

**TEKNIK BIOREMEDIASI: KEUNTUNGAN, KETERBATASAN DAN PROSPEK RISET****Irma Melati**

Pusat Penelitian Limnologi LIPI

**ABSTRAK**

Bioremediasi merupakan teknik biologi yang digunakan untuk menyisihkan atau menghilangkan polutan dari lingkungan dengan menggunakan agen biologi seperti bakteri, cendawan, alga dan tanaman. Bioremediasi dikenal sebagai teknik yang relatif ekonomis dan ramah lingkungan dibandingkan teknik lain seperti fisika dan kimia. Teknik bioremediasi telah banyak diterapkan secara luas di berbagai negara. Beberapa penelitian membuktikan kemampuan teknik ini dalam mendegradasi berbagai kontaminan. Namun sangat disayangkan informasi tentang prinsip, teknik, keuntungan dan keterbatasan dari teknik-teknik bioremediasi masih terbatas. Makalah ini bertujuan untuk mereview tentang teknik-teknik, keuntungan dan keterbatasan, serta kemungkinan prospek riset yang bisa dilakukan dari teknik-teknik bioremediasi. Teknik bioremediasi yang dipaparkan dalam makalah ini adalah teknik in situ (*Natural attenuation*, fitoremediasi, bioventing, bioaugmentasi dan biosparging) dan eks-situ (bioreaktor, landfarming dan vermicomposting). Pemilihan teknik bioremediasi yang tepat untuk setiap kasus tergantung pada banyak faktor seperti jenis dan konsentrasi kontaminan atau polutan, sifat situs terkontaminasi, ambang batas konsentrasi yang diatur, waktu yang tersedia untuk melakukan remediasi, biaya dan urgensi yang diperlukan. Tidak semua teknik bioremediasi cocok untuk semua kasus dan dapat dikatakan yang terbaik. Masing-masing teknik punya kelebihan dan keterbatasan masing-masing. Teknik bioremediasi eks situ cenderung lebih mahal karena biaya tambahan yang dikaitkan dengan penggalian dan transportasi. Meskipun demikian, teknik ini dapat digunakan untuk mentreatmen berbagai polutan secara terkendali. Sebaliknya, teknik in situ dinilai lebih ekonomis karena tidak dibutuhkan biaya tambahan untuk penggalian; namun, biaya pemasangan peralatan di tempat, ditambah dengan ketidakmampuan untuk memvisualisasikan dan mengontrol situs yang tercemar dapat menyebabkan beberapa teknik bioremediasi in situ tidak efisien.

**Kata Kunci:** bioremediasi, in situ, eks situ, ramah lingkungan, ekonomis.

**PENDAHULUAN**

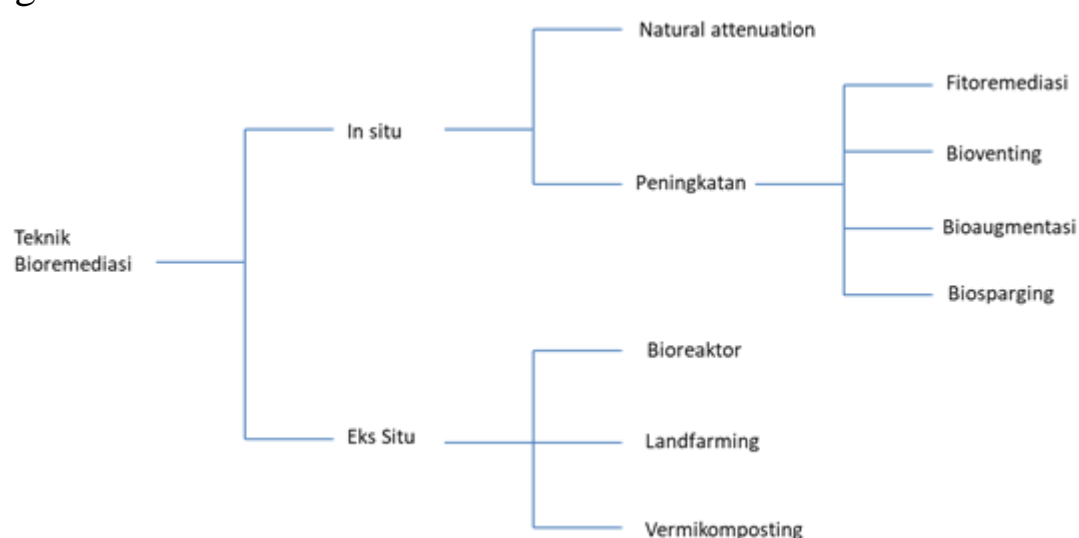
**B**ioremediasi merupakan teknik remediasi yang bertujuan untuk mendegradasi atau mendetoksifikasi baik itu polutan organik maupun anorganik dengan menggunakan agen biologi seperti ganggang, cendawan, bakteri dan tanaman. Bioremediasi dikenal sebagai teknik remediasi yang ramah lingkungan dan lebih ekonomis dibanding teknik lain seperti fisika dan kimia. Dalam proses bioremediasi, limbah atau polutan diubah atau didegradasi secara lengkap dengan produk akhir senyawa anorganik seperti karbon dioksida, air, dan metana (Lukic et al. 2017). Bioremediasi adalah proses yang menggunakan mekanisme biologi untuk mengurangi konsentrasi polutan atau zat pencemar ke level tidak berbahaya baik melalui proses degradasi, detoksifikasi, mineralisasi ataupun transformasi (Azubuike et al. 2016). Efektivitas bioremediasi

tergantung pada kemampuan metabolisme mikroba dalam menurunkan/ mendetoksifikasi atau mengubah polutan, yang juga dipengaruhi oleh aksesibilitas dan bioavailabilitas polutan. Sedangkan efektivitas mikroorganisme dipengaruhi oleh kondisi lingkungan seperti substrat (jenis dan tipe senyawa yang didegradasi), suhu dan kelembaban. Dalam proses bioremediasi, reaksi-reaksi biologis yang utama adalah reaksi metabolisme sel. Senyawa polutan yang berbahaya dapat didegradasi oleh mikroorganisme baik di dalam ataupun diluar sel melalui reaksi redoks. Reaksi ini dikatalisis oleh enzim-enzim mikrobial yang dihasilkan mikroorganisme (Rahayu 2005).

Berdasarkan situs aplikasinya, secara umum teknik bioremediasi dapat dibagi menjadi dua kategori yaitu eks situ dan in situ. Beberapa hal yang harus dipertimbangkan dalam memilih teknik

bioremediasi yang tepat untuk diaplikasikan yaitu sifat polutan, kedalaman dan tingkat polusi, jenis kebijakan lingkungan, lokasi, biaya, dan lingkungan (Frutos et al. 2012; Smith et al. 2015). Keberhasilan bioremediasi dipengaruhi oleh konsentrasi oksigen dan nutrisi, suhu, pH, dan faktor abiotik lainnya. Bioremediasi telah banyak digunakan di sejumlah negara di seluruh dunia termasuk Indonesia. Berdasarkan beberapa hasil penelitian menunjukkan kemampuan bioremediasi dalam menangani berbagai jenis polutan, namun sayang masih sedikit informasi tentang prinsip dasar, teknik-teknik, kelebihan dan keterbatasan dari masing-masing teknik dalam bioremediasi.

Padahal pemahaman tentang jenis teknik bioremediasi menjadi penting dalam menentukan keberhasilan bioremediasi itu sendiri. Tujuan makalah ini adalah memaparkan beberapa teknik bioremediasi in situ (Natural attenuation, fitoremediasi, bioventing, bioaugmentasi dan biosparging) dan eks-situ (bioreaktor, landfarming dan vermicomposting), menyoroti keuntungan dan keterbatasan, serta kemungkinan prospek riset yang bisa dilakukan dari teknik-teknik bioremediasi tersebut di atas (gambar 1).



Gambar 1. Teknik Bioremediasi

## HASIL DAN PEMBAHASAN

### Teknik Bioremediasi In situ

Teknik bioremediasi In situ melibatkan pengolahan polutan langsung di tempat yang tercemar. Teknik ini umumnya lebih disenangi karena dianggap lebih murah dibandingkan teknik bioremediasi eks situ karena tidak diperlukan biaya tambahan untuk memindahkan dan mengeduk polutan. Meskipun demikian, untuk beberapa kasus teknik ini tetap membutuhkan biaya yang tidak sedikit untuk desain dan instalasi peralatan canggih dalam rangka meningkatkan aktivitas mikrob selama remediasi di tempat yang tercemar. Telah banyak penelitian yang membuktikan keberhasilan bioremediasi in situ dalam mengurangi berbagai polutan seperti pewarna, logam berat, dan hidrokarbon terklorinasi pada situs yang tercemar (Folch et al. 2013; Frascari et al. 2015; Roy et al. 2015). Kesuksesan bioremediasi in situ dipengaruhi

kondisi lingkungan seperti status akseptor elektron, kelembaban, ketersediaan nutrisi, pH dan temperatur (Philp and Atlas 2005). Ada beberapa teknik dalam bioremediasi in situ yaitu *natural attenuation* (pemulihan secara alami) dan melalui peningkatan (Fitoremediasi, bioventing, bioaugmentasi dan biosparging ).

#### *Natural attenuation*

Perbaikan secara alami (Natural attenuation) terkait dengan aktivitas degradasi mikroorganisme indigenous. Beberapa keuntungan dari penggunaan metode ini yaitu kerusakan habitat bisa dihindarkan, memungkinkan ekosistem kembali ke kondisi aslinya dan memungkinkan detoksifikasi senyawa beracun (Kaczorek 2013). Natural attenuation adalah opsi tanpa tindakan yang memungkinkan polutan dihilangkan dan didegradasi dengan cara alami. Metode ini biasanya diterapkan pada kasus tumpahan

minyak di lokasi terpencil atau tidak dapat diakses dengan tingkat penghilangan alami cepat, atau tumpahan di situs sensitif di mana tindakan pembersihan dapat menyebabkan lebih banyak kerusakan daripada perbaikan. Perlu juga dicatat bahwa ketika teknik ini diterapkan, program pemantauan masih diperlukan untuk menilai kinerja proses ini. Zhu et al. (2001) menjelaskan beberapa mekanisme yang bisa terjadi pada teknik bioremediasi *natural attenuation* pada tumpahan minyak yaitu:

a. Evaporasi (Penguapan).

Penguapan adalah proses pembersihan alami yang paling penting pada tahap awal tumpahan minyak. Proses ini menghasilkan penghilangan komponen berbobot lebih ringan dalam minyak. Bergantung pada komposisi tumpahan minyak, hingga 50 persen komponen yang lebih beracun dan lebih ringan dari minyak dapat menguap dalam 12 jam pertama setelah tumpahan.

b. Fotooksidasi

Fotooksidasi terjadi ketika oksigen di bawah sinar matahari bereaksi dengan komponen minyak. Proses ini menyebabkan terjadinya pemecahan senyawa yang lebih kompleks menjadi senyawa yang lebih sederhana yang cenderung lebih ringan dan lebih mudah larut dalam air, sehingga memungkinkan untuk dihilangkan lebih lanjut melalui proses lain.

c. Biodegradasi

Proses ini melibatkan berbagai jenis mikroorganisme yang mampu mengoksidasi hidrokarbon minyak bumi. Mikroorganisme ini tersebar luas di alam. Biodegradasi adalah mekanisme yang sangat penting untuk menghilangkan komponen minyak yang tidak mudah menguap dari lingkungan. Ini adalah proses yang relatif lambat dan mungkin membutuhkan berbulan-bulan hingga bertahun-tahun bagi mikroorganisme untuk mendegradasi

sebagian besar dari minyak yang terdampar di dalam sedimen lingkungan laut dan / atau air tawar.

Teknik *natural attenuation* mempunyai beberapa keterbatasan yaitu proses bioremediasi berlangsung cukup lama karena keberadaan mikrob pendegradasi polutan dalam tanah hanya 10% dari total mikroba yang ada. Hal penting lain yang harus diingat dari aplikasi *natural attenuation* adalah karena proses pembersihan berjalan cukup lambat sehingga jika ada target lain yang lebih penting dari pembersihan polutan seperti untuk melindungi habitat tertentu atau sumber daya vital dari dampak minyak maka proses ini tidak bisa diambil (Zhu et al. 2001). Metode ini mungkin tepat digunakan jika latar belakang konsentrasi nutrisi cukup tinggi sehingga biodegradasi intrinsik dapat terjadi mendekati tingkat maksimum yang diharapkan. Untuk mengatasi hal tersebut berkembanglah teknik bioremediasi melalui beberapa peningkatan.

Perbaikan Melalui Peningkatan

Perbaikan dengan teknik ini melibatkan campur tangan manusia dengan tujuan untuk mempercepat dan meningkatkan proses bioremediasi. Adapun yang termasuk teknik ini adalah Fitoremediasi, Bioventing, Bioaugmentasi dan Biosparging (Azubeike et al. 2016).

Fitoremediasi

Fitoremediasi adalah teknologi bioremediasi dengan memanfaatkan tanaman untuk menghilangkan kontaminan dari tanah dan air (EPA 1999; EPA 2000). Fitoremediasi dianggap sebagai teknologi yang efektif untuk mengkonsentrat unsur atau senyawa seperti logam berat dan polutan lainnya dari lingkungan dengan menggunakan tanaman. Dalam ekosistem alami, tanaman bertindak sebagai filter dan memetabolisme zat yang dihasilkan oleh alam. Kadang-kadang, tanaman juga digunakan untuk mempercepat laju degradasi atau untuk menghilangkan kontaminan, baik sendiri atau bersama dengan mikroorganisme

(Prescott et al. 2002). Keberhasilan fitoremediasi tergantung pada interaksi eksudat akar dan mikroorganisme in-situ. Terdapat lima mekanisme fitoremediasi sebagai berikut :

#### A. Fitroekstraksi

Fitoeekstraksi adalah suatu proses penyerapan logam berat oleh akar tanaman dan mengakumulasi logam berat tersebut ke bagian-bagian tanaman seperti akar, batang dan daun. Fitoeekstraksi biasanya berperan dalam penghilangan logam berat seperti Cd, Pb, Zn, Ar dan lain- lain dan mengakumulasi logam-logam tersebut pada bagian-bagian tanaman. Beberapa Jenis-jenis tanaman yang di,aporkan menggunakan mekanisme fitoeekstraksi adalah *Viola baoshanensis*, *Sedum alfredii*, *Rumex crispus*, dan *Z. marina*. (Lee et al. 2019; Zhuang et al. 2007; Prescott et al. 2002; Raskin & Ensley 2000; Macek et al. 2000).

#### B. Fitostabilisasi

Fitostabilisasi adalah proses atau mekanisme yang digunakan oleh tanaman untuk menurunkan mobilitas dan bioavailabilitas polutan (biasanya logam berat) dari lingkungan dengan cara mengeluarkan suatu senyawa kimia tertentu untuk mengimobilisasi logam berat di daerah rizosfer (Lee et al. 2019, Cheng et al. ). Beberapa jenis tanaman yang dilaporkan menggunakan mekanisme fitostabilisasi adalah *Z. marina*, *Anthyllis vulneraria*, *Festuca arvernensis* dan *Koeleria vallesiana* (Frerot et al. 2006; Vasquez et al. 2006; Prescott et al. 2002;)

#### C. Rhizofiltrasi

Rhizofiltrasi adalah mekanisme penghilangan polutan (terutama logam berat) dari lingkungan perairan atau limbah cair melalui akar tanaman. Akar tanaman akan menyerap, mengendapkan, mengakumulasi logam berat tersebut dari situs yang terkontaminasi. Beberapa tanaman telah dilaporkan mempunyai kemampuan rhizofiltrasi seperti *Helianthus annuus* L., *Phaseolus vulgaris* L. var. *vulgaris*, *Eichhornia crassipes*, *Phragmites australis*, *Pistia stratiotes*, *Arundo donax*, *Salvinia molesta*,

*Trapa natans*, *Lemna minor*, *Helianthus annuus*, *Phaseolus vulgaris*, *Brassica juncea*, dan *Helianthus annuus* (Tiwari et al. 2019; Lee et al. 2019; Prescott et al. 2002; Dushenkov et al. 1995).

#### D. Fitodegradasi

Fitodegradasi adalah penguraian kontaminan dengan bantuan protein atau enzim yang dihasilkan dari interaksi tanaman dan mikroorganismenya yang ada di rhizosphere. Mekanisme ini biasanya terjadi pada degradasi polutan organik seperti DDT (Cheng et al. 2014). Beberapa jenis tanaman yang dilaporkan mempunyai kemampuan fitodegradasi adalah *Elodea canadensis* dan *Pueraria thunbergiana* (Prescott et al. 2002; Garrison et al. 2000).

#### E. Fitovolatilisasi

Fitovolatilisasi adalah kemampuan tanaman dalam mengambil polutan organik (contoh Se, CCl<sub>4</sub>, EDB, TCE) dari air dan menguapkannya ke udara (Cheng 2014). Tanaman seperti *Stanleya pinnata* and *Zea mays* dilaporkan mempunyai kemampuan fitovolatilisasi (Ayotamuno et al. 2007).

Terdapat beberapa keuntungan penggunaan teknik fitoremediasi yaitu ekonomis, ramah lingkungan, bisa diaplikasikan dalam skala besar, rendahnya biaya instalasi dan pemeliharaan, melindungi struktur tanah, menjegah erosi dan pencucian logam. Selain itu fitoremediasi bisa meningkatkan kesuburan dari tanah yang tercemar karena adanya masukan bahan organik. Meskipun demikian ada beberapa keterbatasan pada teknik ini yaitu dibutuhkan waktu pemulihan yang cukup lama, toksisitas dan bioavailabilitas tanaman, kedalaman akar tanaman dan rendahnya pertumbuhan tanaman (Azubeike et al. 2016). Sebagai tambahan, untuk beberapa kasus dibutuhkan biaya lebih untuk memanen tanaman dan kemungkinan terjadinya akumulasi polutan yang mungkin bisa dipindahkan sepanjang rantai makanan. Hal lain yang bisa menjadi keterbatasan teknik ini juga adalah rendahnya enzim katabolik yang dimiliki tanaman sehingga sangat susah untuk

mendegradasi polutan secara lengkap menjadi CO<sub>2</sub> dan air (Lee 2013).

### Bioventing

Bioventing adalah suatu metode bioremediasi in situ dengan menggunakan mikroba indigenous dalam mendegradasi kontaminan organik dengan menambahkan nutrisi dan atau tingkat udara untuk menyediakan oksigen agar proses biodegradasi meningkat. Bioventing dikenal sebagai teknik atau metode remediasi yang low-impact karena hanya menambahkan stimulan untuk meningkatkan kemampuan biodegradasi mikroba indigenous. Bioventing adalah teknologi remediasi in-situ yang menggunakan mikroorganisme lokal untuk menguraikan kontaminan organik yang terabsorpsi ke tanah di zona tak jenuh. Tanah di zona capillary fringe dan zona jenuh tidak terpengaruh oleh proses ini. Dalam bioventing, aktivitas bakteri secara alami ditingkatkan dengan injeksi udara (atau oksigen) ke zona tak jenuh (menggunakan sumur ekstraksi atau injeksi) dan jika perlu dengan menambahkan nutrisi. Bioventing adalah penggunaan induksi gerakan udara melalui tanah tak jenuh, dengan atau tanpa nutrisi. Definisi bioventing lainnya adalah proses penyuntikan dan ekstraksi udara menuju daerah vadose untuk menyediakan O<sub>2</sub> yang diperlukan untuk biodegradasi aerobik (Nugroho, 2006). Selain itu metode ini bersifat *cost-effective* dimana hanya membutuhkan teknologi minimal dan monitoring setelah aplikasi sehingga metode ini sangat cocok untuk wilayah-wilayah yang terkontaminasi dengan kontaminan yang bersifat low accessibility seperti petroleum hidrokarbon (PH) dan *Polycyclic aromatic hydrocarbons* (PAHs) (Xiao & Zytner, 2019; Hoehener and Ponsin 2014, Frutos et al. 2010).

Hasil penelitian Frutos et al. (2010) menunjukkan bahwa metode bioventing terbukti efektif untuk remediasi tanah yang terkontaminasi fenantrena. Hal ini terlihat dari tingginya tingkat reduksi yang diperoleh (93%), yang mengurangi konsentrasi fenantrena dari

1026 mg / kg tanah menjadi 74 mg / kg dalam waktu 7 bulan perlakuan. Thome et al. (2014) menunjukkan bahwa intensitas dan interval aliran tidak menghasilkan hasil yang berbeda nyata dalam penghilangan diesel dari tanah lempung. Hal ini mengindikasikan bahwa interval injeksi udara yang lebih lama dan intensitas injeksi yang rendah lebih ekonomis dalam bioventing tanah lempung yang terkontaminasi diesel. Marsya et al. (2013) melaporkan bioventing telah terbukti secara dramatis mengurangi bagian dari senyawa-senyawa yang dikenal sebagai BTEX (benzene, toluene, etil benzene dan xilena), yang telah terdeteksi dalam waktu satu tahun.

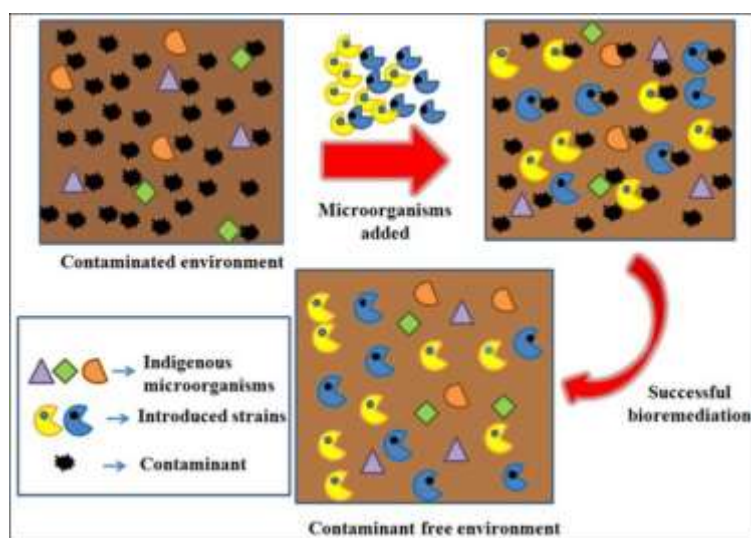
Keberhasilan bioremediasi berbasis bioventing bergantung pada jumlah titik injeksi udara, yang membantu mencapai distribusi udara yang seragam. Terlepas dari kenyataan bahwa desain bioventing adalah untuk mendorong aerasi di zona tak jenuh, itu dapat digunakan untuk proses bioremediasi anaerob terutama dalam mengobati zona vadose (zona tidak jenuh) yang tercemar dengan senyawa terklorinasi, yang sangat susah didegradasi dalam kondisi aerob (Azubuike et al. 2016).

Beberapa keuntungan menggunakan teknik bioventing yaitu peralatan yang dibutuhkan sederhana dan mudah dipasang, menciptakan gangguan minimal untuk operasi situs sehingga dapat digunakan untuk mengatasi area yang tidak dapat diakses (misal di bawah bangunan)., membutuhkan waktu perawatan yang singkat: biasanya 6 bulan hingga 2 tahun dalam kondisi optimal, mudah dikombinasikan dengan teknologi lain (misalnya air sparging, groundwater extraction) dan tidak memerlukan perawatan gas yang mahal. Meskipun demikian terdapat beberapa keterbatasan dalam teknik ini yaitu konsentrasi konstituen yang tinggi pada proses awal dapat menjadi racun bagi mikroorganisme, tidak cocok diterapkan untuk kondisi lokasi tertentu seperti tanah yang mempunyai permeabilitas rendah dan mengandung tanah liat tinggi, tidak dapat selalu

mencapai standar pembersihan yang sangat rendah, dan hanya bisa diterapkan untuk mengolah tanah pada zona tak jenuh sehingga metode lain mungkin juga diperlukan untuk mengolah tanah pada zona jenuh dan air tanah (EPA 2019).

### Bioaugmentasi

Bioaugmentasi adalah teknik bioremediasi yang menambahkan mikroba (bakteri, fungi ataupun alga) pada situs tercemar yang berfungsi sebagai pembersih kontaminan yang ada di daerah tersebut. Pendekatan bioaugmentasi digunakan jika populasi mikroba indigenous pendegradasi polutan di lingkungan tersebut rendah, polutan tersebar cukup banyak dan merupakan senyawa kompleks sehingga mikroba indigenous tak mampu mendegradasi secara sempurna dan ketika kecepatan biodegradasi merupakan kunci kesuksesan, dan bioaugmentasi dapat mempersingkat proses bioremediasi. Secara umum proses bioaugmentasi dapat di lihat pada Gambar 2.



Gambar 2 Proses bioaugmentasi (Goswani et al. 2018).

Teknik bioaugmentasi dilaporkan telah berhasil menyisihkan berbagai jenis polutan seperti senyawa terklorinasi dan terflorinasi, lignin, quinolin dan piridin, pewarna sintetik, sianida, nicotin, Diethylene Glycol Monobutyl Ether (DGBE), dan Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs). Meskipun demikian, terdapat beberapa keterbatasan dari teknik ini, yang paling umum adalah terkadang mikroorganisme yang ditambahkan tidak bisa berkompetisi dengan mikroba indigenous

sehingga efektivitasnya tidak terlihat. Selain itu faktor protozoan grazing, infeksi bakteriofage, dan ukuran inokulum bisa menjadim faktor pembatas dalam teknik ini (Nzila et al2016). Teknik bioaugmentasi disarankan bisa dikerjakan secara efektif ketika kondisi lingkungan terkontrol dengan baik, tetapi tidak ada jaminan jika metode ini digunakan skala lapangan. Beberapa penelitian menyarankan pemanfaatan mikroba hasil rekayasa genetika dalam proses bioaugmentasi tetapi hal inipun masih menjadi dilema karena daya tahan mikroba hasil rekayasa genetik di lingkungan masih dipertanyakan. Hal yang paling penting adalah isu keselamatan dan potensi kerusakan ekologi, serta persepsi publik tentang mikroorganisme hasil rekayasa genetik (Zhu et al. 2001).

### Biosparging

Teknik ini sangat mirip dengan bioventing dimana udara disuntikkan ke bawah permukaan tanah untuk merangsang aktivitas mikroba untuk meningkatkan kecepatan degradasi polutan dari situs tercemar. Namun, tidak seperti bioventing, udara disuntikkan ke zona jenuh, yang dapat menyebabkan pergerakan senyawa organik yang mudah menguap ke atas menuju zona tak jenuh. Efektivitas biosparging tergantung pada dua faktor utama yaitu: permeabilitas tanah, yang menentukan bioavailabilitas polutan untuk mikroorganisme, dan biodegradabilitas polutan (Philp dan Atlas 2005). Biosparging merupakan teknologi populer untuk memperbaiki situs yang terkontaminasi hidrokarbon (Paul et al. 2001).

Kao et al. (2008) melaporkan bahwa biosparging akifer yang terkontaminasi benzena, toluena, etilbenzena, dan xilen (BTEX) menghasilkan pergeseran dari kondisi anaerob ke aerob. Hal ini dibuktikan dengan adanya peningkatan oksigen terlarut, potensial redoks, nitrat, sulfat, dan mikrob heterotrof . Kondisi ini seiring dengan penurunan besi terlarut, sulfida, metana dan total mikrob anaerob dan methanogen. Secara keseluruhan penurunan BTEX (70%), menunjukkan bahwa

biosparging dapat digunakan untuk itu meremediasi air tanah yang terkontaminasi BTEX. Namun keterbatasan teknik biosparging, adalah bagaimana memprediksi arah aliran udara.

Menurut Papadopoulos dan Vatsaris (2005) biosparging mempunyai beberapa keuntungan yaitu 1). Teknologi ini sederhana dan relatif murah karena hanya membutuhkan peralatan komersial yang banyak tersedia seperti polivinil klorida [PVC], kompresor atau blower, dan lain-lain. Peralatannya mudah dipasang dan menyebabkan gangguan minimal pada pengoperasian situs.; 2). Setelah sistem dipasang di suatu lokasi, dibutuhkan pengawasan operasional minimal yang relatif terhadap tanah sistem ekstraksi uap (SVE), yang menuntut pemantauan ekstensif.; 3). Tidak ada aliran limbah yang dihasilkan yang memerlukan perawatan karena aliran udara yang keluar bisa dilepaskan langsung ke atmosfer; 4). Di lokasi dimana kontaminasi zona smear telah berkembang karena adanya air berfluktuasi, sparging efektif dalam merawat zona smear karena udara bergerak vertikal ke atas melalui wilayah.; 5). Teknologi ini efektif dalam mengolah sumber –sumber kontaminasi, sehingga membatasi off-site migrasi kontaminan terlarut.; 6). Teknologi ini kompatibel dengan teknologi remediasi lainnya seperti SVE dan bioventing; 7). Karena biodegradasi merupakan komponen proses pengapuran udara, teknologi ini memiliki potensi untuk mineralisasi kontaminan daripada hanya mentransfer kontaminan medium yang lain.

Meskipun biosparging merupakan teknologi yang memiliki banyak keuntungan dan bisa berkompetisi dengan teknologi lain, tidak berarti teknologi ini tidak mempunyai keterbatasan. Papadopoulos dan Vatsaris (2005) dan Kao et al (2008) menjelaskan beberapa keterbatasan Biosparging sebagai berikut:

1. Teknologi ini tidak cocok untuk mengobati kontaminan dengan nilai-nilai rendah Hukum Henry konstanta atau

volatilitas rendah kecuali senyawa aerobik biodegradable. Semivolatile kontaminan dengan biodegradabilitas aerobik rendah tidak diobati secara efektif dengan pengepresan udara.

2. Situs yang mengandung kontaminan yang bisa dihilangkan secara efektif melalui biodegradasi, tapi tidak penguapan, diatasi perlahan karena tingkat biodegradasi yang relatif lambat.
3. Kondisi geologi lokasi seperti stratifikasi, heterogenitas, dan anisotropi, akan mencegahnya aliran udara seragam melalui medium untuk mengurangi efektifitas pengepresan udara.
4. Produk bebas (cairan fase nonaque [NAPL]) dalam jumlah banyak mungkin terbatas kontak dengan udara yang disuntikkan Ini mungkin menjadi perhatian khusus dengan fasa berair padat cairan (DNAPLs) yang akan tenggelam ke dasar akuifer, sehingga membatasi keefektifannya dari sparging udara.
5. Ada potensi migrasi kontaminan volatil ke bangunan dan bangunan lainnya (akuntansi untuk migrasi uap dalam perancangan sistem seringkali dapat meringankan masalah ini).
6. Bila pengepresan udara diterapkan untuk mengandung fasa fase terlarut, zona hidrolik tereduksi konduktivitas bisa terbentuk dan, jika tidak dikelola dengan baik, bisa membiarkan asap membesar zona pengaruh pengapungan udara.
7. Aliran udara efektif di atas area yang ditentukan, mungkin membutuhkan sejumlah besar sumur untuk diperoleh aliran udara yang memadai melalui daerah yang terkontaminasi .
8. Kesulitan dalam memprediksi arah aliran udara.

### **Teknik Bioremediasi Eks Situ**

Teknik bioremediasi eks situ melibatkan penggalian polutan dari situs yang tercemar untuk dibawa ke tempat lain untuk melakukan

proses remediasi. Hal yang bisa menjadi pertimbangan teknik bioremediasi eks situ adalah biaya perawatan, kedalaman polusi, jenis polutan, tingkat polusi, lokasi geografis dan geologi situs yang tercemar (Philp dan Atlas 2005). Salah satu keuntungan yang utama dari bioremediasi eks situ yaitu tidak membutuhkan penilaian pendahuluan situs terpolusi yang ekstensif sebelum remediasi. Hal ini membuat tahap pendahuluan menjadi lebih pendek dan lebih murah. Adanya proses penggalian yang terkait dengan bioremediasi eks situ menyebabkan ketidakhomogenan polutan sebagai akibat dari kedalaman, konsentrasi dan distribusi yang tidak seragam, dapat dengan mudah diatasi dengan mengoptimalkan beberapa proses parameter (suhu, pH, pencampuran) secara efektif dari setiap teknik eks situ untuk meningkatkan proses bioremediasi. Teknik-teknik eks situ memungkinkan modifikasi kondisi biologis, kimia dan fisikokimia dan parameter yang diperlukan supaya bioremediasi berjalan secara efektif dan efisien. Secara umum terdapat beberapa kelemahan dari teknik bioremediasi eks situ yaitu teknik ini tidak mungkin digunakan di beberapa situs seperti di bawah bangunan, pusat kota dan lokasi kerja (Philp dan Atlas 2005). Di sisi lain, proses penggalian dalam bioremediasi eks situ cenderung mengganggu struktur tanah sehingga polutan dan situs sekitarnya sama-sama mengalami lebih banyak gangguan. Dalam kebanyakan kasus, teknik bioremediasi eks situ membutuhkan ruang operasi yang cukup besar. Meskipun demikian secara umum, teknik bioremediasi eks situ cenderung lebih cepat, lebih mudah dikendalikan dan dapat digunakan untuk treatment berbagai polutan (Prokop et al. 2000). Dalam makalah ini akan dipaparkan beberapa teknik bioremediasi eks situ yaitu bioreaktor, landfarming dan vermicomposting.

#### Bioreaktor

Tabel 1. Pengilangan beberapa polutan menggunakan bioremediasi berbasis bioreaktor (Azubuike et al. 2016)

Istilah bioreaktor digunakan untuk menggambarkan tempat yang digunakan untuk mengkonversi suatu bahan baku menjadi produk spesifik dengan mengikuti serangkaian reaksi biologi. Bioreaktor dibutuhkan untuk menciptakan kondisi lingkungan yang optimal dan terkendali sehingga sel dapat melakukan interaksi dengan lingkungan dan nutrisi didalamnya. Terdapat beberapa jenis bioreaktor yaitu batch, fed-batch, batch sequencing, kontinyu dan bertingkat. Kondisi dalam bioreaktor mendukung proses alami sel dengan cara menciptakan kondisi yang mirip dengan alamnya sekaligus mempertahankan kondisi tersebut sehingga dapat memberikan kondisi pertumbuhan optimum untuk sel. Sampel yang terpolusi bisa dimasukkan ke dalam bioreaktor baik dalam bentuk bahan kering atau bubur.

Penggunaan teknik bioreaktor mempunyai beberapa keuntungan dibandingkan teknik bioremediasi eks situ lainnya yaitu kita bisa mengontrol, mengendalikan dan memanipulasi dengan baik semua parameter yang terlibat dalam proses seperti suhu, pH, agitasi dan laju aerasi, konsentrasi substrat dan inokulum sehingga dapat meningkatkan efektifitas proses bioremediasi. Selain itu teknik bioreaktor menjadikan bioremediasi menjadi lebih efisien karena bioaugmentasi yang terkontrol, penambahan nutrisi, peningkatan bioavailabilitas polutan, dan transfer masa (interaksi antara polutan dengan mikroba) yang merupakan faktor pembatas pada proses bioremediasi umumnya dapat diatasi dengan adanya teknik ini. Lebih jauh lagi teknik bioreaktor dapat digunakan untuk mengolah tanah atau air yang tercemar volatile organic compounds (VOCs) termasuk benzene, toluene, ethylbenzene and xylenes (BTEX). Fleksibilitas dari desain bioreaktor memungkinkan degradasi biologis maksimum dan meminimalkan kerugian abiotik (Mohan et al. 2004). Beberapa contoh aplikasi bioreaktor dalam proses remediasi dapat dilihat pada Tabel. 1



Type/mode of bioreactor operation	Nature of sample	Nature of pollutant	Initial concentration	% Removal	References
Stir tank bioreactor (2.5 L)	Crude oil polluted sediment	Total petroleum and polyaromatic hydrocarbons	19 and 3.1 ppm respectively	82-97	Chikere et al. (2016)
Stir tank bioreactor/batch (1.5 L)	Waste lubricating oil	Saturated and aromatic hydrocarbons	80-86 g/L	62-69	Bhattacharya et al. (2015)
Expanded granular sludge bed (EGSB) reactor (1.4 L)	Laundry wastewater	Linear alkylbenzene sulfonate (LAS)	7.0 g TVS/L	92.9	Delforno et al. (2015)
Anaerobic sludge blanket/continuous-flow (3.3 L)	Synthetic BTEX-contaminated water	Benzene, toluene, ethylbenzene, and xylene (BTEX)	50 g VSS/L	51-86	Firmino et al. (2015)
Packed-bed reactor (PBR, 1.25 L)	Amines	Mixture of sulfonated amines (4-aminobenzene sulfonic acid and 4-amino naphthalene sulfonic acid)	50 mg/L		Juárez-Ramírez et al. (2015)
Roller slurry bioreactor (1 L)	Contaminated soil	2,4-Dichlorophenoxyacetic Acid	200-500 mg/kg	97-100	Mustafa et al. (2015)
Packed bed biofilter (100 cm × 5 cm)	Pharmaceutical sludge	Xylene vapour	0.2-1.2 g/m <sup>3</sup>	95-99	Saravanan et al. (2015)
Submerged attached growth bioreactors (SAGBs, 61 cm × 61 cm × 46 cm)	Effluent	Total nitrogen		48-53	Shannon et al. (2015) <sup>a</sup>
Membrane bioreactor (MBR, 8 L)	Coal gasification wastewater	Naphthalene and total nitrogen	10-200 mg/L	48-98	Xu et al. (2015)
Sequencing batch reactors (SBR, 2.5 L)	Engineered nanomaterials (ENMs)	Nano fullerenes (nC60) and nanosilver		>90 %	Yang et al. (2015)
Miniature membrane bioreactor (mMBR)/continuous	Brominated flame retardants (BFR)	Dibromocopentyl glycol (DBNPG)		50	Zangi-Kotler et al. (2015)
Sequence batch reactor (1.5 L)	Contaminated soil	Carbofuran	20 mg/kg	88-97	Plangklang and Alissara Reungsang (2010)
Glass jar paddle-type impeller reactor (2 L)	Contaminated soil	2,4,6-trinitophenylmethylnitramine (tetryl)	1,00,000 mg/kg	99.9	Fuller et al. (2003)

<sup>a</sup> Pilot study

Teknik bioreaktor mempunyai beberapa keterbatasan untuk diaplikasikan secara skala penuh karena beberapa alasan. Pertama, berhubungan dengan volume sampel. Jika volume sampel cukup besar maka metode ini tidak cost effective. Hal ini disebabkan karena bioreaktor merupakan teknik eks situ, volume tanah yang tercemar atau zat lain yang akan diolah jika terlalu besar, akan membutuhkan lebih banyak tenaga kerja, modal dan langkah-langkah keselamatan untuk pengangkutan polutan ke tempat pengolahan (Philp dan Atlas 2005). Kedua, karena beberapa parameter bioproses atau variabel bioreaktor, parameter apa pun yang tidak benar dikendalikan dan / atau dipertahankan secara optimal, dapat menjadi faktor pembatas sehingga akan mengurangi aktivitas mikroba dan akan membuat proses bioremediasi berbasis bioreaktor lebih sedikit efektif. Terakhir, polutan cenderung merespons secara berbeda untuk bioreaktor yang berbeda sehingga

dibutuhkan ketersediaan desain yang paling cocok sangat penting. Tetapi yang bisa menjadi catatan penting untuk teknik bioremediasi bioreaktor adalah teknik ini menjadi bersifat padat modal (Azubuike et al. 2016).

#### Landfarming

Landfarming merupakan teknik bioremediasi yang cukup sederhana. Teknik ini membutuhkan biaya yang cukup murah dan peralatan yang sedikit. Landfarming juga dikenal sebagai teknologi yang lebih ramah lingkungan dibandingkan teknologi reemdiasi lainnya. Selain itu teknologi landfarming bisa diintergrasikan dengan teknik remediasi lainnya seperti bioaugmentasi, biostimulasi ataupun composting untuk meningkatkan hasil bioremediasi secara umum. Landfarming dikembangkan dengan mempertimbangkan beberapa faktor untuk remediasi tanah berkelanjutan seperti biaya, kebutuhan ruang, waktu, permintaan energi, penggunaan bahan

baku dan penerimaan publik. Prinsip yang mendasari proses landfarming adalah penggunaan komunitas mikroba untuk menghilangkan kontaminan organik dikonversi menjadi CO<sub>2</sub> dan air dengan mekanisme utama adalah volatilisasi Volatil Organic Compounds (VOCs), biodegradasi dan adsorption (Maila & Cloete 2004)

Dalam kebanyakan kasus, landfarming dikategorikan sebagai teknik bioremediasi eks situ, sementara dalam beberapa kasus, dianggap seperti teknik bioremediasi in situ. Hal ini tergantung dimana dilakukannya treatment. Kedalaman polutan menjadi kunci penting apakah landfarming dapat dilakukan secara eks situ atau in situ. Dalam teknik landfarming tanah yang tercemar biasanya digali, tetapi situs atau tempat treatment tampaknya menentukan jenis bioremediasi. Ketika tanah yang tercemar digali dan di treatment di tempat, itu bisa dianggap sebagai in situ, jika tidak, maka dikategorikan itu eks situ landfarming. In situ landfarming cocok diterapkan ketika tanah yang terkontaminasi dangkal dan terbatas di bawah lapisan tanah liat atau tanah kedap air. Keberhasilan landfarming secara in situ sangat tergantung pada karakteristik tanah (tekstur tanah, kadar air, jumlah mikroorganisme, pH) dan kondisi iklim (curah hujan, angin, dan suhu). Meskipun demikian terdapat beberapa kerugian dari metode ini yaitu infeasibility of control proses yang ketat, waktu eksekusi yang lama, dan efektivitas rendah di tanah yang tidak tembus cahaya. Hal berbeda dengan landfarming eks situ, teknik ini membutuhkan waktu perawatan yang lebih singkat, lebih mudah dikendalikan, dan bisa diaplikasikan untuk kisaran kontaminan yang lebih luas dibandingkan dengan teknik landfarming in situ. Namun, teknik landfarming eks situ membutuhkan tambahan biaya untuk penggalian dan transportasi untuk pemindahan material terkontaminasi serta biaya modal untuk membangun dan melengkapi struktur perawatan yang pada akhirnya dibutuhkan biaya tenaga

kerja dan energi tambahan (Lukic et al., 2017; Azubuike et al. 2016).

Beberapa penelitian melaporkan bahwa ketika polutan terletak <1 m di bawah permukaan tanah, bioremediasi dapat dilakukan tanpa penggalian, sementara lapisan polutan > 1,7 m perlu dilakukan penggalian dan pengangkutan ke permukaan tanah untuk peningkatan proses bioremediasi (Nikolopoulou et al. 2013). Umumnya, tanah tercemar yang digali dijaga kondisinya supaya lapisan penyangga tetap di atas permukaan tanah untuk memungkinkan biodegradasi polutan secara aerob oleh autochthonous mikroorganisme (Philp dan Atlas 2005; Paudyn et al. 2008; Volpe et al. 2012; Silva-Castro et al. 2015). Teknik landfarming dilaporkan sukses diterapkan secara komersial dalam skala besar dalam menghilangkan kontaminan PAHs dan tumpahan minyak pada tanah dan sedimen (Lukic et al. 2017). Kesuksesan landfarming tergantung kepada kondisi spesifik seperti seperti drainase tanah yang baik, biodegradabilitas polutan oleh mikroorganisme yang ada dan keberadaan mikroorganisme yang melimpah. Selain itu kondisi tempat yang tertutup seperti rumah kaca diperlukan untuk meminimalkan erosi tanah dan limpasan air hujan serta mengontrol emisi udara. Kondisi lingkungan yang sesuai termasuk nilai pH, ketersediaan nutrisi, dan kadar air juga menjadi faktor penting untuk kesuksesan landfarming (Maila dan Cloete 2004).

Meskipun landfarming dikenal sebagai teknik bioremediasi paling sederhana, tetapi seperti halnya teknik bioremediasi eks situ lainnya teknik ini mempunyai beberapa keterbatasan yaitu membutuhkan tempat yang cukup besar untuk pelaksanaannya, terjadi pengurangan aktivitas mikroba disebabkan kondisi lingkungan yang tidak menguntungkan, diperlukannya biaya tambahan karena adanya proses penggalian dan transportasi, dan berkurangnya efisiensi penghilangan polutan anorganik (Khan et al. 2004; Maila dan Cloete 2004). Lebih jauh lagi teknik ini tidak cocok

untuk mentreatmen tanah yang tercemar dengan senyawa toksik yang bersifat volatil. Keterbatasan ini membuat teknik landfarming menjadi teknik bioremediasi yang memakan waktu dan kurang efisien dibandingkan dengan teknik bioremediasi eks situ lainnya (Azubuike et al. 2016).

#### Vermicomposting

Teknik composting merupakan teknik bioremediasi eks situ yang melakukan kombinasi antara tanah terkontaminasi dengan tanah yang mengandung pupuk (kompos) atau senyawa organik yang dapat meningkatkan populasi mikroorganisme. sehingga terjadi proses biodegradasi bahan organik yang ada di dalam campuran bahan tersebut. Komposting atau vermicomposting adalah teknik yang ideal untuk mentransformasi bahan organik yang diinginkan dengan cepat dan untuk menciptakan lingkungan yang optimal untuk biodegradasi. Vermicomposting dianggap sebagai bioteknologi inovatif vermikultur yang menyediakan pengelolaan limbah yang hemat biaya secara berkelanjutan. Meskipun mikroorganisme bertanggung jawab untuk sebagian besar degradasi biokimia bahan organik, proses degradasi biokimia yang dikenal sebagai vermicomposting dipengaruhi terutama oleh biokimia dan aktivitas fisik cacing tanah. Cacing tanah menelan bahan organik dengan cepat, membuat kompos berkualitas lebih tinggi daripada kebanyakan metode pengomposan tradisional dan menghasilkan bahan yang kaya akan unsur-unsur penting untuk tanaman seperti nitrogen,

fosfor, magnesium, belerang, dan kalium (Silva et al. 2019; Aalok et al.2008). Telah banyak penelitian yang melaporkan kemampuan teknik vermicomposting dalam mendegradasi limbah padat organik khususnya PAHs (Polycyclic Aromatic Hydrocarbons) dan logam berat (Silva et al. 2019; Karmegam et al. 2019; Hee et al. 2016; Hua et al. 2008).

Beberapa jenis cacing tanah yang dipalorkan banyak digunakan dalam vervikomposting adalah *Eisenia fetida*, *Eisenia andreei*, *Eudrilus eugeniae*, *Amyntas gracilus* dan *Perionyx excavates*; *Lumbricus rubellus* (Gambar 3). Teknis bioremediasi vermicomposting memberikan beberapa keuntungan yaitu ekonomis dan ramah lingkungan, metode cukup sederhana, menghasilkan produk samping (kompos) yang bisa dimanfaatkan lebih lanjut untuk pertanian dan cacing tanah yang bisa dijual untuk berbagai kepentingan (kesehatan (obat) , kecantikan, dll). Selain itu teknik ini juga memeberikan keuntungan untuk tanah yang diremediasi yaitu meingkatkan infiltrasi dan fermemibialitas tanah yang terkontaminasi, menurunkan erosi dan ruoff, meningkatkan kapasitas penahanan air sehingga meminimalisis kehilangan air, menyediakan berbagai jenis makro dan mikronutrien. Meskipun demikian ada beberapa keterbatasan dari teknik ini yaitu bagaimana menjaga kondisi lingkungan yang ccocok untuk pertumbuahn cacing dan dibutuhkan pemisahan polutan (Karmegam et al. 2019; Wafler 2016; Dhakal 2014).



Gambar 3. Beberapa jenis cacing tanah yang digunakan dalam vermikomposting

### Prospek Penelitian Bioremediasi

Dari uraian di atas terlihat bahwa teknik bioremediasi sangat beragam dan telah terbukti efektif dalam memulihkan situs yang tercemar dengan berbagai jenis polutan. Berdasarkan hasil telaah penulis, dari sekian banyak paper tentang bioremediasi, informasi tentang peran teknik molekuler seperti 'Omics' (genomik, proteomik, transkriptomik dan metabolomik) masih belum banyak dibahas, padahal teknik molekuler ini sangat membantu dalam memahami tentang identitas mikroba, fungsinya di lingkungan serta bagaimana metabolisme dan katabolisme yang terjadi selama proses remediasi. Dengan omics kita bisa mengerjakan dan memahami semua tersebut di atas dalam waktu yang lebih singkat dibanding teknik konvensional. Selain itu kajian tentang ekotoksitas dari penambahan nutrisi (bioventing) dan pengaruhnya terhadap ekosistem masih perlu banyak dilakukan.

### KESIMPULAN

Pemilihan teknik bioremediasi yang tepat untuk setiap kasus tergantung pada banyak faktor seperti jenis dan konsentrasi kontaminan atau polutan, sifat situs terkontaminasi, ambang batas konsentrasi yang diatur, waktu yang tersedia untuk melakukan remediasi, biaya dan urgensi yang diperlukan. Tidak semua teknik bioremediasi,

cocok untuk semua kasus dan yang dikatakan yang terbaik. Masing-masing teknik punya kelebihan dan keterbatasan masing-masing. Langkah terpenting menuju bioremediasi yang sukses adalah karakterisasi situs yang terkontaminasi, yang membantu membantu menentukan teknik bioremediasi yang layak (eks situ atau in situ) yang paling cocok dilakukan. Teknik bioremediasi eks situ cenderung lebih mahal karena biaya tambahan yang dikaitkan dengan penggalian dan transportasi. Meskipun demikian, teknik ini dapat digunakan untuk mentreatmen berbagai polutan secara terkendali. Sebaliknya, teknik in situ dinilai lebih ekonomis karena tidak dibutuhkan biaya tambahan untuk penggalian; namun, biaya pemasangan peralatan di tempat, ditambah dengan ketidakmampuan untuk memvisualisasikan dan mengontrol situs yang tercemar dapat menyebabkan beberapa teknik bioremediasi in situ tidak efisien. Karena itu, biaya remediasi rupanya bukan faktor utama dalam menentukan teknik bioremediasi yang akan diterapkan di situs yang tercemar. Karakteristik geologi situs yang tercemar termasuk jenis tanah, kedalaman dan jenis polutan, lokasi situs relatif terhadap tempat tinggal dan karakteristik masing-masing teknik bioremediasi harus dimasukkan dalam memutuskan metode atau teknik yang paling cocok dan efisien.

## DAFTAR PUSTAKA

- Aalok A, Tripathi AK, Soni P. 2008. Vermicomposting: a better option for organic solid waste management. *J. Hum. Ecol.* 24, 59e64. <https://doi.org/10.1080/09709274.2008.11906100>
- Azubuikwe CC, Chikere CB, Okpokwasii GC. 2016. Bioremediation techniques—classification based on site of application: principles, advantages, limitations and prospects. *World J Microbiol Biotechnol.* 32:180. DOI 10.1007/s11274-016-2137-x.
- Ayotamuno JM. and Kogbara RB. 2007. Determining the tolerance level of Zea mays (maize) to a crude oil polluted agricultural soil. *African Journal of Biotechnology* 6: 1332-1337.
- Cheng J. 2014. Bioremediation of Contaminated Water-Based on Various Technologies. DOI: 10.4236/oalib.preprints.1200056.
- Dhakal S. 2014. Vermiculture technique and advantages. <https://www.slideshare.net/sabindhakal956/vermiculture-techniques-and-advantages>. Diakses tanggal 29 Mei 2020.
- Dushenkov V, Nanda Kumar PBA, Motto H, Raskin I. 1995. Rhizofiltration: the use of plants to remove heavy metals from aqueous streams. *Environmental Science and Technology* 29:1239-1245.
- U.S. Environmental Protection Agency (EPA). How to Evaluate Alternative Cleanup Technologies for Underground Storage Tank Sites: A Guide for Corrective Action Plan Reviewers. (EPA 510-B-95-007). <https://www.epa.gov/ust>
- Folch A, Vilaplana M, Amado L, Vicent R, Caminal G. 2013. Fungal impermeable reactive barrier to remediate groundwater in an artificial aquifer. *J Hazard Mater* 262:554–560. doi:10.1016/j.jhazmat.2013.09.004
- Frasconi D, Zanaroli G, Danko AS. 2015. In situ aerobic cometabolism of chlorinated solvents: a review. *J Hazard Mater* 283:382–399. doi:10.1016/j.jhazmat.2014.09.041
- Frerot H, Lefebvre C, Gruber W, Collin C, Dos Santos A, Escarre J. 2006. Specific interactions between local metallophilous plants improve the phytostabilization of mine soils. *Plant and Soil* 282: 53-65.
- Frutos FJG, Pérez R, Escolano O, Rubio A, Gimeno A, Fernandez MD, Carbonell G, Perucha C, Laguna J. 2012. Remediation trials for hydrocarbon-contaminated sludge from a soil washing process: evaluation of bioremediation technologies. *J Hazard Mater* 199:262–271. doi:10.1016/j.jhazmat.2011.11.017.
- Frutos FJG, Escolano O, Garcia S, Babin M, Fernandez MM. 2010. Bioventing remediation and ecotoxicity evaluation of phenanthrene-contaminated soil. *Journal of Hazardous Materials.* 183 : 806–813.
- Garrison AW, Nzungu VA, Avants JK, Ellington JJ, Jones EW, Rennels D, Wolfet NL. 2000.
- Phytodegradation of p, p' - DDT and the enantiomers of o, p' – DDT. *Environmental Science and Technology.* 34: 1663-1670.
- Goswami M, Chakraborty P, Mukherjee K, Mitra G, Bhattacharyya P, Dey S, Tribedi P. 2018. Bioaugmentation and biostimulation: a potential strategy for environmental remediation. *Journal of Microbiology & Experimentation.* 6(5) : 223-231.
- He X, Zhang Y, Shen M, Zeng G, Zhou M, Li M. 2016. Effect of vermicomposting on concentration and speciation of heavy metals in sewage sludge with additive materials. *Bioresour. Technol.* 218 : 867–873. DOI: 10.1016/j.biortech. 2016.07.045.
- Hoehener P, Ponsin V. 2014. In situ vadose zone bioremediation. *Curr Opin Biotechnol* 27:1–7. doi:10.1016/j.copbio.2013.08.018.
- Hua L, Wu W, Liu Y, Chen Y, McBride MB. 2008. Effect of composting on polycyclic aromatic hydrocarbon removal in sewage sludge. *Water, Air, Soil Pollut.* 193: 259–267. DOI: 10.1007/s11270-008-9687-y
- Kao CM, Chen CY, Chen SC, Chien HY, Chen YL. 2008. Application of in situ biosparging to remediate a petroleum hydrocarbon spill site: field and microbial evaluation. *Chemosphere* 70:1492–1499. doi:10.1016/j.chemosphere.2007.08.029.
- Karmegam N, Vijayan P, Prakash M, Paul JAJ. 2019. Vermicomposting of paper industry sludge with cowdung and green manure plants using *Eisenia fetida*: A viable option for cleaner and enriched vermicompost production. *Journal of Cleaner Production.* 228 : 718-728.
- Kaczorek E, Sałek K, Guzik U, Jesionowski T, Cybulski Z. 2013. Biodegradation of alkyl derivatives of aromatic hydrocarbons and cell surface properties of a strain of *Pseudomonas stutzeri*. *Chemosphere.*

- 90(2):471-478.  
doi:10.1016/j.chemosphere.2012.07.065
- Khan FI, Husain T, Hejazi R. 2004. An overview and analysis of site remediation technologies. *J Environ Manag* 71:95–122. doi:10.1016/j.jenvman.2004.02.003.
- Lee JH. 2013. An overview of phytoremediation as a potentially promising technology for environmental pollution control. *Biotechnol Bioprocess Eng* 18:431–439. doi:10.1007/s12257013-0193-
- Lee G, Suonan Z, Kim S.H, Hwang D.W, Lee K.S. 2019. Heavy metal accumulation and phytoremediation potential by transplants of the seagrass *Zostera marina* in the polluted bay systems. *Marine Pollution Bulletin* 149 (2019) 110509.
- Lukic B, Antonio Panico, David Huguenot, Massimiliano Fabbicino, Eric D. van Hullebusch & Giovanni Esposito. 2017. A review on the efficiency of landfarming integrated with composting as a soil remediation treatment, *Environmental Technology Reviews*, 6:1, 94 - 116, DOI: 10.1080/21622515.2017.1310310
- Macek T, Mackova M, Kas J. 2000. Exploitation of plants for the removal of organics in environmental remediation. *Biotechnology Advances*. 18: 23-34.
- Maila MP & Cloete TE. 2004. Bioremediation of petroleum hydrocarbons through landfarming: are simplicity and costeffectiveness the only advantages? *Rev Environ Sci Biotechnol*. 3(4):349–360.
- Marsya DP, Firdaus A, dan Zulkifliani. 2013. Bioremediasi tanah yang terkontaminasi minyak bumi dengan metode bioventing terhadap penurunan kadar totl Petroleum Hydrocarbon dan BTEX. Universitas Indonesia. 1-20.
- Mohan SV, Sirisha K, Rao NC, Sarma PN, Reddy SJ. 2004. Degradation of chlorpyrifos contaminated soil by bioslurry reactor operated in sequencing batch mode: bioprocess monitoring. *J Hazard Mater* 116:39–48. doi:10.1016/j.jhazmat.2004.05.037.
- Nikolopoulou M, Pasadakis N, Norf H, Kalogerakis N . 2013. Enhanced ex situ bioremediation of crude oil contaminated beach sand by supplementation with nutrients and rhamnolipids. *Mar Pollut Bull* 77:37–44. doi:10.1016/j.marpolbul.2013.10.038.
- Nzila A, Razzak SA, Zhu J, 2016. Bioaugmentation: An Emerging Strategy of Industrial Wastewater Treatment for Reuse and Discharge. *Int. J. Environ. Res. Public Health*. 13 (846) . 20 hal. doi:10.3390/ijerph13090846
- Nugroho A. 2006. Biodegradasi sludge minyak bumi dalam skala mikrokosmos: simulasi sederhana sebagai kajian bioremediasi land treatment. *Makara Teknologi*. 10 (2) : 82-89.
- Papadopoulos S, Vatsaris C. 2005. Air Sparging for Site Remediation *Intergeo-Environmental Technology Ltd. Heleco '05, Tee, Αθήνα: 1* [http://library.tee.gr/digital/m2045/m2045\\_papadopoulos1.pdf](http://library.tee.gr/digital/m2045/m2045_papadopoulos1.pdf) . Diunduh tanggal 20 Mei 2020.
- Paudyn K, Rutter A, Rowe RK, Poland JS. 2008. Remediation of hydrocarbon contaminated soils in the Canadian Arctic by landfarming. *Cold Reg Sci Technol* 53:102–114. doi:10.1016/j.coldregions.2007.07.006.
- Paul CJ, Richard LJ, Cristin LB, Andrea L. 2001. Advances in In Situ Air Sparging/ Biosparging. *Bioremediation Journal* 5 (4): 251-266.
- Philp JC & Atlas RM. 2005. Bioremediation of contaminated soils and aquifers. In: Atlas RM, Philp JC (eds) *Bioremediation: applied microbial solutions for real-world environmental cleanup*. American Society for Microbiology (ASM) Press, Washington, pp 139–236
- Prescott LM, Harley JP, Klein DA. 2002. *Microbiology*, 5th Edition, McGraw-Hill, New York. 1014pp
- Prokop G, Schamann M, Edelgaard I. 2000. Management of contaminated sites in western Europe. European Environment Agency, Copenhagen. *Rahayu*. 2005. BULLETIN PENELITIAN VOL. 27 NO. 2 .
- Raskin I& Ensley BD. 2000. *Phytoremediation of Toxic Metals: Using Plants to Clean Up The Environment*, Wiley, New York.
- Roy M, Giri AK, Dutta S, Mukherjee P. 2015. Integrated phytobial remediation for sustainable management of arsenic in soil and water. *Environ Int* 75:180–198. doi:10.1016/j.envint.2014.11.010.
- Silva PRD, Cotta JAO, Maria DL & Maria OO. 2019. The application of the vermicomposting process in the bioremediation of diesel contaminated soils, *Journal of Environmental Science and*

- Health, Part B, DOI: 10.1080/03601234.2019.1611303.
- Silva-Castro GA, Uad I, Rodri'guez-Calvo A, Gonza'lez-Lo'pez J, Calvo C. 2015. Response of autochthonous microbiota of diesel polluted soils to land- farming treatments. *Environ Res* 137:49–58. doi:10.1016/j.envres.2014.11.009.
- Smith E, Thavamani P, Ramadass K, Naidu R, Srivastava P, Megharaj M. 2015. Remediation trials for hydrocarbon-contaminated soils in arid environments: evaluation of bioslurry and biopiling techniques. *Int Biodeterior Biodegradation* 101:56–65. doi:10.1016/j.ibiod.2015.03.029
- Tiwari JT, Ankit, Sweta, Kumar S, Korstad J, Bauddh K. 2019. Ecorestoration of Polluted Aquatic Ecosystems Through Rhizofiltration. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813912-7.00005-3>
- U.S. EPA. 1999. Phytoremediation Resource Guide. EPA/542/B-99/003, available online <http://www.epa.gov/tio>.
- U.S. EPA.2000. Introduction to Phytoremediation. EPA/600/R-99/107 .
- Vazquez S, Agha A, Granado A, Sarro M, Esteban E, Penalosa J, Carpena R. 2006. Use of white Lupin plant for phytostabilization of Cd and As polluted acid soil. *Water, Air and Soil Pollution* 177: 349-365.
- Volpe A, D'Arpa S, Del Moro G, Rossetti S, Tandoi V, Uricchio VF . 2012. Fingerprinting hydrocarbons in a contaminated soil from an Italian natural reserve and assessment of the performance of a low-impact bioremediation approach. *Water Air Soil Pollut* 223:1773– 1782. doi:10.1007/s11270-011-0982-7.
- Wafler . 2016. Composting and vermicomposting. Suitanable sanitation and water management(SSSWM). <https://slideplayer.com/slide/6315861/>. Diakses tanggal 29 Mei 2020.
- Xiao M & Richard G. Zytner . 2019. The effect of age on petroleum hydrocarbon contaminants in soil for bioventing remediation, *Bioremediation Journal*, DOI: 10.1080/10889868.2019.1671306.
- Zhuang P, Yang QW, Wang HB, Shu WS, 2007. Phytoextraction of heavy metals by eight plant species in the field. *Water, Air and Soil Pollution* 184: 235-242.
- Zhu X, Venosa A.D, Suindan MT, Lee K. 2001. Guidelines for the bioremediation of marine shorelines and freshwater wetlands. U.S. Environmental Protection Agency Office of Research and Development, National Risk Management Research Laboratory Land, Remediation and Pollution Control Division 26 W. Martin Luther King Drive Cincinnati, OH 45268.