik untuk mengatasi pencemaran lingkungan pada masa mendatang. Hal tersebut menyebabkan penting bagi kita untuk lebih mendalami mengenai populasi mikroba, pola interaksinya dengan lingkungan dan polutan, rekayasa genetika untuk mempercepat proses peng-

uraian, serta aspek keuntungan ekonomi dari bioremediasi untuk meningkatkan potensi bioremediasi. Tidak dapat dipungkiri bahwa bioremediasi menjadi salah satu kebutuhan di dunia modern saat ini untuk memelihara alam agar tetap terjaga untuk generasi selanjutnya.

PERAN MIKROBA DALAM BIOREMEDIASI

Bab ini akan membahas keterkaitan proses biodegradasi yang sangat berhubungan dengan metode bioremediasi lingkungan. Biodegradasi merupakan metode alami untuk mengolah limbah atau menguraikan senyawa organik menjadi nutrisi yang dapat digunakan kembali oleh organisme lain. Dalam mikrobiologi, biodegradasi berarti pemecahan senyawa organik yang dilakukan oleh berbagai jenis makhluk hidup khususnya bakteri, fungi, yeast, atau makhluk hidup lain.

Bioremediasi dan biotransformasi adalah metode yang memanfaatkan proses metabolisme mikroba yang sangat beragam di alam untuk mendegradasi, mentransformasi, berbagai jenis senyawa seperti hidrokarbon (misalnya minyak), polychlorinated biphenyls (PCBs), polyaromatic hydrocarbos (PAHs), radioaktif, dan berbagai jenis logam berat.

3.1. Jenis-Jenis Polutan Biodegradable

Sejak revolusi industri, berbagai senyawa organik beracun disintesis dan dibuang ke lingkungan baik secara langsung maupun tidak langsung. Senyawa organik beracun yang umumnya ditemukan meliputi tumpahan bahan bakar fosil, PCB, PAH, pestisida, logam berat dan berbagai jenis pewarna. Beberapa jenis bahan kimia sintetis seperti radioaktif dan logam bahkan bersifat sangat resisten terhadap flora normal dibandingkan dengan senyawa organik alami. Berikut ini beberapa senyawa organik yang bersifat *biodegradable*:

1. Hidrokarbon

Hidrokarbon adalah senyawa organik yang terbentuk dari ikatan hidrogen dan karbon. Hasil pengamatan menunjukkan hidrokarbon dapat berbentuk linier, bercabang atau melingkar. Contoh senyawa hidrokarbon yaitu benzena (C_6H_6) yang terdiri atas tiga jenis bentuk yaitu alkana, alkena dan alkyna (McMurry, 2000).

2. *Polycyclic aromatic hydrocarbons* (PAHs)

Jenis polutan ini termasuk dalam kelas kontaminan organik hidrofobik yang umumnya ditemukan di udara dan tanah. Sumber pencemaran PAHs umumnya berasal dari asap pabrik. PAHs dapat meresap pada tanah, terakumulasi pada tubuh ikan dan organisme air lain, dan beresiko masuk ke tubuh manusia melalui konsumsi seafood yang terkontaminasi.

3. *Polychlorinated biphenyls* (PCBs)

Merupakan larutan kimia organik sintetik. PCB bersifat tidak mudah terbakar, stabil, titik didih tinggi, dan bersifat isolator sehingga banyak digunakan dalam pembuatan alat listrik, peralatan hidrolis, bahan campuran cat, plastik, dan produk berbahan dasar karet. Namun, PCB adalah senyawa yang sangat beracun dan dapat menyebabkan penyakit kanker. Hal tersebut menyebabkan kekhawatiran mengenai semakin tingginya kandungan limbah PCB di lingkungan (Seger et al., 2010).

4. Pestisida

Pestisida adalah sejenis bahan yang digunakan untuk mengendalikan, menolak, atau membasmi berbagai organisme pengganggu. Jenis degradasi pestisida yang paling umum ditemukan terjadi pada tanah oleh fungi dan bakteri yang menggunakan pestisida sebagai sumber makanan.



Gambar 3.1 Penggunaan pestisida dapat mencemari lingkungan

5. Pewarna Tekstil

Bahan pewarna umumnya digunakan dalam industri tekstil, karet, percetakan, fotografi, farmasi, kosmetik, dan berbagai jenis industri lain (Raffi, et al., 1997). Zat pewarna umumnya sulit untuk mengalami biodegradasi karena strukturnya yang kompleks serta pengolahan air yang terkontaminasi zat pewarna umumnya memerlukan perlakuan secara fisik atau kimiawi meliputi metode penyerapan, koagulasi, oksidasi, penyaringan, dan elektrokimia (Verma & Madamwar, 2003).

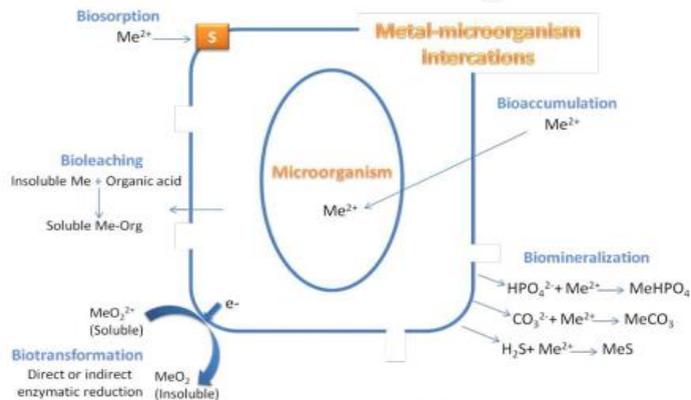
6. Radionuklida

Radionuklida adalah sebuah atom dengan inti tidak stabil yang ditandai dengan kelebihan energi sehingga membentuk radiasi disekitar inti atau melalui konversi internal. Selama proses tersebut sebuah nukleida disebut berada dalam fase radioaktif yang memancarkan sinar gamma dan partikel subatomik lain meliputi sinar alpha atau beta.

7. Logam Berat

Berbeda dengan kontaminan organik, logam tidak dapat dihancurkan tapi dirubah menjadi bentuk yang lebih stabil. Bioremediasi logam dapat dilakukan dengan biotransformasi. Mekanisme bioremediasi logam meliputi *biosorption* (penyerapan logam pada permukaan sel melalui mekanisme fisiokimia), *bioleaching* (mobilisasi logam berat melalui ekskresi asam organik atau reaksi metilasi), biomineralisasi (logam berat membentuk sulfida insolubel atau kompleks polimer), akumulasi intraseluler, transformasi melalui bantuan enzim (reaksi redoks) (Lloyd &

Lovely, 2001). Proses yang terjadi pada mikroorganisme pada bioremediasi logam terangkum pada Gambar 3.1.



Gambar 3.2 Daur biodegradasi logam oleh mikroorganisme

3.2. Biodegradasi Bakteri

Bakteri adalah jenis mikroba yang telah diketahui secara luas memiliki kemampuan untuk mendegradasi limbah. Setiap jenis limbah umumnya didegradasi oleh jenis bakteri yang spesifik.

1. Hidrokarbon

Jenis bakteri yang memiliki kemampuan untuk mendegradasi hidrokarbon disebut *hydrocarbon-degrading bacteria* (Yakimov, et al., 2007). Biodegradasi hidrokarbon dapat berlangsung baik pada kondisi aerob maupun anaerob. Namun, hasil penelitian Wiedemeier *et al.* (1995) menunjukkan biodegradasi secara anaerob lebih sering ditemukan. Saat ini diketahui terdapat 10 genus bakteri pendegradasi hidrokarbon yaitu: *Bacillus*, *Corynebacterium*, *Staphylococcus*, *Streptococcus*, *Shigella*, *Alcaligenes*,

Acinetobacter, *Escherichia*, *Klebsiella* dan *Enterobacter* (Floodgate, 1984; Kafilzadeh *et al.*, 2011).

2. Hidrokarbon Aromatik

Strain bakteri yang mampu mendegradasi hidrokarbon aromatic, saat ini banyak diisolasi dari tanah. Umumnya berasal dari golongan bakteri gram negatif dan termasuk dalam genus *Pseudomonas*. Beberapa penelitian juga telah menemukan jalur biodegradatif hidrokarbon aromatik pada bakteri dari genus *Mycobacterium*, *Corynebacterium*, *Aeromonas*, *Rhodococcus* dan *Bacillus* (Mrozik *et al.*, 2003).

Meskipun beberapa jenis bakteri diketahui memiliki kemampuan metabolisme polutan organik, satu jenis bakteri saja tidak memiliki cukup kemampuan untuk mendegradasi seluruh senyawa organik pada suatu lokasi yang tercemar. Gabungan dari beberapa komunitas bakteri memiliki potensi yang jauh lebih efektif karena dibutuhkan lebih dari satu informasi genetik untuk mendegradasi berbagai jenis senyawa organik kompleks yang terdapat pada lokasi pencemaran.

3. PCB

PCB adalah senyawa yang dapat mengalami biotransformasi dengan bantuan bakteri aerob maupun anaerob. PCB dengan kandungan klorin bifenil rendah umumnya dioksidasi oleh bakteri aerobik (Seeger *et al.*, 2001). Penelitian mengenai bakteri aerob saat ini lebih banyak terfokus pada bakteri gram negatif khususnya pada genus *Pseudomonas*, *Burkholderia*, *Ralstonia*, *Achromobacter*, *Sphingomonas*, dan *Comamonas*.

4. Pestisida

Uji coba membersihkan beberapa jenis pestisida dengan menggunakan bakteri telah banyak berhasil dilakukan, salah satunya yaitu biodegradasi atrazine, salah satu jenis pestisida yang paling banyak digunakan saat ini (Struthers *et al.*, 1998). Penelitian terkini menemukan beberapa jenis bakteri pendegradasi pestisida meliputi *Providencia stuartii* yang mampu mendegradasi chlorpyrifos serta *Bacillus*, *Staphylococcus*, dan *Stenotrophomonas* yang menggunakan DDT sebagai bagian dari proses metabolismenya (Kanade *et al.*, 2012).

5. Bahan Pewarna Tekstil

Penelitian mengenai kemampuan bakteri untuk mendegradasi bahan pewarna tekstil telah banyak dipublikasikan (Dos Santos *et al.*, 2007). Biodegradasi pewarna tekstil oleh bakteri secara anaerob diketahui lebih efektif dibandingkan jika dilakukan dalam kondisi aerob. Namun, biodegradasi secara anaerob menyebabkan terbentuknya *aromatic amine* yang bersifat mutagen dan beracun bagi manusia. Untuk mengatasi kondisi tersebut, diperlukan kombinasi perlakuan secara aerob dan anaerob. Chaube *et al.* (2010) menggunakan kombinasi strain bakteri yang terdiri atas *Proteus sp.*, *Pseudomonas sp.* dan *Enterococcus sp.* dalam proses biodegradasi pewarna tekstil. Teknik kombinasi bakteri memiliki kekurangan yaitu sulitnya memprediksi efek dari proses biodegradasi.

Peneliti sebenarnya telah berhasil mengidentifikasi satu jenis bakteri yang mampu mendegradasi pewarna tekstil secara

efektif yaitu *Shewanella decolorations* (Hong *et al.*, 2007). Tidak seperti teknik kombinasi, penggunaan kultur murni memiliki beberapa keuntungan yaitu lebih terprediksi dampaknya dan kemungkinan monitoring aktivitas mikroba menggunakan metode molekuler untuk menghitung kepadatan populasi bakteri yang tumbuh.

6. Logam Berat

Logam berat adalah senyawa yang tidak dapat dihancurkan secara biologis tapi hanya dapat dirubah menjadi bentuk lain yang tidak berbahaya (Garbisu & Alkorta, 2001). Mikroorganisme umumnya mengembangkan kemampuan untuk melindungi diri dari racun logam berat melalui berbagai mekanisme seperti metilasi, oksidasi, dan reduksi.

Reduksi logam yaitu bakteri menggunakan logam sebagai penerima elektron pada proses respirasi anaerob. Contohnya, adalah reduksi Cr(VI) yang sangat beracun menjadi Cr(III) yang lebih ramah lingkungan. Metilasi mikroba mempunyai peran penting dalam proses bioremediasi logam berat. Contoh metilasi yaitu Merkuri atau Hg(II) dapat dimetilasi oleh beberapa jenis bakteri seperti *Alcaligenes faecalis*, *Bacillus pumilus*, dan *Brevibacterium iodinium* menjadi gas metil merkuri.



Gambar 3.3 Pertambangan emas liar yang menggunakan merkuri

3.3. Biodegradasi Mikrofungi dan Mychorrhiza

Mikrofungi adalah kelompok mikroorganisme aerob dari golongan eukariot yang terdiri atas yeast/kapang uniseluler hingga molds/jamur dengan miselium. Kapang adalah kelompok fungi bersel tunggal yang terkadang membentuk *pseudomiselium* sedangkan molds umumnya tumbuh sebagai miselium yang membentuk hifa.

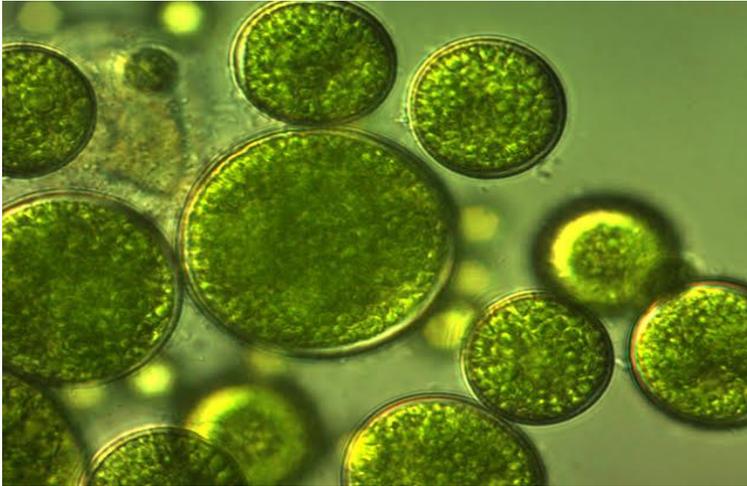
Fungi memiliki peran penting dalam proses biodegradasi. Sama seperti bakteri, fungi menguraikan senyawa organik di alam dan diketahui sebagai organisme yang paling berperan dalam penguraian karbon di biosfer. Kelebihan fungi dibandingkan bakteri adalah kemampuannya untuk hidup pada lingkungan yang memiliki tingkat kelembapan serta pH rendah. Fungi memiliki multienzim ekstraseluler yang sangat efektif dalam mendegradasi senyawa polimer alami. Selain itu, fungi dapat berkolonisasi dan

menyerap nutrisi pada substrat dengan cepat menggunakan miseliumnya (Matavuly & Molitoris, 2009).

Mycorrhiza adalah simbiosis antara fungi dengan akar tumbuhan. Fungi membentuk koloni pada akar tumbuhan inang. Mycorrhiza berperan penting dalam menjaga keseimbangan kandungan tanah. Bioremediasi menggunakan mycorrhiza disebut *mycorrhiza remediation*. Fungi memiliki kemampuan degradasi yang mampu menguraikan polimer seperti lignin dan menghilangkan limbah yang berbahaya bagi lingkungan.

3.4. Biodegradasi Alga dan Protozoa

Alga dan protozoa adalah komponen penting dalam ekosistem akuatik maupun terestrial yang diketahui berperan dalam proses biodegradasi hidrokarbon. Walker *et al.* (1975) mengisolasi spesies alga *Prototheca zopfi* yang memiliki kemampuan untuk mendegradasi tumpahan minyak dan berbagai jenis substrat hidrokarbon. Cerniglia & Gibson (1975) menemukan setidaknya terdapat sembilan jenis cyanobacteria, lima alga hijau, satu alga merah, satu alga coklat, dan dua jenis diatom yang mampu mengoksidasi naphthalene.



Gambar 3.4 Alga hijau yang mampu mengoksidasi naphthalene

Protozoa memiliki karakteristik yang berbeda dibandingkan alga. Berbanding terbalik dengan alga, protozoa tidak mampu menguraikan hidrokarbon. Keberadaan populasi protozoa juga diketahui dapat menghambat pertumbuhan bakteri pendegradasi hidrokarbon sehingga keberadaannya dalam sistem biodegradasi tidak selalu menguntungkan. Hasil penelitian Rogerson & Berger (1981) menunjukkan alga dan protozoa tidak berasosisasi dengan proses biodegradasi minyak bumi. Berdasarkan keterbatasan bukti tersebut alga dan prozoa dianggap tidak terlalu berperan dalam proses biodegradasi di lingkungan.

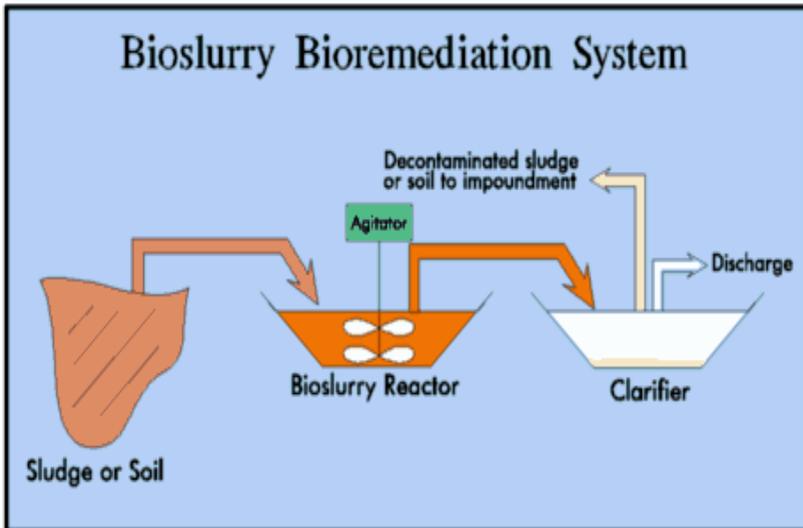
TEKNIK-TEKNIK BIOREMEDIASI

Bioremediasi dapat diaplikasikan pada lingkungan yang tercemar melalui beberapa pendekatan sesuai dengan kondisi lingkungan yang tercemar. Litchfield (1991) mengemukakan lima pendekatan umum dalam teknik bioremediasi: bioreaktor, *solid phase treatment*, komposting, landfarming, dan *in situ*. Kelima pendekatan tersebut telah mencakup hampir semua jenis teknik bioremediasi yang ada saat ini.

4.1. Bioreaktor

Bioremediasi dengan bioreaktor digunakan untuk pengolahan limbah cair, uap, dan padat (dalam bentuk *slurry* atau lumpur). Teknik ini dapat menggunakan mikroorganisme tunggal atau kombinasi; populasi mikroba asli (indigen); kultur mikroba murni yang diisolasi; atau mikroorganisme hasil rekayasa genetika yang dirancang khusus menangani masalah yang dihadapi. Mikroorganisme yang digunakan dalam teknik ini harus dapat hidup dengan atau tanpa tambahan oksigen atau akseptor elektron lainnya (nitrat, karbon dioksida, sulfat, logam teroksidasi) dan

nutrisi (nitrogen, fosfor, atau mineral tertentu). Variabel lain yang harus diperhitungkan meliputi tingkat pencemaran, pH, dan suhu. Kelebihan bioreaktor dibandingkan dengan teknik bioremediasi lainnya adalah dapat dikendalikan dan prosesnya dimodelkan secara matematis dengan ketepatan yang tinggi.



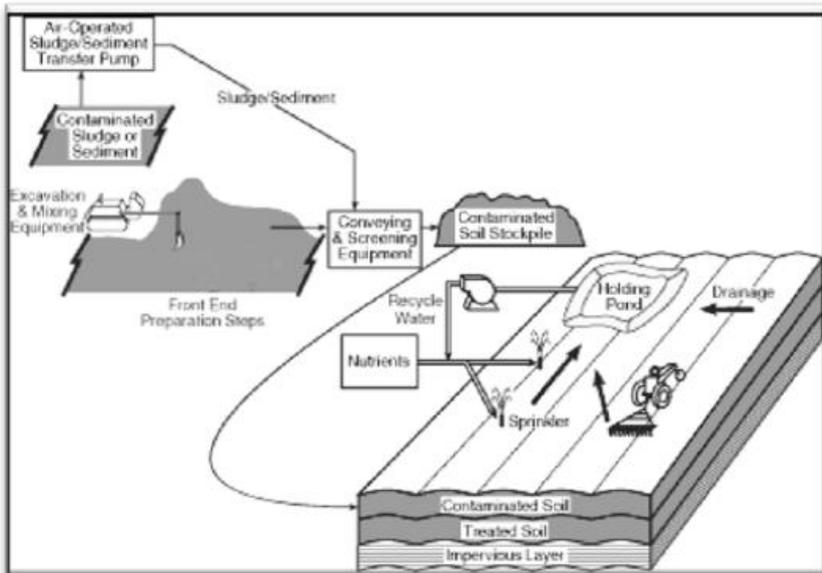
Gambar 4.1. Skema penggunaan bioreaktor dalam sistem bioremediasi

4.2. Solid Phase Treatment

Pencemaran tanah umumnya diatasi dengan teknik *solid-phase treatment*. Teknik ini dilakukan dengan menempatkan tanah yang terkontaminasi pada suatu sistem tertutup, kemudian ditambahkan air dan nutrisi tertentu. Penambahan oksigen terkadang perlu dilakukan tergantung pada proses bioremedial yang didukung.

Inokulum mikroba kemudian ditambahkan apabila populasi mikroba asli/ indigen tidak dapat menghilangkan polutan.

Solid-phase treatment umumnya digunakan untuk tanah atau lahan yang terkontaminasi minyak bumi. Sehingga memerlukan pengolahan limbah yang bersifat in situ karena kendala dalam pemindahan tanah apabila dilakukan menggunakan teknik ex situ. Selain itu, biaya yang diperlukan untuk bioremediasi menggunakan bioreaktor akan jauh lebih terjangkau pada kasus pencemaran lahan. Contoh sebuah sistem bioremediasi tanah yang terkontaminasi minyak bumi ditunjukkan pada Gambar 4.2.



Gambar 4.2 Sistem bioremediasi dengan solid-phase treatment

4.3. Pengomposan

Teknik pengomposan adalah variasi lain dari teknik *solid-phase* yaitu melalui penambahan materi organik dalam jumlah besar, kemudian dilakukan inkubasi secara aerob selama beberapa minggu atau bulan. Hal yang perlu diperhatikan dalam teknik pengomposan adalah mengenai rasio karbon dan nitrogen karena sangat menentukan keberhasilan proses bioremediasi. Teknik ini memerlukan peralatan khusus yaitu alat yang dapat merubah limbah organik menjadi kompos yang sangat bermanfaat bagi kesuburan tanah.

Pengomposan dapat dilakukan pada suhu mesofilik (20-30 ° C) atau suhu termofilik (50-60 ° C). Tumpukan kompos umumnya mengandung mikrohabitat aerob dan anaerob yang mendorong pertumbuhan jamur, cacing, dan eubakteria. Dengan demikian, proses biodegradatif yang terjadi dalam sistem ini bisa sangat kompleks. Misalnya, beberapa senyawa xenobiotik dipolimerisasi ke dalam kompartemen organik tanah (Williams, Ziegenfuss & Sisk, 1992). Pengomposan adalah teknologi yang tingkat keefektifannya belum terukur secara pasti. Namun, teknologi ini menunjukkan potensi yang cukup besar untuk beberapa aplikasi bioremediasi khususnya pada kasus pencemaran tanah.

4.4. Landfarming

Teknik *landfarming* yaitu tanah, endapan, atau sedimen yang terkontaminasi diolah dengan cara yang hampir sama dengan cara petani membajak dan menyuburkan tanah pertanian. Teknik ini

telah banyak digunakan karena prosesnya yang murah dan efektif untuk perawatan bahan yang terkontaminasi bahan kimia atau minyak bumi. Tidak semua jenis pencemaran dapat menggunakan teknik ini. *Landfarming* hanya digunakan untuk pencemaran bahan kimia yang mudah terurai secara hayati. Selain itu, hal yang perlu diperhatikan adalah kemungkinan terjadinya kontaminasi ke air tanah, sehingga harus dipastikan bahwa aliran air tanah harus berada jauh di bawah lokasi *landfarming* atau setidaknya terdapat beberapa jenis lapisan pengikat (tanah liat) atau lapisan penahan antara lokasi *landfarming* dan air tanah. Lokasi *landfarming* harus memperhatikan ketersediaan air dan pada beberapa jenis kontaminasi juga diperlukan pemupukan nitrogen atau fosfor.



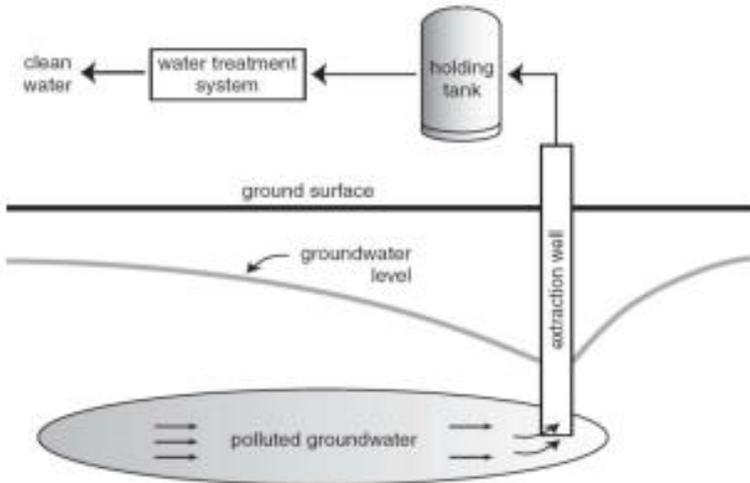
Gambar 4.3 Landfarming pada lahan yang terkontaminasi minyak bumi

4.5. Bioremediasi In Situ

Metode in situ adalah aplikasi bioremediasi pada lingkungan yang tercemar secara langsung di lokasi tanpa memindahkan objek yang tercemar. Bioremediasi jenis ini umumnya dilakukan pada

area yang terkontaminasi bahan kimia atau radioaktif. Metode ini adalah yang paling sering digunakan karena menghemat biaya transportasi dan umumnya menggunakan mikroba yang tidak membahayakan lingkungan. Metode in situ umumnya digunakan untuk mengurai polutan pada tanah dan air. Terdapat beberapa teknik bioremediasi in situ yaitu teknik *pump and treat*, *flooding*, *bioventing*, dan *bioslurping*.

Teknik *pump and treat* digunakan untuk membersihkan seluruh air yang terkontaminasi dari tanah atau lokasi pencemaran. Proses bioremediasi dapat dilakukan didalam atau diluar tempat pengolahan (plant) untuk kemudian air yang sudah diolah dialirkan kembali ke lokasi pencemaran (gambar 4.4).

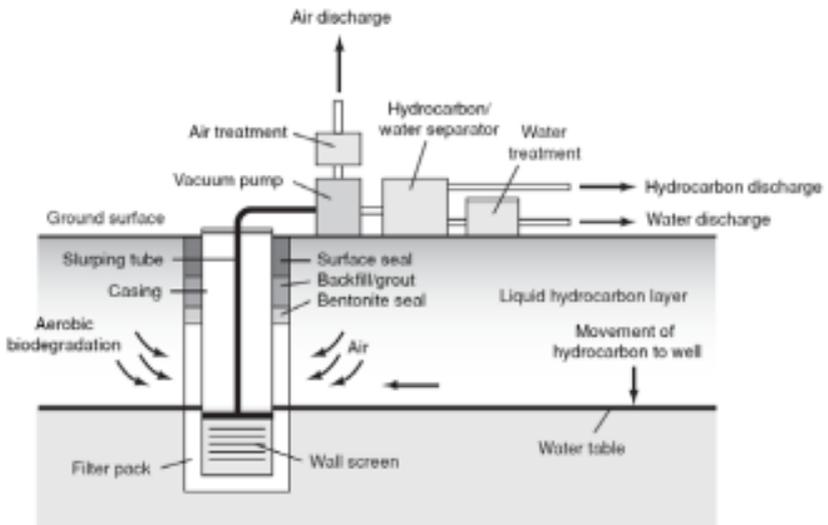


Gambar 4.4 Skema bioremediasi dengan metode pump and treat

Teknik *pump and treat* adalah teknik remediasi paling tradisional yang pernah digunakan. Teknik ini sudah jarang

digunakan karena dianggap sangat tidak efektif. Alasannya adalah teknik ini memerlukan investasi yang mahal dan waktu yang sangat panjang. Namun, kelebihan dari teknik ini adalah dapat membersihkan seluruh kontaminan selama jenis polutannya adalah polutan yang larut dalam air.

Bioslurping adalah teknologi bioremediasi in situ yang mengombinasikan teknologi vacuum dengan bioventing untuk dapat meremediasi air tanah yang terkontaminasi minyak dan hidrokarbon sekaligus. Teknologi ini bersifat portabel dan menggunakan sebuah pompa untuk mengekstrak air dan gas dari banyak sumur atau galian. Bioslurping umumnya digunakan di tempat pengeboran minyak dan terbukti paling efektif digunakan pada tanah dengan tekstur medium dengan kandungan air yang rendah.



Gambar 4.5 Teknologi bioslurping

Secara umum, kekurangan dari metode in situ adalah cenderung memerlukan waktu yang lebih lama dibandingkan metode yang lain, selain itu metode ini juga berpotensi adanya variasi aktivitas mikroba di lokasi karena terdapat faktor lingkungan yang tidak terkontrol. Kesuksesan bioremediasi ditentukan oleh keberadaan nutrisi dan energi untuk mikroba sehingga apabila mikroba bioremediasi tidak mendapat nutrisi yang cukup akibat adanya kompetisi dengan mikroba alami maka metode in situ menjadi kurang efektif untuk digunakan.

Terdapat dua jenis metode bioremediasi in situ berdasarkan asal mikroorganisme yang digunakan sebagai bioremediasi:

- (i) *Bioremediasi intrinsik*, yaitu jenis bioremediasi yang dilakukan tanpa penambahan mikroba dari luar lokasi pencemaran. Jenis bioremediasi ini memanfaatkan mikroba indigen atau mikroba alami yang memang hidup pada lokasi yang tercemar dengan cara meningkatkan nutrisi dan faktor pendukungnya agar populasinya bertambah banyak sehingga dapat menguraikan polutan pada lokasi tersebut.
- (ii) *Bioremediasi buatan*, yaitu bioremediasi yang dilakukan dengan mengintroduksi mikroba tertentu pada lokasi yang tercemar. Kondisi lingkungan yang tercemar umumnya tidak mendukung kehidupan mikroba yang diintroduksi maka sama seperti bioremediasi intrinsik lingkungan perlu dimodifikasi sedemikian rupa untuk menyediakan nutrisi yang cukup untuk pertumbuhan mikroba.

FAKTOR-FAKTOR YANG MEMPENGARUHI KEBERHASILAN BIOREMEDIASI

Prinsip paling mendasar dalam bioremediasi adalah mikroorganisme (umumnya fungi dan bakteri) mampu untuk menguraikan kontaminan berbahaya atau merubahnya menjadi bentuk yang lebih ramah lingkungan. Mikroorganisme menghasilkan enzim yang berperan sebagai biokatalis dan membantu proses biokimia untuk mendegradasi polutan. Oleh karena itu, teknik bioremediasi hanya dapat dilakukan pada lingkungan yang dapat mendukung kehidupan. Mikroorganisme dapat bekerja jika mendapatkan akses pada berbagai material atau zat yang membantu mereka membentuk energi dan nutrisi.

Kesesuaian karakteristik metabolisme mikroorganisme dengan sifat kimia polutan target memungkinkan dapat terjadinya interaksi mikroorganisme–polutan. Namun, interaksi tersebut hanya dapat terjadi bergantung pada kondisi ling-

kungan. Terdapat beberapa kendala yang harus diatasi agar teknik bioremediasi dapat dilakukan. Kendala tersebut adalah kendala jenis mikroorganisme, zat kimia, dan karakteristik lingkungan pada lokasi pencemaran.

5.1. Faktor Biotik

Faktor biologis pada dasarnya adalah terkait kemampuan metabolisme mikroba. Faktor biotik yang mempengaruhi proses degradasi mikroba meliputi hambatan aktivitas enzimatis dan perkembangbiakan mikroba. Penyebab terjadinya hambatan tersebut dapat disebabkan oleh beberapa faktor seperti adanya kompetisi antar mikroba dalam memperoleh sumber karbon yang terbatas, interaksi antagonis antar mikroba misalnya predasi oleh protozoa dan bakteriofage (Riser, 1998).

Kecepatan proses biodegradasi umumnya bergantung pada konsentrasi kontaminan dan banyaknya jumlah katalis yang tersedia. Katalis dalam konteks biodegradasi merujuk pada jumlah organisme yang mampu mendegradasi kontaminan termasuk kemampuan mikroba dalam menghasilkan enzim.

Keberhasilan proses bioremediasi juga ditentukan oleh ketepatan penggunaan jenis mikroorganisme (Neilson & Allard, 2008). Secara teori terdapat dua jenis mikroorganisme yaitu spesies alami dan hasil rekayasa genetika. Aplikasi

bioremediasi yang umum dilakukan adalah menggunakan populasi mikroba alami yang seringkali karakteristiknya tidak sesuai dengan kondisi pencemaran. Mikroba alami mungkin dapat efektif untuk menguraikan target polutan namun keseluruhan karakteristik populasi mikroba alami tersebut umumnya belum diketahui secara pasti. Hal tersebut penting untuk diperhatikan sebelum aplikasi karena terkait dengan dampak lain yang ditimbulkan mikroba tersebut pada lingkungan.

Genetically modified microorganisms (GMO) atau mikroorganisme hasil rekayasa genetika dianggap sebagai jenis mikroorganisme yang paling tepat digunakan dalam bioremediasi. Penemuan teknik rekombinasi DNA dan teknologi rekayasa genetika yang lain pada akhir tahun 1970 dipercaya dapat diaplikasikan untuk berbagai keperluan, salah satunya adalah membersihkan air dan tanah yang terkontaminasi (Romantschuk, dkk., 2000).

5.2. 5.Faktor Lingkungan

Kondisi lingkungan sangat mempengaruhi keberhasilan proses biodegradasi. Diperlukan analisis mendalam untuk memastikan untuk memastikan kondisi lingkungan mendukung proses biodegradasi. Beberapa faktor lingkungan yang mempengaruhi proses biodegradasi meliputi:

1. Kandungan Senyawa Kimia

Kandungan senyawa kimia berperan dalam mendukung proses metabolisme dan perkembangbiakan mikroba sehingga proses biodegradasi berlangsung dengan baik. Komponen senyawa kimia yang mendukung proses biodegradasi meliputi: COD, TOC, nitrogen, fosfor, serta kandungan logam.

2. pH

Proses biodegradasi umumnya berlangsung optimal pada pH netral. Namun, terdapat beberapa organisme yang berbeda misalnya fungi yang umumnya memerlukan kondisi lingkungan yang bersifat asam agar metabolisme dapat berjalan dengan baik.



Gambar 5.1 Mengetahui pH tanah sangat penting dalam persiapan proses bioremediasi

3. Suhu

Kebanyakan mikroorganisme yang diperlukan dalam proses biodegradasi limbah bersifat mesofil. Oleh karena itu, diperlukan suhu 25-37 °C agar mikroba dapat tetap hidup.

4. Ketersediaan Oksigen dan Nutrisi

Ketersediaan oksigen dan nutrisi merupakan komponen yang sulit untuk dimanipulasi. Bakteri yang memiliki kemampuan mendegradasi senyawa organik umumnya bersifat heterotrof dan memerlukan senyawa organik sebagai sumber karbon dan energi. Hal tersebut menyebabkan penambahan nutrisi tertentu diperlukan untuk meningkatkan pertumbuhan sel dan laju degradasi.

APLIKASI BIOREMEDIASI

Tahap pertama yang harus dilakukan dalam aplikasi proses bioremediasi adalah memilih teknik bioremediasi yang tepat. Untuk dapat menentukan teknik yang tepat diperlukan rangkaian analisis awal yaitu beberapa kegiatan yang meliputi karakterisasi limbah, pemilihan mikroorganisme yang tepat, serta pengumpulan informasi mengenai proses dan laju degradasi oleh mikroorganisme tersebut. Bab ini akan lebih fokus membahas mengenai proses bioremediasi secara *ex situ* dan pemilihan bioreaktor untuk pengolahan kontaminasi air dan tanah yang tepat untuk pencemaran limbah industri.

Bioremediasi memiliki kelebihan secara ekonomi dibandingkan teknologi pengolahan limbah yang lain seperti penimbunan atau penggunaan bahan kimia karena lebih murah. Kekurangan dari teknik bioremediasi yaitu diperlukan pengetahuan mendalam mengenai karakteristik limbah, fisiologi mikroba, dan rancangan proses pengolahan yang cenderung lebih rumit jika dibandingkan teknik yang lain.

Aplikasi bioremediasi bergantung pada hasil analisis mengenai lokasi dan karakteristik mikroorganisme yang digunakan. Proses analisis dimulai dengan karakterisasi limbah, pemilihan kultur dan jenis reaktor, serta pengolahan awal. Uji laboratorium juga diperlukan untuk menganalisis beberapa parameter seperti pH, kandungan oksigen dan nutrisi, ukuran partikel tanah, suhu, dan komposisi mikroba di lokasi.

6.1. Analisis Kebutuhan

Tujuan utama dari kegiatan analisis kebutuhan adalah mengetahui sifat kimia, fisik, dan biologis dari bahan atau lokasi yang tercemar. Selain itu, analisis juga diperlukan untuk mengidentifikasi faktor-faktor yang berpotensi menghambat proses bioremediasi yang akan dilakukan.

6.1.1. Karakterisasi Lokasi

Tujuan utama dari karakterisasi lokasi adalah untuk mengidentifikasi sifat kontaminan, tingkat kontaminasi, dan persebarannya. Sifat, tingkat, dan persebaran kontaminasi pada suatu lokasi pencemaran akan menentukan jenis teknik bioremediasi yang akan diaplikasikan serta jenis mikroba yang diperlukan.

Sifat fisik kontaminan yang penting untuk proses bioremediasi meliputi kelarutan air dan koefisien oktanol/partisi air (Eckenfelder & Norris, 1993). Koefisien partisi oktanol/air didefinisikan sebagai rasio konsentrasi senyawa dalam fase oktanol terhadap konsentrasinya dalam fase air. Nilai koefisien untuk kontaminan organik

berkisar antara 10^{-3} hingga 10^{-7} . Kontaminan dengan nilai kurang dari 10^{-4} bersifat hidrofilik, sedangkan kontaminan dengan nilai di atas 10^{-4} bersifat hidrofobik. Kontaminan yang memiliki tingkat kelarutan air rendah dan koefisien air/oktanol tinggi akan lebih mudah terserap oleh tanah dan umumnya sulit untuk dilakukan bioremediasi. Sebaliknya, kontaminan dengan tingkat kelarutan tinggi cenderung lebih sulit diserap tanah dan lebih mudah dilakukan bioremediasi.

Dalam kasus bioremediasi tanah, hal yang sering menghambat adalah desorpsi kontaminan. Oleh karena itu, penting untuk memperhatikan kemampuan penyerapan kontaminan pada tanah dan bahan organik dalam tanah yang ditentukan melalui bioavailabilitas kontaminan. Bioavailabilitas juga merupakan karakteristik toksisitas penting yang dapat diukur dengan metode *toxicity characteristic leaching procedure* (TCLP) (Johnson & James, 1989) yang dipublikasi oleh Badan Perlindungan Lingkungan A.S.

Menentukan tingkat kelayakan bioremediasi in situ juga membutuhkan karakterisasi mendalam mengenai sifat hidrologi dan tanah. Tingkat intensitas bioremediasi in situ yang diperlukan untuk menghilangkan kontaminan ditentukan oleh kemampuan desorpsi dan difusi kontaminan serta kandungan mikrobiologis tanah. Pengujian di tempat untuk menentukan laju dan tingkat biodegradasi dapat dilakukan dengan mempertimbangkan kelayakan proses ex situ (Autry & Ellis, 1992).

Penentuan tingkat desorpsi tanah adalah salah satu tes penting sebelum dilakukan pengukuran degradasi mikroba. Tes desorpsi

mengukur koefisien partisi tanah/air pada lokasi tertentu terhadap kontaminan. Terdapat beberapa metode untuk mengukur koefisien partisi telah dipublikasikan dan dapat digunakan (Wu & Gschwend, 1986; Rogers, Tedaldi & Kavanaugh, 1993). Umumnya kontaminan organik yang ditemui bersifat hidrofobik, memiliki kelarutan air yang rendah, dan berada pada fase padat. Desorpsi kontaminan semacam itu kemungkinan akan membatasi laju biodegradasi khususnya pada bioremediasi ex situ (Rogers et al.y 1993).

Berbagai penelitian berupa penggunaan surfaktan untuk meningkatkan bioavailabilitas kontaminan telah dilakukan. Namun, hasilnya diperlukan konsentrasi surfaktan yang sangat tinggi meningkatkan kelarutan dalam skala yang kecil. Umumnya, diperlukan larutan surfaktan 2% untuk menghi-langkan persentase senyawa yang tinggi seperti PAH, bifenil poliklorinasi (PCB), dan hidrokarbon dengan berat molekul lebih tinggi dari tanah (Scheibenbogen et al.y 1994).

6.1.2. Karakterisasi Mikroba

Tahap pertama dalam proses karakterisasi mikroba adalah mengukur laju biodegradasi oleh mikroba indigen. Selain itu, diperlukan analisis mengenai suhu, kadar oksigen, dan jenis kontaminan termasuk tingkat kelarutan yang dapat menghambat laju biodegradasi.

Tujuan utama proses karakterisasi mikroba adalah mengidentifikasi mikroorganisme indigen yang mampu melakukan proses bioremediasi apabila kondisi lingkungan direkayasa atau

jenis mikroorganisme non indigen yang akan di inokulasi apabila diperlukan. Contohnya, terdapat dua lahan yang terkontaminasi oleh kontaminan yang sama yaitu 2-sec-butyl-4,6-dinitrophenol (dinoseb) memiliki perlakuan yang berbeda, lahan pertama dapat diremediasi menggunakan mikroorganisme indigen sedangkan pada lahan kedua memerlukan inokulasi mikroorganisme yang diambil dari lahan pertama. (Kaake *et al.*, 1992).

6.1.3. Faktor Lingkungan

Faktor lingkungan adalah salah satu faktor yang paling mempengaruhi keberhasilan proses bioremediasi. Oleh karena itu, analisis faktor lingkungan menjadi salah satu bagian penting dalam proses analisis kebutuhan. Analisis senyawa kimia yang dapat mendukung proses bioremediasi meliputi pH, COD, TOC, nitrogen, fosfor, besi, zat penghambat, dan berbagai kandungan senyawa kimia lain. Jenis tekstur tanah, dan distribusi ukuran partikel juga diperlukan. Analisis mikrobial yang mendukung meliputi BOD, *plate counts*, dan analisis degradasi kolom untuk mikroba indigen atau kultur yang diinokulasi.

Proses bioremediasi umumnya memerlukan pH netral kecuali fungi yang memerlukan lingkungan yang lebih asam. Kebanyakan mikroorganisme bersifat mesofil yaitu membutuhkan suhu 25 hingga 37° C untuk hidup. Faktor lain yang tergolong sulit untuk dimanipulasi yaitu kadar oksigen dan nutrisi. Bakteri yang mampu mendegradasi komponen biotik umumnya heterotrof dan membutuhkan zat organik sebagai sumber karbon dan energi. Hal tersebut

menyebabkan diperlukan penambahan sumber karbon seperti glukosa untuk menjaga viabilitas sel dan meningkatkan pertumbuhan serta laju degradasi.

Kandungan nitrogen dan fosfor dalam tanah juga sangat mendukung pertumbuhan bakteri dan proses degradasi senyawa organik sehingga umumnya teknik bioremediasi menggunakan penambahan dua senyawa tersebut. Namun, umumnya penambahan hanya sedikit karena secara alami kedua senyawa tersebut sudah ada dalam tanah.

Biodegradasi dapat terjadi secara aerob maupun anaerob. Biodegradasi yang paling efektif untuk senyawa hidrokarbon adalah melalui perantara bakteri aerob. Suplai oksigen dapat menjadi faktor penghambat laju biodegradasi sehingga proses bioremediasi hidrokarbon dalam skala besar memerlukan sistem aerasi yang memadai.

Dalam proses pemilihan mikroba dan metode bioremediasi, beberapa pengujian terhadap tahapan degradasi diperlakukan untuk memprediksi waktu, kebutuhan nutrisi, dan antisipasi tindakan. Pengujian minimal yang perlu dilakukan yaitu apakah terdapat kandungan senyawa racun pada produk hasil bioremediasi (Singleton, 1994). Beberapa contoh senyawa racun yang mungkin muncul meliputi hidrokarbon, benzana, toluene, etil benzena dan xylene (BTEX). Apabila ditemukan kandungan senyawa beracun maka perlu dilakukan tahapan penanganan lanjutan terhadap produk hasil bioremediasi.

6.2. Pemilihan Jenis Reaktor

Jenis reaktor ditentukan oleh sifat fisik limbah serta sifat kimia dan biokimia kontaminan. Jika limbah terdapat pada lapisan air tanah, maka dapat digunakan reaktor bertingkat (*continuous supported reactor*) sedangkan pencemaran pada tanah umumnya menggunakan jenis *suspended batch reactor* karena sifat tanah yang lebih sulit untuk dipindahkan dibandingkan dengan air.

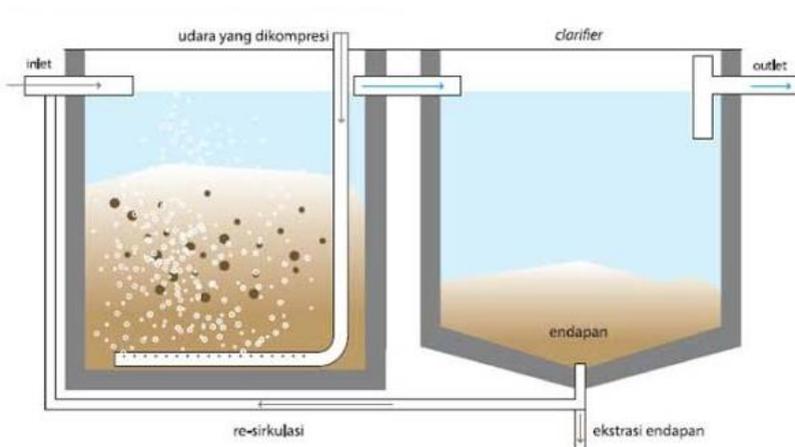
6.2.1. Remediasi Air Limbah

Teknologi pengolahan air limbah untuk memisahkan kontaminan yang berasal dari industri saat ini telah banyak digunakan. Setelah melalui proses pengolahan awal seperti penyaringan, pemisahan padatan seperti pasir atau lumpur, dan sedimentasi, air limbah dialirkan ke sebuah bioreaktor yang berfungsi menghilangkan material organik dalam air limbah. Umumnya reaktor yang digunakan dalam pengolahan air limbah berupa sebuah *Fixed Film Process* yaitu saringan bertingkat yang bersifat aerob atau alternatif kedua yaitu *Activated Sludge Process* yaitu menggunakan lumpur aktif.

a. Reaktor Lumpur Aktif

Petrasek *et al.* (1983) melakukan uji coba menggunakan reaktor lumpur aktif untuk memisahkan cairan limbah yang mengandung 22 jenis polutan berbahaya yang masuk dalam daftar yang dikeluarkan oleh United States Environmental Protection Agency (EPA). Hasil dari uji coba tersebut diperoleh rerata efektivitas reaktor mencapai 97%. Namun, kendala yang dialami yaitu apabila

konsentrasi polutan terlalu tinggi maka dapat menyebabkan reaktor menjadi tidak stabil. Kandungan sianida, pentachloro-phenol, acrylonitrile, phenolics, dan amonia dapat menyebabkan ketidakstabilan reaktor lumpur aktif (Allsop *et al.*, 1990).

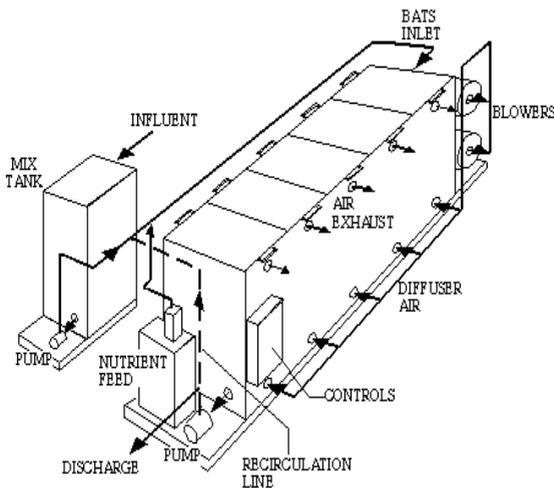


Gambar 6.1 Skema reaktor lumpur aktif

Kekurangan reaktor lumpur aktif adalah umumnya diperlukan reaktor yang mudah dipindahkan untuk pengolahan air limbah. Sedangkan hal tersebut sulit dilakukan pada reaktor lumpur aktif. Selain itu, pertumbuhan mikroba yang lambat, rendahnya flokulasi, dan masalah ketidakstabilan menyebabkan penggunaan lumpur aktif sangat sulit diaplikasikan pada pengolahan air limbah (Nyer, 1992). Sebaliknya, reaktor *fixed film* yang konsepnya mirip dengan sistem penyaringan air dapat diaplikasikan pada kondisi rendah oksigen, pertumbuhan mikroba yang lebih cepat, dan pengoperasian yang lebih stabil.

b. Reaktor *Fixed Film*

BioTrol *Aqueous Treatment System* (BATS) adalah salah satu contoh dari reaktor jenis *fixed film*, sebuah reaktor bertingkat yang sangat efektif dalam pengolahan air limbah (Pflug & Burton, 1988). Kombinasi aliran air, dorongan udara, dan rancangan media pendukung lain memfasilitasi terjadinya distribusi air dan udara dalam reaktor. BATS mampu meng-hilangkan lebih dari 95% pentachlorophenol (PCP) yang terkandung dalam air hanya dalam waktu 1.8 jam.



Gambar 6.2 BioTrol Aqueous Treatment System

Bioreaktor *fixed film* adalah jenis bioreaktor yang paling banyak digunakan saat ini. Reaktor *fixed film* dapat digunakan untuk pengolahan limbah cair dengan konsentrasi polutan organik rendah maupun tinggi hingga 1000 ppm. Banyaknya kandungan

biomassa dalam reaktor *fixed film* membuatnya tidak sensitif terhadap shock akibat over kapasitas, yaitu fluktuasi kandungan senyawa organik. Lapisan luar dari biofilm melindungi bagian dalam sel dari racun akibat over kapasitas serta penyerapan kontaminan dalam biofilm mengurangi konsentrasi terlarut kontaminan (Hu *et al.*, 1994).

Contoh menggunakan reaktor *fixed film* yang berhasil adalah pengolahan sebuah danau yang terkontaminasi oleh 36 ppm pentachlorophenol (PCP), 37 ppm polynuclear aromatics (PNAs), dan keseluruhan chemical oxygen demand (COD) sebanyak 6700 ppm (King, 1992). Pengolahan secara biologis dipilih karena akses untuk membawa peralatan ke lokasi cenderung mudah dan remediasi dapat diselesaikan dalam beberapa bulan. Sebanyak 10.2 juta liter air berhasil diremediasi dengan kandungan PCP, PNAs dan fenol turun hingga kurang dari 0.5 ppm.

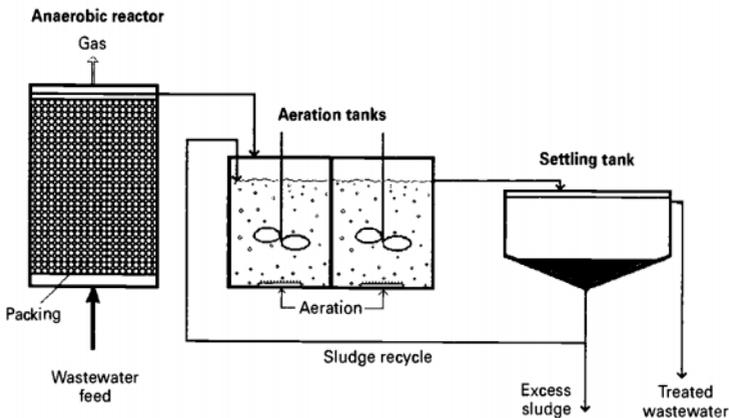
c. Reaktor Anaerob

Proses bioremediasi secara anaerob untuk pengolahan air limbah jarang ditemukan, namun proses ini dapat digunakan dalam pengolahan air dari limbah pertanian dan industri pengolahan makanan yang umumnya mengandung senyawa yang bersifat biodegradable dalam jumlah besar. Hasil dari proses ini dapat menghasilkan metana yang dapat digunakan sebagai sumber energi alternatif.

Bioreaktor anaerob telah digunakan sejak tahun 1880an untuk penglahan limbah cair yang mengandung padatan tersuspensi. Namun, umumnya reaktor anaerob sangat sensitif terhadap

polutan yang bersifat beracun dan rentan mengalami kegagalan. Saat ini, reaktor anaerob-aerob sedang banyak dikembangkan khususnya untuk mineralisasi xenobiotik. Jenis reaktor ini memanfaatkan kelebihan reaktor anaerob dalam proses deklorinasi dari senyawa polychlorin. Komponen yang telah tereduksi selanjutnya akan lebih mudah diproses dalam reaktor aerob.

Reaktor anaerob-aerob memilikipotensi besar dalam proses pengolahan air limbah dari industri bubur kayu dan pembuatan kertas yang mengandung senyawa xenobiotik. Industri pembuatan kertas umumnya menghasilkan limbah cair yang mengandung klorofenol, hidrokarbon, dan klorin dioxin. Pemerintah Kanada mencatat penggilingan kayu menghasilkan air limbah yang mengandung dioxin dan furran yang tidak terhitung jumlahnya sehingga diperlukan peraturan untuk menyediakan teknologi pengolahan limbah yang memadai (Murray & Richardson, 1993).



Bagan 1 Pengolahan limbah cair menggunakan reaktor anaerob-aerob

6.2.2. Remediasi Tanah/Lahan Tercemar

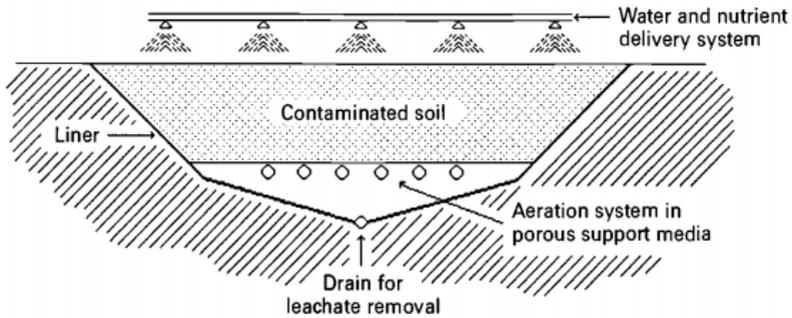
Pengolahan tanah atau lahan yang tercemar dapat dilakukan melalui dua metode yaitu *ex situ* dan *in situ*. Keuntungan dari metode *ex situ* adalah lebih mudah mengontrol kondisi lingkungan lokasi pengolahan tanah melalui penambahan nutrisi, aerasi, dan berbagai teknik lain yang umumnya terbatas untuk dilakukan pada metode *in situ*. Namun, metode *ex situ* memiliki kekurangan berupa ongkos pengerukan tanah dan operasional reaktor yang tergolong mahal.

a. Landfarming

Pengolahan lahan secara biologis melalui teknik *landfarming* tergolong sederhana dan murah untuk mengatasi lahan yang terkontaminasi bahan yang dapat didegradasi secara aerob. Tanah yang terkontaminasi dikeruk kemudian diolah dalam lubang yang dilapisi pembatas berbahan lumpur atau sintetis dengan kerapatan tinggi (Gambar 5). Pipa berlubang dapat diletakkan pada lapisan pasir diantara pembatas dan tanah yang terkontaminasi sebagai sistem drainase. Alternatifnya, lokasi pengolahan dapat dibuat miring atau bertingkat agar sisa kotoran dapat mengalir ke lokasi yang disediakan.

Aerasi dapat dilakukan dengan penataan tanah yaitu diratakan dengan kedalaman 15-50 cm atau dengan menggunakan pipa PVC yang digunakan sebagai blower (Gambar 5). Selain itu, penambahan nutrisi dan pengaturan pH juga diperlukan. Nutrisi yang ditambahkan meliputi fosfor, nitrogen, nitrat, atau urea. Penam-

bahan air berfungsi untuk menjaga kelambapan tanah tetap optimal.



Gambar 5. Metode *Landfarming* untuk Pengolahan Tanah yang Tercemar

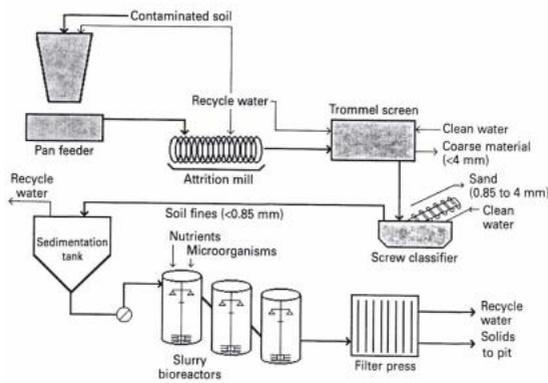
Permasalahan yang mungkin muncul dalam pengolahan tanah yang tercemar adalah kontaminan residu yang sulit atau tidak dapat didegradasi oleh mikroorganisme tanah. Kondisi tersebut menyebabkan penambahan surfaktan diperlukan untuk menghilangkan kontaminan. Penambahan surfaktan memerlukan biaya yang tidak murah sehingga penggunaan reaktor slurry lebih banyak dipilih dibandingkan metode landfarming.

b. Reaktor Slurry

Reaktor slurry adalah jenis reaktor tertutup yang dilengkapi dengan agitator untuk mencampurkan air dan tanah sehingga membentuk struktur slurry atau seperti bubur. Reaktor ini pertama kali dikembangkan pada tahun 1950an untuk pengolahan bahan kimia

dari industri. Bioremediasi menggunakan reaktor slurry umumnya lebih efisien dan memerlukan lahan yang lebih sedikit daripada landfarming. Metode ini dipilih apabila metode landfarming yang lebih sederhana menemui kendala seperti desorpsi kontaminan. Metode slurry mengatasi kendala tersebut melalui proses pra perlakuan pada tanah serta agitasi dan aerasi reaktor.

Pra perlakuan bertujuan untuk meningkatkan desorpsi dengan memperkecil ukuran partikel tanah (fraksinasi) dan penambahan surfaktan. Fraksinasi menghilangkan partikel besar yang sulit diproses dalam reaktor slurry. Hasil analisis terhadap kontaminan tanah dan ukuran partikel mengindikasikan bahwa derajat konsentrasi meningkat melalui fraksinasi (Compeau, *et al.*, 1991). Kontaminan umumnya lebih mudah diserap dalam partikel tanah yang lebih kecil.



Gambar 6. Sistem Pengolahan Limbah dengan Sistem Slurry

Lebih lanjut, akan dibahas beberapa aplikasi bioremediasi pada bab setelah ini.

BIOREMEDIASI LIMBAH CAIR INDUSTRI PENYAMAKAN KULIT DI MALANG

7.1. Pendahuluan

Undang-Undang Lingkungan Hidup No. 32 tahun 2009 mendefinisikan pencemaran sebagai masuk atau dimasukkannya makhluk hidup, zat, energi, dan atau komponen lain ke dalam lingkungan. Dalam pencemaran terdapat unsur terjadinya perubahan tatanan lingkungan oleh kegiatan yang diakibatkan aktivitas manusia atau proses alam yang menyebabkan lingkungan menjadi kehilangan fungsi dalam peruntukannya.

Industri penyamakan kulit merupakan industri yang rumah tangga yang menghasilkan limbah cair dengan kompleksitas bahan organik yang kompleks. Industri penyamakan kulit mengolah kulit hewan untuk tujuan pengawetan dengan senyawa kimia dalam kadar yang cukup tinggi. Bahan baku kulit didapatkan pengusaha berasal dari rumah potong hewan (RPH) setempat.

7.2. Karakteristik Limbah Industri Penyamakan Kulit

Sebagian besar industri kuit yang ada di Indonesia termasuk dalam kategori industri rumah tangga dan industri kecil yang berkembang dan membentuk sentra industri. Karakteristik industri rumah tangga dan industri kecil di Indonesia adalah 1) berkembang dengan modal usaha yang minim, 2) menggunakan teknik yang sederhana dalam pengelolaannya, 3) kurang memperhatikan faktor kelestarian lingkungan, karena limbah buangan biasanya langsung disalurkan ke badan air terdekat, tanpa proses pengolahan yang lebih lanjut.

Pekerjaan penyamakan kulit mempergunakan air dalam jumlah yang cukup besar. Air berfungsi sebagai bahan pelarut dalam penggunaan bahan kimia serta untuk pembersihan. Proses pencucian yang berulang kali menyebabkan limbah cair yang dihasilkan dari industri penyamakan kulit melimpah. Limbah yang dihasilkan tidak hanya berupa cair, tetapi juga mengandung padatan dari pekerjaan pembersihan daging dari bulu, bulu-bulu, serta gumpalan lemak. Kompleksitas materi organik dan non organik pada limbah cair merupakan karakteristik utama pada limbah cair yang dihasilkan pada industri penyamakan kulit. salah satu materi yang berbahaya yang biasanya ditemukan pada limbah industri penyamakan kulit adalah krom. Berikut adalah garis besar tahapan dalam industri penyamakan kulit.

1. Tahap Pra-penyamakan (*beamhouse*)

Tahapan pra penyamakan kulit bertujuan untuk menghilangkan kulit, bulu, lemak, serta jaringan lain dari kulit, dengan

rincian sebagai berikut:

- a. Tahapan pencelupan kulit. Tahapan ini bertujuan untuk menghilangkan darah serta kotoran dari kulit hewan. Tahapan ini dilakukan kurang lebih selama 24 jam.
 - b. Tahapan perendaman dengan larutan kapur dan sodium sulfida. Tahapan ini bertujuan untuk memisahkan bulu dari kulit.
 - c. Tahapan pengolahan menggunakan air kapur atau disebut *reliming*.
 - d. Tahapan mekanis atau tahapan pencukuran. Tahapan ini bertujuan untuk menghilangkan jaringan yang terdapat di sisi daging kulit.
 - e. Tahapan pengolahan dengan kapur. Tahapan ini bertujuan untuk memisahkan kulit dengan jaringan yang sebelumnya dipisahkan secara mekanis.
 - f. Tahapan pengolahan menggunakan asam lemah disertai proses pemukulan. Tahapan ini bertujuan untuk membantu memisahkan sisa-sisa bulu dan menghancurkan protein pada kulit.
 - g. Tahapan pengawetan. Tahapan ini bertujuan untuk mencegah proses pengendapan krom pada serat kulit. Tahapan ini menggunakan larutan garam dan larutan asam sulfur.
2. Tahapan penyamakan kulit. tahapan ini bertujuan untuk menstabilkan jaringan kolagen pada kulit. tahapan ini menambahkan senyawa krom sulfat.

3. Tahapan pasca penyamakan, yang mekanismenya melalui serangkaian proses sebagai berikut.
 - a. Tahapan pressing (*Samming*). Tahapan ini bertujuan untuk menghilangkan kelembapan pada kulit.
 - b. Tahapan pencukuran.
 - c. Tahapan pewarnaan dan pelembutan kulit. tahapan ini bertujuan untuk memberikan warna serta melemaskan kulit. tahapan ini dilakukan dengan melakukan tahapan penamakan sekunder menggunakan tanin sintetis yang diikuti dengan penambahan minyak emulsi (*fatliquoring*).
 - d. Tahapan pengeringan.
 - e. Tahapan pencukuran akhir.
 - f. Tahapan pelapisan. Tahapan ini bertujuan untuk mengawetkan kulit dengan cara melapisi permukaan kulit dengan bahan pengawet.
 - g. Tahapan finishing, yang meliputi pemotongan dan pengeringan kulit secara manual, dengan bantuan sinar matahari.

7.3. Bakteri Pendegradasi dalam Industri Penyamakan Kulit

Karakter utama dalam limbah industri penyamakan kulit adalah kompleksitas materi organik dan non organik. Biodegradasi dan bioremediasi dapat berjalan secara efisien karena mikroba memiliki kemampuan dalam mendekomposisi seluruh bahan yang terlarut, baik terdispersi halus, berupa koloid, atau bahkan zat terlarut melalui metabolisme (Dhall *et al.*, 2012). Senyawa organik

dalam limbah merupakan sumber nutrisi bakteri heterotrof, sehingga kompleksitasnya akan diuraikan menjadi senyawa yang lebih sederhana. Senyawa dalam bentuk sederhana ini selanjutnya merupakan nutrisi bagi bakteri yang berperan dalam proses nitrifikasi pada air limbah hasil industri. Bakteri ini memperoleh nutrisi tambahan dari senyawa sederhana sehingga lebih optimal dalam melakukan proses dekomposisi amonia pada limbah (Priadie *et al.*, 2014).

Isolat bakteri lokal yang berpotensi dalam mendegradasi materi organik berupa kadar lemak pada limbah industri penyamakan kulit yaitu spesies *Staphylococcus aureus*, *Pseudomonas pseudomallei*, dan *Actinobacillus sp.* (Hasminar, 2017). Dilaporkan pula bahwa spesies *Enterobacter gergoviae*, *Vibrio parahaemolyticus*, dan *Pseudomonas stutzeri* dapat menurunkan kadar BOD, COD, dan TSS, serta menaikkan kadar DO secara *in vitro* (Dora, 2017). Penambahan konsorsium tersebut akan memaksimalkan proses penguraian materi organik, yang akan berakibat pada menurunnya kadar bahan organik terlarut dalam limbah. Ononiwu & Ekwenye (2017) melaporkan bahwa kombinasi 3 isolat dalam suatu konsorsium memperlihatkan aktivitas maksimal pada pengukuran kadar BOD, COD dan lipid yang sangat rendah, jika dibanding dengan penggunaan satu isolat bakteri lokal.

Nilai BOD merupakan parameter keberadaan bahan organik dalam sebuah perairan, yaitu jumlah oksigen yang dibutuhkan oleh mikroorganisme aerob dalam mengoksidasi bahan organik menjadi karbondioksida dan air (Happy *et al.*, 2012). Penurunan yang signifi-

kan pada kadar BOD dapat dikaitkan dengan konsumsi materi organik oleh mikroorganisme sebagai sumber nutrisi (Porwal *et al.*, 2015). Penurunan nilai BOD dan COD merupakan parameter terjadinya proses degradasi bahan organik dalam limbah.

BIOREMEDIASI LIMBAH CAIR INDUSTRI KAIN BATIK DI TULUNGAGUNG

8.1. Pendahuluan

UNESCO mengukuhkan batik sebagai warisan budaya milik Indonesia sejak 2 Oktober 2009. Penyebaran produksi batik di Indonesia menurut Kementerian Koordinator Bidang Kesejahteraan Rakyat Republik Indonesia tersebar di 20 provinsi, termasuk diantaranya Jawa Timur. Terdapat 40.000 unit usaha dan 800.000 tenaga kerja yang terlibat dalam dunia industri batik. Tulungagung menjadi salah satu daerah sentra penghasil batik di Jawa Timur. Industri batik menghasilkan karakteristik limbah yang berwarna pekat akibat tingginya konsentrasi kadar warna dari proses pencelupan warna pada pembuatan batik. Hal ini akan berakibat buruk pada badan air sebagai tempat pembuangan limbah secara langsung. Komposisi zat warna yang digunakan dalam industri terdiri atas bahan kimia organik dan anorganik.

Limbah cair industri batik menghasilkan limbah yang dominan akan kandungan bahan pewarna akibat proses pewarnaan pada kain. Selain itu, limbah cair juga mengandung BOD, COD,

dan padatan tersuspensi yang relatif tinggi. Zat warna yang biasanya digunakan dalam industri pembuatan batik berasal dari pewarna sintetik, yaitu senyawa golongan azo, yang bersifat karsinogenik bagi biota perairan. Selama proses pewarnaan, 10-15% dari zat warna akan terbangun bersama limbah industri.

Limbah cair tersebut akan menjadi sumber pencemar sehingga diperlukan solusi praktis. Proses pengolahan limbah dapat dilakukan melalui proses fisika, kimia maupun biologis. Salah satu proses pengolahan secara biologis adalah dengan memanfaatkan bakteri indigen yang diisolasi dari limbah tersebut dan memiliki potensi dalam melakukan proses biodegradasi. Mikroorganisme yang digunakan dalam proses biodegradasi akan memproduksi enzim. Enzim ini akan memodifikasi bahan polutan toksik berupa bahan pewarna, bahan kimia organik dan non organik dengan cara mengubah struktur kimia, sehingga susunannya jadi lebih sederhana dan kadar toksisitasnya menjadi berkurang bagi lingkungan.

Isolat bakteri indigen digunakan karena kelebihanannya, yaitu dapat diisolasi dari limbah dan dapat dipelajari secara *in vitro* untuk mengetahui potensinya dalam mendegradasi kandungan toksik dalam limbah cair batik. Isolat bakteri indigen akan dikultur dan diinokulasikan kembali pada limbah untuk tujuan mengoptimalkan proses degradasi bahan pewarna pada limbah cair.

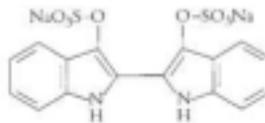
8.2. Karakteristik Limbah Industri Batik

Limbah industri batik secara fisik mengandung kadar bahan pewarna yang cukup tinggi, sehingga air sampel yang dihasilkan

cenderung berwarna pekat, mulai dari biru, hijau, abu-abu, sampai hitam yang pekat. Kadar warna yang tinggi dalam sampel limbah berasal dari penggunaan zat warna sintetis.

Zat warna Naphtol merupakan zat yang tidak larut dalam air, sehingga diperlukan zat kostik soda untuk membantu melarutkan. Cara penggunaan pewarna ini adalah pencelupan kain dengan larutan Naphtol dan pada tahap ini belum dihasilkan warna pada kain. Setelah proses pencelupan warna, kemudian dilanjutkan dengan pencelupan pada larutan garam diazodium dan barulah diperoleh warna yang dikehendaki.

Zat warna indigosol adalah jenis zat warna dengan karakteristik berwarna jernih dan larut dalam air. Saat kain dicelupkan dalam zat warna jenis ini, warna yang diharapkan belum muncul. Pewarna akan muncul, setelah kain dicelup dalam larutan asam (HCl atau H₂SO₄). Indigosol memiliki rumus molekul C₁₆H₁₀N₂Na₂O₈S₂ dengan struktur kimia seperti tampak pada Gambar 7.1.



Gambar 7.1 Struktur Kimia Indigosol

Naphtol dan indigosol memiliki karakter dapat menghasilkan warna yang cerah dan tidak mudah memudar. Keduanya terdiri atas kombinasi zat pewarna sintetis dengan zat pembentuk warna yang berfungsi untuk memunculkan serta menguatkan warna.

Limbah pabrik batik dapat mengakibatkan pencemaran, hal ini dikarenakan proses produksi yang meliputi tahap persiapan, perlekatan lilin, pewarnaan, pelorotan, dan pencucian. Sajian proses tahapan pembuatan batik, dapat dilihat pada **Tabel 7.1**.

Tabel 7.1 Limbah yang Dihasilkan dalam Pembuatan Batik

| No | Tahapan | Jenis Limbah |
|----|------------------------------|---|
| 1 | Pembuatan Kain | Tidak ada |
| 2 | Pengolahan Kain (Ngloyor) | Gas dari asap pemanas |
| | | Cairan mengandung asam, minyak, dan deterjen |
| 3 | Pembuatan Pola | Tidak ada |
| 4 | Pemalaman | Gas dari asap pemanas |
| 5 | Pewarnaan | Cairan mengandung zat warna |
| 6 | Pelorotan | Padatan lilin, cairan abu soda |

8.3. Bakteri Pendegradasi Limbah Industri Kain Batik

Bahan paling dominan yang ditemukan dalam limbah industri batik adalah zat warna. Kemampuan untuk mendegradasi zat warna ditemukan pada beberapa jenis bakteri. Umumnya bakteri pendegradasi zat warna memiliki kemampuan yang spesifik terhadap zat warna tertentu. Beberapa jenis spesies bakteri yang memiliki potensi dalam mendegradasi zat warna meliputi *Bacillus subtilis* dan *Pseudomonas putida* yang diketahui efektif mendegradasi

zat warna naphthol, sedangkan *Enterobacter agglomerans* efektif menguraikan zat warna indigosol (Hasminar *et al.*, 2018).

Sampel limbah industri batik umumnya juga ditemukan kandungan lemak. Menurut penelitian Izmalkova (2013), bakteri *Pseudomonas putida* strain AK5 dapat memetabolisme naphthalene melalui salisilat dan gentisat. Gen pengkatalis tersebut berada pada plasmid pAK5 IncP-7 non-conjugative dengan ukuran 115 kb. Selain itu, menurut Phulpoto (2016), bakteri *Bacillus subtilis* strain NAP1 juga memiliki kemampuan dalam mendegradasi lemak. Setelah dilakukan analisis menggunakan BLAST, urutan basa nukleotida pada *Bacillus subtilis* memiliki kesamaan rata-rata sebesar 93% dengan gen bakteri *Bacillus subtilis* strain NAP1.

BIOREMEDIASI INSEKTISIDA JENIS CHLORPYRIFOS SECARA IN VITRO

Chlorpyrifos adalah golongan insektisida dengan spektrum jangkauan yang luas. Chlorpyrifos merupakan jenis pestisida organo-fosfor dan menyumbang sekitar 36% dari total insektisida yang digunakan secara global (Balakrishnan & Prasada, 2019). Golongan senyawa ini memiliki karakteristik tidak stabil, tidak persisten, dengan potensi tingkat bioakumulasi yang relatif lebih sedikit.

Chlorpyrifos dianggap aman dalam skala penggunaan rumah tangga maupun aplikasi bidang pertanian, seperti memberantas hama, menjadikan penggunaan Chlorpyrifos menjadi salah satu pestisida yang digunakan paling banyak di seluruh dunia (Kiely *et al.*, 2004). Chlorpyrifos sangat efektif dalam pengendalian cacing tambang, cacing akar jagung, kecoak, lalat, rayap, semut api, kumbang, dan kutu.

Chlorpyrifos (CP) digunakan baik sebagai pestisida dalam upaya pengendalian hama pertanian, juga memiliki fungsi sebagai termitisida (membasmi rayap pada skala rumah tangga).

Penggunaan Chlorpyrifos sangat dibatasi di AS dan beberapa negara Eropa, bahkan untuk tujuan pertanian. Akan tetapi, sampai tahun 2000, Chlorpyrifos masih banyak digunakan pada negara berkembang. Pestisida dengan kandungan bahan Chlorpyrifos merupakan pestisida yang penggunaannya menempati peringkat keempat di dunia, setelah monocrotophos, acephate, dan endosulfan (Ansaruddin & Vijayalakshmi, 2003).

Senyawa Chlorpyrifos sangat beracun bagi manusia dan hewan lain karena dapat menghambat esterase asetilkolin (AChE) dan diketahui mengganggu fungsi normal sistem saraf pusat diikuti oleh kelumpuhan otot yang parah dan dapat berujung pada kematian (Shen *et al.*, 2010). Meskipun penggunaannya telah dilarang di beberapa negara, beberapa diantaranya terutama parathion dan methyl parathion masih digunakan tanpa pandang bulu di beberapa negara, salah satunya di India. Penggunaannya adalah untuk mengendalikan hama serangga pada tanaman utama, seperti padi, kentang, sawi, kapas, dan sayuran (Pakala *et al.*, 2007).

Salah satu efek buruk yang dilaporkan dari penggunaan Chlorpyrifos terjadi pada makhluk non-target, dengan kekhawatiran yang terus meningkat akan tetapi belum diteliti secara terperinci (Tina & Metka, 2011). Mayoritas orang yang berulang kali terpapar dengan konsentrasi Chlorpyrifos yang rendah dan studi epidemiologi jangka panjang, mengungkapkan keterkaitan dengan resiko yang lebih tinggi terhadap perkembangan sel kanker (Brown *et al.*, 1990). Namun penggunaan Chlorpyrifos secara terus menerus dengan kadar yang berlebihan

tidak hanya dapat menyebabkan penyakit saraf dan otot pada manusia dan hewan, tetapi juga dapat menyebabkan kontaminasi di ekosistem pada berbagai belahan dunia.

Degradasi Chlorpyrifos dipelajari dengan metode konvensional yang menyebabkan terjadinya pelepasan beberapa produk beracun dan akumulasi residu yang lebih optimal (Xu *et al.*, 2008). Oleh karena biodegradasi Chlorpyrifos menggunakan mikroorganisme untuk menghilangkannya dari lingkungan merupakan pembahasan yang penting untuk dilakukan (Maya *et al.*, 2011). Chlorpyrifos ditemukan memiliki sifat resisten terhadap biodegradasi dan tetap dapat bertahan secara efektif selama kurun waktu 5-17 tahun di dalam tanah. Chlorpyrifos dapat terdegradasi menjadi 3, 5, 6-trikloro-2-piridinol (TCP) dan gugus alkil fosorotioat dalam lingkungan (Alvarenga *et al.*, 2015). Produk degradasi dari Chlorpyrifos berupa TCP memiliki sifat anti mikroba dan hal ini dapat mencegah proliferasi mikroorganisme pengurai Chlorpyrifos (Racke, 1993).

Chlorpyrifos juga masuk dalam klasifikasi sebagai racun dengan aktivitas estrogenik yang gigih, dapat bergerak, dan terdaftar sebagai zat pengganggu endokrin kuat oleh Environmental Protection Agency (EPA) US (Chen *et al.*, 2012) dengan paruh waktu mulai dari 65 hingga 360 hari di dalam tanah (Armbrust, 2001). TCP memiliki ciri yaitu kadar kelarutan air yang lebih tinggi jika dibanding dengan Chlorpyrifos, oleh karena itu dapat terakumulasi ke dalam lingkungan dengan mudah, sehingga dapat mencemari tanah serta lingkungan air (Maya *et al.*, 2011).

Lebih lanjut Balakhrisnan & Prasada (2019) mengisolasi empat mikroorganisme yaitu *Bacillus aryabhatai*, *Bacillus drentensis*, *Bacillus firmus*, dan *Staphylococcus vitulinus* yang diisolasi untuk pertama kalinya dari tanah pertanian di kawasan distrik Visakhapatnam, Andhra Pradesh. Pada penelitian tersebut, diketahui bahwa kemampuan degradasi organisme ini mampu mendegradasi Chlorpyrifos secara in vitro. Media yang digunakan adalah media MSM, dengan potensi biodegradasi *B. drentensis* adalah sebesar 63%; diikuti *B. firmus* dengan potensi degradasi sebesar 59%; kemudian *B. aryabhatai* dengan potensi degradasi sebesar 48%; dan terakhir *S. Vitulinus* dengan potensi degradasi sebesar 39%. Potensi biodegradasi terukur mengalami peningkatan saat diberikan penambahan kotoran sapi (NPK).

Hasil analisis LC-MS pada sampel tanah menunjukkan bahwa konsorsium mampu menghidrolisis Chlorpyrifos menjadi Chlorpyrifos oxon (O, O-dietil O- (3,5,6-trichloro-2 piridil) fosfat dalam waktu 4 hari dan 3,5,6- trichloro-2-pyridinol dalam 8 hari dan kehadiran.

Diethylthiophosphoric acid (DETP) dan diethylphosphorothioate terlihat selama 16 hari dalam sampel tanah. Jumlah Chlorpyrifos oxon dan TCP yang dapat diabaikan juga diamati selama 16 hari sehingga memperjelas bahwa organisme mampu menghidrolisis senyawa induk, tetapi degradasi Chlorpyrifos oxon dan TCP terjadi dalam proses yang lambat.

Tingkat degradasi konsorsium dalam sampel tanah diamati hampir 80%. Penelitian ini mengungkapkan bahwa potensi degra-

dasi dari isolat mengikuti urutan *B. drementensis*, *B. firmus*, *B. Aryabhatai*, dan terakhir *S. vitulinus*. Hasil penelitian ini mengungkapkan bahwa keempat mikroorganismenya memiliki potensi untuk menurunkan pestisida Chlorpyrifos.

Bab 10

APLIKASI PEMANFAATAN MIKROORGANISME HASIL REKAYASA GENETIKA DALAM BIOREMEDIASI

Environmental Protection Agency (EPA) pertama kali menyetujui aplikasi penggunaan mikroorganisme hasil rekayasa genetika dalam keperluan kegiatan bioremediasi pada tahun 1996. Aplikasi mikroorganisme hasil rekayasa genetika pertama ini dilakukan pada skala menengah, yaitu pada kedalaman 4 m x 2,5 m di Laboratorium Nasional Oak Ridge (Ripp *et al.*, 2000). Spesies hasil rekayasa genetika yang digunakan adalah *Pseudomonas fluorescens* HK44 yang memiliki kemampuan alami dalam mendegradasi polycyclic aromatic hydrocarbon (PAHs) serta memiliki gen untuk bioluminescence (luxCDABE) di hilir dari salicylate inducible nahR promoter pada plasmid (pUTK21).

Plasmid ini memungkinkan galur HK44 untuk memiliki kemampuan dalam melakukan degradasi cincin kedua dan ke tiga dari PAH dan PAHs tersubstitusi lainnya secara bersamaan dengan kemampuan dalam memancarkan cahaya bioluminescens. Kemampuan ini menjadi salah satu manfaat karena dalam penggunaan

bakteri ini, sekaligus bermanfaat sebagai bioreporter hidup dengan tingkat bioremediasi yang cukup signifikan (Trogl *et al.*, 2007).

Cara kerja bioremediasi dilakukan dengan menyemprotkan strain HK44 pada lapisan tanah setinggi 10 cm dengan kedalaman 1 m. Kondisi tanah tersebut telah terkontaminasi dengan campuran PAH dari naftalena, antrasena, dan fenatrena (Ford *et al.*, 1999). Bioluminansi ini kemudian diamati menggunakan serat optik dan tabung photomultiplier (PMT) dalam kurun waktu dua tahun. Jangka waktu tersebut digunakan untuk membangun potensi bioreporter sebagai alat pemantau proses dan kontrol dalam bioremediasi (Ripp *et al.*, 2000). Alat pemantau tersebut juga bertujuan untuk mengetahui apakah strain HK44 dapat bertahan pada tekanan perubahan lingkungan dalam jangka waktu yang lama. Mikroorganisme ini akan dihadapkan pada beban metabolisme ekstra dan menurunnya efektivitas kerja mikroorganisme, sehingga strain HK44 ini dipantau kinerjanya selama kurun waktu 2 tahun.

Pemantauan populasi HK44 menggunakan teknik pelapisan selektif dan hibridisasi koloni. Dari pemantauan tersebut, diperoleh hasil bahwa terjadi penurunan konsentrasi dari tingkat inokulum awal, yaitu sebesar 1×10^6 cfu/g tanah menjadi 1×10^3 cfu/g tanah. Pada penghitungan jumlah populasi HK44 terakhir, keadaan fisiologis menunjukkan kondisi yang tetap kondusif untuk melaksanakan reaktivasi dan pertumbuhan kembali. Populasi HK44 juga dilaporkan masih dapat menghasilkan bioluminensi ketika diberi paparan kontaminan PAH tambahan dan tambahan nutrisi anorganik.

Hasil penelitian ini membuktikan bahwa mikroorganisme hasil rekayasa genetika dapat diakses untuk kegiatan pemantauan populasi jangka panjang di masa mendatang. Pada tahun 2000, empat tahun setelah perlakuan, sekali lagi dilakukan pengambilan sampel. Dari hasil tersebut diperoleh hasil bahwa HK44 dan gen rekombinan terbukti aktif secara fungsional. Hal ini dibuktikan dengan emisi bioluminensi in situ dan pemulihan lux mRNA dari sampel tanah yang diamati.

Metode eksperimental molekuler semakin mengalami perkembangan yang pesat pada dekade berikutnya setelah tahun 2000. Pada tahun 2010, dilakukan pengurutan genom pada HK44 (Chauhan *et al.*, 2011) dan melakukan pengambilan sampel lain untuk menguji hipotesis bahwa mikroorganisme rekombinan (atau gen pengenalnya) masih bertahan di lingkungan tanah dengan kisaran waktu 14 tahun setelah rilis awal.

Meskipun telah mengalami kondisi pengambilan sampel yang luas, sel HK44 yang dapat dikultur, tak lagi ditemukan setelah 14 tahun (Layton *et al.*, 2012). Analisis qPCR dan analisis metagenomik yang dilakukan pada sampel tanah, menunjukkan bahwa tanda-tanda genetik dari sel HK44 masih bertahan dalam sampel tanah yang ditemukan. Hal ini diikuti dengan diagnostik gen untuk transposom bioluminescent yang dibawa oleh strain HK44 (luxA dan tetA) telah ditemukan dalam konsentrasi rendah (<5000 salinan/g).

Populasi mikroba HK44 dapat dihidupkan kembali dari sampel tanah melalui analisis lysimeter dalam jangka waktu empat tahun setelah rilis, meskipun diketahui bahwa kondisi tekanan selektif

dari kontaminan berupa hidrokarbon telah habis terdegradasi dua tahun sebelumnya (Ripp *et al.*, 2000). Dalam kondisi ini, perlu diketahui bahwa ketidakmampuan mikroorganisme dalam berkembang, tidak berarti menunjukkan bukti bahwa mereka telah menghilang dari komunitas mikroba yang ditemukan. Tetap ditemukan elemen-elemen genetik khas yang berkaitan dengan strain HK44 bahkan 14 tahun sejak strain ini diaplikasikan ke tanah yang tercemar.

Terdapat ribuan spesies dalam komunitas mikroba tanah yang dianggap mewakili dalam populasi. Dari perkiraan batas deteksi dengan metode yang dapat dibudidayakan, dianggap bahwa strain HK44 memiliki fungsi yang penting dalam bioremediasi dan tergolong sebagai anggota komunitas yang berpengaruh (Vogel *et al.*, 2009). Penelitian ini memberikan hasil bahwa strain HK44 memiliki performa yang potensial dengan jangka waktu tergolong jangka panjang.

Bab 11

BIODEGRADASI PLASTIK & INOVASI PLASTIK *BIODEGRADABLE*

Semakin banyak plastik yang digunakan dalam kehidupan manusia dan tekanan yang semakin besar ditempatkan pada kapasitas yang tersedia untuk pembuangan limbah plastik, kebutuhan akan plastik yang dapat terbiodegradasi dan biodegradasi limbah plastik menjadi semakin penting dalam beberapa tahun terakhir. Tinjauan ini sangat penting untuk melihat kemajuan teknologi yang dibuat dalam pengembangan plastik yang lebih mudah terurai secara hayati dan biodegradasi plastik konvensional oleh mikroorganisme.

Bahan aditif, seperti pro-oksidan dan pati, banyak digunakan sebagai bahan sintesis untuk memodifikasi dan membuat plastik yang dapat terurai secara alami. Penelitian terbaru menunjukkan bahwa termoplastik yang berasal dari *poliolefin*, yang secara tradisional dianggap tahan terhadap biodegradasi di lingkungan sekitar, terdegradasi setelah degradasi cahaya dan degradasi kimia (Zheng *et al.*, 2005). Plastik jenis *termoset*, seperti *poliester alifatik* dan *poliester poliuretan*, mudah diserang oleh mikroorganisme secara

langsung karena potensi pembelahan hidrolitik ester atau ikatan uretan dalam struktur plastik tersebut.

Beberapa mikroorganisme telah diisolasi untuk memanfaatkan *poliuretan* sebagai satu-satunya sumber karbon dan sumber nitrogen. *Kopoliester alifatik-aromatik* memiliki aplikasi komersial aktif karena sifat mekaniknya yang baik dan kemampuan terurainya hayati. Poly- β -hydroxybutyrate (PHB) merupakan bahan utama yang dapat digunakan sebagai termoplastik. PHB memiliki sifat yang efektif dan memiliki banyak karakteristik yang mirip dengan plastik komersial standar seperti *polypropylene*. Walaupun kenyataannya, pengganti plastik berbasis PHB kurang fleksibel dibandingkan plastik tradisional. Plastik berbasis PHB ini sepenuhnya bersifat *biodegradable* dan tidak meninggalkan residu.

Bioplastik atau plastik organik adalah bentuk plastik yang berasal dari sumber biomassa terbarukan seperti minyak nabati, jagung, pati, kacang polong tidak seperti plastik berbahan bakar fosil yang berasal dari minyak bumi. Bentuk plastik *biodegradable* pertama kali ditandai pada pertengahan 1920-an oleh para peneliti Prancis. Molekul ini disebut *Polyhydroxybutyrate* (PHB). Banyak jenis bakteri dan alga yang berbeda menghasilkan PHB sebagai bahan penyimpanan makanan (Falcone, 2004). Plastik *biodegradable* dapat terurai menjadi karbon dioksida, metana, air, senyawa anorganik atau biomassa melalui asimilasi mikroba. Alga berfungsi sebagai bahan baku yang sangat baik untuk produksi plastik karena banyak keuntungannya seperti hasil tinggi dan kemampuan untuk tumbuh di berbagai lingkungan (Balaji *et al.*, 2011).

Alga digunakan untuk produksi PHB. Pemanfaatan industri Alga sebagai produsen PHB memiliki keuntungan mengkonversi limbah karbondioksida, gas rumah kaca menjadi plastik ramah lingkungan yang menggunakan energi sinar matahari. Untuk menyimpulkan, kondisi lingkungan memang memainkan peran penting dalam produksi PHB dari *Chlorella vulgaris* PB (1-6). Meskipun diisolasi dari sumber air tawar yang berbeda, produksi PHB mereka bervariasi dari satu sumber ke yang lain, yang mungkin tergantung pada ekosistem masing-masing, di mana lingkungan memainkan peran utama dalam produksi PHB (Rebecca & Priya, 2018).

Alga digunakan untuk produksi PHB, untuk produksi bioplastik yang menawarkan peluang efisiensi ekonomi dengan mengurangi biaya. *Chlorella vulgaris* PB (1-6) diisolasi dari sumber air tawar yang berbeda dan diskriminasi untuk produksi PHB menggunakan Sudan black B dan Nile Blue Stain. Produksi PHB dioptimalkan menggunakan media yang berbeda dan di bawah berbagai parameter seperti Aerasi; Efek fosfat dan Sodium asetat dan lain sebagainya. PHB diekstraksi menggunakan kloroform panas dan jumlah PHB yang dihasilkan diperkirakan dengan membaca absorbansi pada 235 nm (Rebecca & Priya, 2018).

Daftar Pustaka

- Abhishek K., C. Lakshmikanthan. & Sunil K. (2018). Physicochemical analysis and isolation of microbes from groundwater nearby landfill site: A case study. *Indian Journal of Experimental Biology*, 56, 526-530.
- Allsop, P.J., Moo-Young, M. & Sullivan, G. R. (1990). The dynamics and control of substrate inhibition in activated sludge. *Critical Reviews in Environmental Control*, 20, 115-127.
- Alvarenga N, Birolli WG, Nitschke M, De-O-Rezende MO, Selegim MH, et al. (2015). Biodegradation of chlorpyrifos by whole cells of marine-derived fungi *Aspergillus sydowii* and *Trichoderma* sp. *J Microb Biochem Technol* 7: 133-139.
- Ansaruddin PA, Vijayalakshmi K. (2003). The womb is not safe anymore. *Indigenous Agriculture News*.
- Armbrust KL. (2001). Chlorothalonil and chlorpyrifos degradation products in golf course leachate. *Pest manage Sci* 57: 797-802.
- Autry, A. R. & Ellis, G. M. (1992). Bioremediation: an effective remedial alternative for petroleum hydrocarbon-contaminated soil. *Environmental Progress*, 11, 318-23.
- Balakrishnan SL, Rao PVVP. (2019). Biodegradation of Chlorpyrifos by bacterial strains isolated from agricultural soils of Visakhapatnam district. *J. Bioremediat Biodegrad* 10: 459.

- Balaji S, Gopi K, Layanya B, Muthuyelan B. (2011). Isolation and optimization of Poly-hydroxybutyrates producing cyanobacterial strains. *International Journal of Applied Biology and Pharmaceutical Technology* 3: 137-145.
- Brown LM, Blair A, Gibson R, Everett GD, Cantor KP, et al. (1990). Pesticide exposures and other agriculture risk factors for leukemia among men in Iowa and Minnesota. *Cancer Research* 50: 6585-6591.
- Cerniglia CE and Gibson DT. Metabolism of naphthalene by *Cunninghamella elegans*. *Applied and Environmental Microbiology* 1977; 34 363-370.
- Chaube P, Indurkar H, Moghe S. Biodegradation and decolorisation of dye by mix consortia of bacteria and study of toxicity on *Phaseolus mungo* and *Triticum aestivum*. *Asiatic Journal of Biotechnology Resources* 2010; 01 45-56.
- Chauhan A, Layton AC, Williams DE, Smart AE, Ripp S, et al. Draft genome sequence of the polycyclic aromatic hydrocarbon-degrading genetically engineered bioluminescent bioreporter *Pseudomonas fluorescens* HK44. *J Bacteriol* 193: 5009-5010.
- Chen S, Liu C, Peng C, Liu H, Hu M, et al. (2012). Biodegradation of chlorpyrifos and its hydrolysis product 3, 5, 6-trichloro-2-pyridinol by a new fungal strain *Cladosporium cladosporioides* Hu-01. *Plos One* 7: e47205.
- Compeau, G. C , Mahaffey, W. D. & Patras, L. (1991). Full-scale bioremediation of contaminated soil and water. In *Environmental Biotechnology for Waste Treatment*, ed. G.S.

- Sayler, R. Fox & J . W . Blackburn, pp. 91-109. New York: Plenum Press.
- Dhall P, Kumar R, Kumar A. Biodegradation of sewage wastewater using autochthonous bacteria. *Scientific World Journal* 2012 PMC3260589.
- Dora DRT. Biodegradasi Limbah cair organik menggunakan konsorsium bakteri sebagai bahan penyusunan buku ajar matakuliah pencemaran lingkungan. *Jurnal Pendidikan Biologi Indonesia* 2017, 3(2) 95-102.
- Dos Santos AB, Cervantes JF, Van Lier BJ. Review paper on current technologies for decolourisation of textile wastewaters: perspectives for anaerobic biotechnology. *Bioresource Technology* 2007; 98 2369-2385.
- Eckenfelder, W. W. Jr & Norris, R. D. (1993). Applicability of biological processes for treatment of soils. In *Emerging Technologies in Hazardous Waste Management* 111, ACS Symposium Series 518, ed. D. W. Tedder & F. G. Pohland, pp. 138-58. Washington, DC: American Chemical Society.
- Falcon DB. (2004). Biodegradable plastic in the environment. MSC Thesis, UFSCar, San Paulo, Brazil.
- Floodgate G. The fate of petroleum in marine ecosystems. In *Petroleum Microbiology*, R. M. Atlas, Ed., pp. 355–398, Macmillan, New York, NY, USA, 1984.
- Ford CZ, Sayler GS, Burlage RS (1999). Containment of a genetically engineered microorganism during a field bioremediation application. *Appl Microbiol Biotechnol* 51: 397-400.

- Garbisu C, Alkorta I. Phytoextraction: A cost-effective plant based technology for the removal of metals from the environment. *Bioresource Technology* 2001; 77(3) 229-236.
- Happy AR, Masyamsir, Dhahiyat Y. Distribusi kandungan logam berat Pb dan Cd pada kolom air dan sedimen daerah aliran sungai Citarum Hulu. *Jurnal Perikanan dan Kelautan* 2012; 3(3) 175-183.
- Hasminar RF, Endang S. Potensi Bakteri Indigen dalam Mendegradasi Limbah Cair Pabrik Kulit secara in vitro. *Bioeksperimen* 2017; 3(1) 1-10.
- Hong Y, Xu M, Guo J et al. Respiration and growth of *Shewanella* decolorations S12 with an azo compound as the sole electron acceptor. *Applied and Environmental Microbiology* 2007; 73 64-72.
- Johnson, L. D. & James, R. H. (1989). Sampling and analysis of hazardous wastes. In *Standard Handbook of Hazardous Waste Treatment and Disposal*, ed. H. M. Freeman, pp. 13.3-13.44. New York: McGraw-Hill.
- Kaake, R. H., Roberts, D.J., Stevens, T. O., Crawford, R.L. & Crawford, D.L. (1992). Bioremediation of soils contaminated with the herbicide 2-j-butyl-4,6-dinitrophenol (dinoseb). *Applied and Environmental Microbiology*, 58, 1683-1698.
- Kafilzadeh F, Sahragard P, Jamali H and Tahery Y. Isolation and identification of hydrocarbons degrading bacteria in soil around Shiraz Refinery. *African Journal of Microbiology Research* 2011; 4(19) 3084-3089.

- Kanade SN, Ade1 AB and Khilare VC. Malathion Degradation by *Azospirillum lipoferum* Beijerinck. *Science Research Reporter* 2012; 2(1) 94-103.
- Kiely T, Donaldson D, Grube A (2004). Pesticide industry sales and usage: 2000 and 2001 market estimates. Environmental Protection Agency, Washington, USA.
- Leitao, E., Moradas-Fereira, P., & De Marco, P. (2009). Evidence of methansulfonate utilizers in the Sargasso Sea metagenome. *Basic Microbiology*, 49: 24-30.
- Levin, M. A. & Gealt, M. A. (1993). *Biotreatment of Industrial and Hazardous Waste*. New York: McGraw-Hill.
- Litchfield, C. D. (1991). Practices, potential, and pitfalls in the application of biotechnology to environmental problems. In *Environmental Biotechnology for Waste Treatment*, ed. G. Sayler et al., pp. 147-57. New York: Plenum Press.
- Lloyd JR and Lovley DR. Microbial detoxification of metals and radionuclides. *Current Opinion in Biotechnology* 2001; 12 248–253.
- Matavuly MN and Molitoris HP. Marine fungi degraders of poly-3-hydroxyalkanoate based plastic materials. *Proceedings for Natural Sciences* published by MaticaSrpska 2009; 116 253-265.
- Maya K, Singh RS, Upadhyay SN, Dubey Sk, et al. (2011). Kinetic analysis reveals bacterial efficacy for biodegradation of chlorpyrifos and its hydrolyzing metabolite TCP. *Process Biochemistry* 46: 2130-2136.

- McMurry J (2000). In Aromatic hydrocarbons. Organic Chemistry. 5th ed Brooks/Cole. New York: Thomas Learning
- Mrozik A, Piotrowska-Seget Z. Bioaugmentation as a strategy for cleaning up of soils contaminated with aromatic compounds. *Microbial Research* 2006; (2009), doi: 10.1016/j.micres.2009.08.001.
- Murray, W. D. & Richardson, M. (1993). Development of biological and process technologies for the reduction and degradation of pulp mill wastes that pose a threat to human health. *Critical Reviews in Environmental Science & Technology*, 23, 157-94.
- Neilson, A. H., Allard, A-S., Hynning, P-A. & Remberger, M. (1991). Distribution, fate and persistence of organochlorine compounds formed during production of bleached pulp. *Toxicological and Environmental Chemistry*, 30, 3–41.
- Nyer, E. K. (1992). *Groundwater Treatment Technology*. New York: Van Nostrand Reinhold.
- Ogunseitan, O. A. & Olson, B. H. (1993). Effect of 2-hydroxybenzoate on the rate of naphthalene mineralization in soil. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 38, 799–807.
- Olaniran AO, Pillay D, Pillay B. (2006) Biostimulation and bioaugmentation enhances aerobic biodegradation of dichloroethenes. *Chemosphere* ; 63 600-608.
- Ononiwu P, Ekwenye U. Biotreatment of lipid-rich wastewater by lipolytic bacteria from abattoir along its receiving river (Aba

- River), Nigeria. *International Journal of Advanced Research and Review*, 2017, 2(4) 1-9.
- Pakala SB, Gorla P, Pinjari AB, Krovidi RK, Baru R, et al. (2007). Biodegradation of methyl parathion and p-nitrophenol: Evidence for the presence of a p-nitrophenol 2-hydroxylase in a Gram-negative *Serratia* sp. strain DS001. *Applied Microbiol Biotechnol* 73: 1452-1462.
- Petrasek, A. C , Kugelmann, I. J., Austern, B. M., Pressley, T. A., Winslow, L. A. & Wise, R. H. (1983). Fate of toxic organic compounds in wastewater treatment plants. *Journal of the Water Pollution Control Federation*, 55, 1286-1296.
- Pflug, A. D. & Burton, M. B. (1988). Remediation of multimedia contamination from the wood-preserving industry. In *Environmental Biotechnology*, ed. G. S. Omenn, pp. 193-201. New York: Plenum Press.
- Porwal HJ, Mane AV, Velhal SG. (2015). Biodegradation of dairy effluent by using microbial isolats obtained from acivated sludge. *Water Resources and Industry*, pp. 1-15
- Priadie B, Rinjani RR, Arifin ZM, Safitri R, Imanda N. Bioremediation of cimuka river stream by the consortium of *Bacillus coagulans*; *Bacillus pumilus*; *Bacillus subtilis*, *Paenibacillus amyloliticus*, and *Nitrosomonas* sp. *Scientific Papers III: Series E. Land Reclamation, Earth Observation & Surveying, Environmental Engineering*.
- Racke KD (1993). Environmental fate of chlorpyrifos: Review. *Environ Contam Toxicol* 131: 1-151.

- Raffi F, Hall JD and Cernigila, CE. Mutagenicity of azo dyes used in foods, drugs and cosmetics before and after reduction by *Clostridium* species from the human intestinal tract. *Food and chemical Toxicology* 1997; 35 897-901
- Rebecca R & Piya R.I. (2018). Isolation and optimization of PHB (Poly-hydroxybutyrate) based biodegradable plastics from *Chlorella vulgaris*. *J Bioremediat Biodegrad* 9: 433
- Reddy, C.A. & Matthew, Z. (2001). Bioremediation Potential of White-Rot Fungi. In: *Fungi in Bioremediation*. Gadd, G.M. (Ed.). Cambridge University Press: Cambridge, UK.
- Ripp S, Nivens DE, Ahn Y, Werner C, Jarrell J, et al (2000). Controlled field release of a bioluminescent genetically engineered microorganism for bioremediation process monitoring and control. *Environ Sci Technol* 34: 846-853.
- Riser-Roberts, E. (1992). *Bioremediation of Petroleum Contaminated Sites*. Boca Raton, FL: C. K. Smoley.
- Rogerson A, and Berger J. Effect of crude oil and petroleum-degrading microorganisms on the growth of freshwater and soil protozoa. *Journal of General Microbiology* 1981; 124 53-59.
- Romantschuk M., Sarand I , & Peltola R,. (2000). Means to improve the effect of in situ bioremediation of contaminated soil: an overview of novel approaches. *Environmental Pollution*. 107 (2): 179-85.

- Rogers, J.A., Tedaldi, D.J. & Kavanaugh, M. C. (1993). A screening protocol for bioremediation of contaminated soil. *Environmental Progress*, 12, 146–56.
- Sasikumar, C.S. & Papinazath, T. (2003). Environmental Management: Bioremediation of Polluted Environment. *Proceedings of the Third International Conference on Environment and Health*. Yprk University. Hal: 465-469.
- Sayler GS, Ripp S. (2000). Field applications of genetically engineered microorganisms for bioremediation processes. *Current Opinion in Biotechnology* ; 11 286-289.
- Scheibenbogen, K., Zytner, R. G., Lee, H. & Trevors, J.T. (1994). Enhanced removal of selected hydrocarbons from soil by *Pseudomonas aeruginosa* UG2 biosurfactants and some chemical surfactants. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 59, 53-59.
- Seeger M, Hernández M, Méndez V, Ponce B, Córdova1 M and González M. Bacterial degradation and bioremediation of chlorinated herbicides and biphenyls. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition* 2010; 10 (3) 320-332.
- Shen YJ, Lu P, Mei H, Yu HJ, Hong Q, et al. (2010). Isolation of a methyl parathion-degrading strain *Streptophomonas* sp.. SMSP-1 and cloning of the *ophc2* gene. *Biodegradation* 21: 785-792.
- Singleton, I. (1994). Microbial metabolism of xenobiotics: fundamental and applied research. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 59, 9–23.

- Struthers JK, Jayachandran K, Moorman TB. Biodegradation of atrazine by *Agrobacterium radiobacter* J14a and use of this strain in bioremediation of contaminated soil. *Applied Environmental Microbiology* 1998; 64 3368-3375.
- Tina E, Metka F. (2011). Organophosphorus pesticides – mechanisms of their toxicity: Organophosphorus pesticides, mechanisms of their toxicity. National Institute of Biology pp: 241-260.
- Trogl J, Kuncova G, Kubicoya L, Parik P, Halova J, et al. (2007). Response of the bioluminescent bioreporter *Pseudomonas fluorescens* HK44 to analogs of naphthalene and salicylic acid. *Folia Microbiol* 52: 3-14
- Verma P, Madamwar, D. Decolorization of synthetic dyes by a newly isolated strain of *Serratia marcescens*. *World Journal of Microbiology and Biotechnology* 2003; 19 615- 618.
- Vidali, M. (2001). Bioremediation: An overview. *Journal of Applied Chemistry*, 73 (7): 1163-1172.
- Vogel TM, Simonet P, Jansson JK, Hirsch PR, Tiedie JM, et al. (2009). TerraGenome: a consortium for the sequencing of a soil metagenome. *Nat Rev Microbiol* 7: 252.
- Walker JD, Colwell RR, Vaituzis Z and Meyer SA. Petroleum-degrading achlorophyllous alga *Protothecozopfi*. *Nature* (London) 1975; 254 423-424.
- Walsh, J. & Deery,. (1999). Understanding the peripheral workforce: evidence from the service sector. *Human Resource Management Journal*, 9: 50-63.

- Wiedemeier TH, Miller RN and Wilson JT. Significance of anaerobic processes for the Intrinsic bioremediation of fuel hydrocarbons: In, Proceedings of the Petroleum Hydrocarbons and Organic Chemicals in Groundwater - Prevention, Detection, and Remediation Conference, November 29 - December 1, 1995, Houston Texas.
- Williams, R.T., Ziegenfuss, P.S. & Sisk, W.E. (1992). Composting of explosives and propellant contaminated soils under thermophilic and mesophilic conditions. *Journal of Industrial Microbiology*, 9, 137-44.
- Wu, S. & Gschwend, P. M. (1986). Sorption kinetics of hydrophobic compounds to natural sediments and soils. *Environmental Science & Technology*, 20, 717–25.
- Xu G, Zheng W, Li Y, wang S, Zhang J, et al. (2008). Biodegradation of chlorpyrifos and 3, 5, 6-trichloro-2-pyridinol by a newly isolated *Paracoccus* sp. strain TRP. *Int Biodeter Biodegr* 62: 51-56.
- Yakimov MM, Timmis KN and Golyshin PN. Obligate oil-degrading marine bacteria. *Current Opinion in Biotechnology*, 2007; 18(3) 257-266.
- Zheng Y, Yanful EK, Bassi AS, et al. (2005). A review of plastic waste biodegradation. *J. Biotechnol* 25 (4): 243-250.

Tentang Penulis



Hasminar Rachman Fidiastuti, S. Si., S. Pd., M. Pd,

Lahir di Malang, penulis menyelesaikan pendidikan jenjang S1 jurusan Biologi dan Pendidikan Biologi (Double Degree) pada tahun 2010. Pada tahun 2012 melalui program Beasiswa Unggulan, penulis menempuh S2 Pendidikan Biologi di Universitas Negeri Malang dan selesai pada tahun 2014 dengan tesis berjudul *Pengembangan Modul Matakuliah Pencemaran Lingkungan melalui Potensi Biodegradasi Sungai Badeg Kota Malang menggunakan Bakteri Inidgen Lipolitik*. Sejak tahun 2015, penulis menjadi bagian dari tenaga pengajar tetap di Fakultas Ilmu Kesehatan, Universitas Tribhuwana Tungadewi. Pada tahun 2016, penulis menjadi bagian dari tim penyusun borang pendirian program studi Pendidikan Biologi, yang saat ini telah mendapatkan ijin operasional penyelenggaraan dan menjadi bagian dari Fakultas Ilmu Pendidikan, Universitas Tribhuwana Tungadewi Malang. Tahun 2018 menjadi debut pertama penulis di bidang penelitian dan mendapatkan hibah penelitian Kemenristekdikti skim Penelitian Antar Perguruan Tinggi (PKPT) berjudul *Isolasi dan Pemetaan Gen Bioremediator Limbah Cair Pabrik Batik Tulungagung*, yang salah satu produknya adalah penulisan buku ini. Tahun 2019,

penulis mendapatkan hibah Program Kemitraan Masyarakat dari Kemenristekdikti dalam penyelenggaraan kegiatan pengabdian kepada masyarakat. Beberapa matakuliah yang diampu oleh penulis adalah Biologi Umum, Teknik Laboratorium, Mikrobiologi, Belajar dan Pembelajaran, Keanekaragaman Cryptogamae, dan Keanekaragaman Phanerogamae.



Anis Samrotul Lathifah, S. Pd., M. Pd, Penulis menyelesaikan jenjang pendidikan S1 dan S2 Pendidikan Biologi di Universitas Negeri Malang dengan tesis berjudul *Identifikasi Variasi Genetik Kerbau (Bubalus bubalis) Endemik Lokal Kudus Berbasis Mikrosatelit sebagai Bahan Ajar berbasis Blended Learning pada Matakuliah Teknik Analisis Biologi Molekuler*. Menjadi tenaga pengajar di program studi Pendidikan Biologi, Universitas Tribhuwana Tungadewi sejak tahun 2016 dan mengampu mata kuliah Biologi Sel, Psikologi Pendidikan, Kemampuan Dasar Mengajar dan Genetika. Tahun 2017, mendapat dana pengabdian kepada masyarakat dari kemenristekdikti dan pada tahun 2018 mendapat hibah penelitian skim Penelitian Dosen Pemula dan PKPT bersama penulis pertama.



Prof. Dr. Agr. H. Mohamad amin, S. Pd., M. Si, Penulis merupakan guru besar bidang Pendidikan Biologi di Universitas Negeri Malang yang menempuh S1 Pendidikan Biologi di IKIP Malang, S2 Biologi di Institut Teknologi Bandung, dan S3 Animal

Breeding and Husbandry with veterinary clinic di Martin-Luther Universitaet Halle-Witteberg pada tahun 2003. Penulis merupakan Dosen Berprestasi III FMIPA UM pada tahun 2006. Telah memperoleh paten pada tahun 2007 dengan judul *Proses Ekstraksi Tapak Dara dengan Pelarut Alkohol*. Penulis telah banyak memberikan kontribusi dalam penelitian dan pembelajaran terutama pada bidang Analisis Biologi Molekuler, Advance Cell and Molecular Biology, Biologi Modern, Bioteknologi, dan Bioinformatika.



Dr. Yudhi Utomo, M. Si, Penulis merupakan tenaga pengajar di bidang ilmu kimia dan sampai saat ini aktif menjadi kepala laboratorium kimia di Universitas Negeri Malang. Menyelesaikan jenjang S1 Pendidikan Kimia di IKIP Malang, S2 Kimia Analitik di Universitas Gajah Mada, dan S3 Ilmu Lingkungan di Universitas Gajah Mada pada tahun 2011. Penulis telah banyak memberikan kontribusi dalam beberapa penelitian yang berkaitan dengan keberadaan logam berat pada lingkungan melalui hibah penelitian skim Fundamental, Penelitian Unggulan Perguruan Tinggi, dan Penelitian Antar Perguruan Tinggi.



Chandra Adi Prabowo, S. Pd., M. Pd, Penulis lahir di Wonogiri, lulusan program studi pendidikan biologi, Universitas Sebelas Maret dan melanjutkan S2 Pendidikan Biologi di Universitas Negeri Malang. Menjadi tenaga pengajar di Universitas Sebelas Maret sejak tahun 2019.