

A. Pendahuluan

Pembangunan berkelanjutan adalah usaha manusia atau suatu bangsa meningkatkan taraf hidupnya melalui peningkatan pendapatan Nasional perkapita, retribusi pendapatan serta menghapuskan kemiskinan. Sedangkan yang dimaksud dengan pembangunan ekonomi adalah usaha-usaha bagaimana manusia atau suatu bangsa berusaha meningkatkan standar hidupnya ketaraf yang lebih baik dengan distribusi pendapatan yang lebih merata tanpa kemiskinan dan kebodohan bagi bangsa tersebut. Keberlanjutan pembangunan dapat didefinisikan dalam arti luas yaitu bahwa generasi yang akan datang harus berada dalam posisi yang tidak lebih buruk daripada generasi sekarang. Generasi sekarang boleh memiliki sumber daya alam serta melakukan berbagai pilihan dalam penggunaannya namun harus tetap menjaga keberadaannya untuk generasi yang akan datang walaupun memiliki tingkat teknologi dan pengetahuan yang lebih baik serta persediaan kapital buatan manusia yang lebih memadai. Jadi yang penting dalam konsep ini adalah bahwa generasi sekarang maupun generasi akan datang tetap dalam keadaan terpenuhi kebutuhan hidupnya. Dapat diambil suatu kesimpulan pembangunan berkelanjutan berhasil apa bila tidak ada masalah ketidak merataan antar generasi (*intergenerational inequality*).

Pertanyaan yang selalu menggoda kita adalah sejauh manakah kemampuan daya dukung sekarang? Sanggupkah ia menopang generasi yang akan datang?. Pertanyaan ini perlu diajukan oleh karena masa depan lingkungan tidak bisa dilepaskan dari keadaan lingkungan masa kini bahkan masa lalu. Jawaban atas baik buruknya lingkungan dimasa depan bergantung pada usaha-usaha generasi sekarang dalam mengelola sumber daya alam. Jangan harap akan tercipta ataupun tersisa lingkungan masa depan yang serasi apabila sekarang kehilangan kearifan dalam mengolah sumber daya. Jadi, makna tanggapan masa depan disana bukanlah berarti masalahnya harus dihadapi generasi masa datang nanti melainkan menjadi tanggung jawab terutama generasi masa kini. Pembangunan berkelanjutan adalah terpenuhinya kebutuhan generasi sekarang tanpa mengurangi kesempatan generasi masa depan menikmati sumber daya alam dalam kondisi yang tak kalah baiknya dari generasi sebelumnya. Dengan perkataan lain, dalam konsep pembangunan berkelanjutan "*Secara inherent*" sudah memuat soal

tantangan itu dan tanggung jawabnya sekaligus. Kita ketahui bersama sejumlah sumber daya alam sudah mulai menipis, terutama sumber daya yang tidak dapat diperbaharui seperti minyak bumi dan bahan mineral lainnya, generasi yang akan datang kemungkinan tidak akan bisa menikmati sumber daya alam sejenis itu apabila dari mulai sekarang efisiensi kurang apalagi tidak ditempuh sama sekali. Tidaklah salah kalau pepatah mengatakan bahwa bumi ini bukanlah warisan dari nenek moyang, tetapi titipan anak cucu kita. Apabila generasi sekarang tidak mampu mencegah terjadinya lubang lapisan ozon yang semakin meluas serta mengendalikan pemanasan global ditambah lagi tidak dapat mengurangi penyusutan keaneka ragaman hayati, akibat ulah tangan manusia dulu dan sekarang, boleh jadi generasi masa datang hanya menemukan bumi yang kering kerontang, bahkan tidak dapat hidup sama sekali.

Salah satu kelemahan dari pengelolaan sumber daya alam dinegara-negara berkembang barangkali adalah usaha mengejar pertumbuhan ekonomi dengan cara menguras secara besar-besaran dari sumber daya alamnya tanpa memperhatikan akibat sampingan. Akibatnya mereka harus membayar mahal dengan semakin rusaknya lingkungan. Misalnya untuk membuat tambang suatu sumber daya alam yang berada di hutan, banyak hutan dan susunan tanahnya menjadi rusak akibat dipangkasnya tanah yang menutupi bahan tambang dan setelah itu hasil tambangnya diambil dilokasi tempat penebangan tadi sampai berhektar-hektar dapat kita bayangkan apa yang akan terjadi.

Dalam pembangunan memang selalu timbul apa yang disebut dengan "*Backwash effect*" dimana akibatnya dari adanya pembangunan pada suatu tempat akan terjadi akibat negatif, tapi dalam hal ini usaha kita adalah meminimalkan efek negative tersebut. Dibangunnya waduk-waduk juga dapat menimbulkan efek yang negative misalnya dalam bidang kesehatan dapat meledaknya jumlah hewan tempat hidup dari penyebab penyakit yang kita kenal dengan penyakit *Schistomiasis*, dimana cacing-cacing ini bertambah penyebarannya dengan bertambahnya populasi dari siput-siput. Demikian juga pembangunan beberapa industri dapat menyebabkan tercemarnya air dari suatu danau atau sungai sehingga masyarakat yang selama ini tidak pernah banjir oleh

karena adanya pembangunan didaerah tangkapan air (*catcment area*) maka daerah lain yang tadinya tidak kekurangan air menjadi kekurangan air.

Sejarah menunjukkan masyarakat bisa mencapai kemakmuran karena hasil manfaat dari sumber daya yang dimiliki. *Simon Kuznets (1955)* mengatakan bahwa pertumbuhan ekonomi sayangnya dibatasi oleh kekurangan absolut dari sumber daya alam Namun tidak dapat disangkal, bahwa dengan adanya suatu pembangunan juga dapat memberikan peluang-peluang bagi berbagai usaha dan dapat membantu meningkatnya kesejahteraan masyarakat seperti yang kita harapkan bersama. Sebagai contoh yang sederhana dengan adanya suatu pembangunan satu tempat pemukiman disatu daerah maka akan kita peroleh efek yang berganda yang kita kenal dengan "*Spread effect*".

B. Pengaruh pencemaran terhadap ekosistem

Ekosistem dapat diartikan sebagai komponen fisik-kimia (abiotik) lingkungan dan komunitas biotik yang berfungsi sebagai suatu sistem (Smith dan Smith, 1998). Batasan ekosistem ini memberikan gambaran adanya proses berupa interaksi antar komponen ekosistem yang dijalankan oleh dan atau melalui pemanfaatan energi (daya) dan dipengaruhi oleh ruang, waktu, situasi dan keanekaan (*diversitas*) dari komponen yang berinteraksi (Begon, ; Boughey, 1975; Odum, 1993; Siahaan, 2004).

Siahaan (2004;10) menyatakan bahwa secara alamiah, interaksi antar komponen ekosistem terjadi melalui suatu pola, dimana komponen-komponen ekosistem cenderung mengarah berinteraksi menuju pada keseimbangan atau *homeostasis*. Hal ini disebabkan oleh karena lingkungan memiliki suatu daya dukung dengan kapasitas tertentu berupa suatu sistem yang mampu memelihara dan mengatur dirinya sendiri melalui faktor-faktor pengendali alamiah. Keseimbangan atau harmonisasi dalam lingkungan tersebut mulai terganggu akibat tingkah laku manusia dalam berinteraksi dengan lingkungan yang cenderung mengabaikan batas-batas keseimbangan yang dimiliki oleh lingkungan hidup tersebut (Boughey, 1975).

Salah satu faktor penyebab terjadinya ketidak seimbangan pada ekosistem adalah pencemaran. Pencemaran ekosistem dapat diartikan sebagai masuknya zat, energi atau mahluk hidup kedalam lingkungan secara sengaja atau alamiah yang dapat menyebabkan terjadinya penurunan kualitas lingkungan hidup. Apabila terjadi pencemaran pada lingkungan hal tersebut dapat menyebabkan cekaman atau *stress* yang menyebabkan

terjadinya pergeseran keseimbangan ekosistem. Apabila cekaman tersebut masih dalam kisaran daya lenting lingkungan, maka ekosistem tersebut dapat mempertahankan keseimbangannya dengan menetralkan pencemaran melalui mekanisme *self purification process*.

Kemampuan ekosistem untuk melakukan *self purification* tergantung dari kualitas dan kuantitas pencemar. Apabila pencemaran tersebut masih relatif sedikit dan toksisitasnya rendah maka *self purification process* dapat berlangsung dengan cepat untuk mengembalikan keseimbangan ekosistem dan sebaliknya apabila pencemaran yang terjadi sampai pada titik ekstrim proses itu akan berjalan sangat lambat.

Kejadian yang terjadi di atas merupakan dampak adanya input eksternal yang dapat mengganggu kesetimbangan. Hal tersebut disebabkan aspek-aspek ekosistem terganggu dengan adanya pencemar yang masuk ke dalam ekosistem. Aspek keanekaragaman ekosistem akan mengalami penurunan disebabkan terancuninya jenis komponen biotik sehingga terjadi penyerdehanaan jenis makhluk hidup, dengan terjadinya pengurangan keanekaragaman menyebabkan interaksi keterkaitan dan ketergantungan tidak dapat berjalan dengan optimal dikarenakan ada beberapa komponen/jenis makhluk hidup yang tidak dapat bekerja dengan optimal diakibatkan pencemaran, hal itu menyebabkan keteraturan dan keseimbangan dinamis terganggu sehingga harmonisasi dan kestabilan tidak dapat tercapai dan menyebabkan produktivitas menurun.

Dampak dari pencemaran yang ekstrim seperti di atas, bukan berarti akan menyebabkan ekosistem tidak dapat pulih kembali kepada kondisi semula, karena lingkungan pada dasarnya akan merespon, apabila keseimbangannya terganggu maka akan membuat suatu keseimbangan baru yang sesuai dengan kondisi aktual pada saat itu. Keseimbangan baru yang terjadi dapat mengembalikan secara perlahan kondisi lingkungan kepada kondisi yang lebih baik dan kembali kepada kondisi klimaks.

C. Teknologi Alternatif Penanggulangan Pencemaran

Banyak metode yang dapat digunakan untuk penanggulangan pencemaran. Menurut Udiharto, 1992 : Metoda penanggulangan pencemaran lingkungan dapat dilakukan dengan tiga cara yaitu secara fisika, kimia dan biologi. Metoda penanggulangan secara fisika bisa dilakukan dengan penyaringan, penenggelaman, pembakaran, dan penggunaan *gelling agen*. Penanggulangan secara fisika dari segi waktu sangatlah efektif tetapi seringkali menyebabkan terjadinya pemindahan kontaminan misalnya dengan pembakaran secara singkat

dapat mengeliminasi kontaminan minyak bumi, tetapi dapat mengakibatkan pencemaran udara dan sisa hasil pembakaran memerlukan pengolahan lanjutan, begitu juga Penanggulangan secara kimia, karena pada pengolahan ini menggunakan bahan kimia sehingga ada kemungkinan timbulnya kontaminan baru yang bersifat *xenobiotik* (Clark, 1986). Kelemahan lain cara penanggulangan secara fisika dan kimia adalah biaya yang dikeluarkan untuk operasional relatif sangat mahal oleh karena itu perlu metode lain dalam penanggulangan pencemaran minyak bumi.

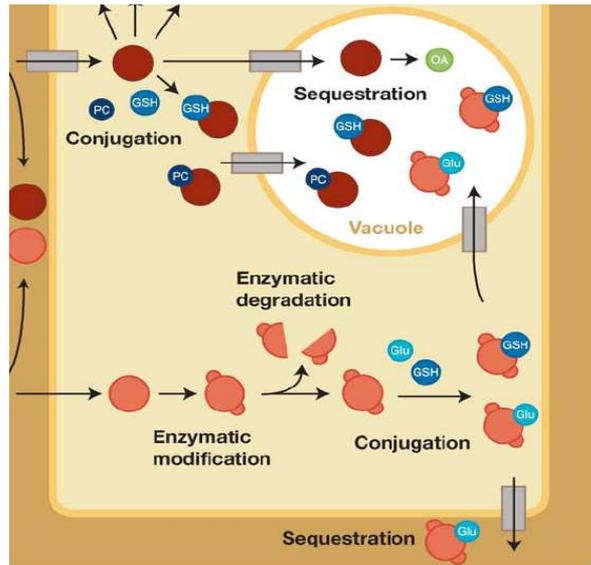
Metode biologi yaitu bioremediasi dapat dijadikan alternatif metode penanggulangan pencemaran karena sudah diakui mempunyai kelebihan dari segi biaya operasional lebih murah, efektif dan ramah lingkungan karena senyawa organik mengalami mineralisasi dan menghasilkan produk akhir yang stabil dan tidak beracun meskipun metode ini memerlukan waktu yang lebih lama dibandingkan penanggulangan secara fisika ataupun kimia (Thomas dkk, 1992).

1. Bioremediasi

Bioremediasi adalah suatu teknik dengan menggunakan mikroorganisme atau tumbuhan untuk detoksifikasi kontaminan (Melethia, 1996). Detoksifikasi kontaminan bisa dengan cara transformasi senyawa dari senyawa toksik menjadi senyawa non toksik atau dengan cara degradasi kontaminan menjadi karbon dioksida dan air. Proses biologi yang terjadi merupakan proses pemulihan komponen lingkungan secara biologis (Backer dan Herson, 1994) dengan cara mengeksloitasi kemampuan katalitik sifat organisme untuk meningkatkan laju perombakan suatu polutan (Sheehan, 1997).

Dalam teknik bioremediasi ada dua tujuan utama dalam penanggulangan lingkungan yang tercemar oleh senyawa hidrokarbon yaitu:

- a. Transformasi senyawa toksin menjadi senyawa non toksin
- b. Membuat akumulasi antropogenik lebih cepat memasuki siklus biogeokimia alami.



Gambar 1. Mekanisme toleransi sel tanaman terhadap polutan organik dan non organik. Detoksifikasi secara umum melibatkan konjugasi yang diikuti dengan masuknya polutan kedalam vakuola sehingga tidak terlalu toksik.

Untuk mencapai tujuan diatas ada 4 teknik dasar dalam bioremediasi yaitu:

- 1) Stimulasi aktivitas mikroorganisme *indogenous* dengan cara penambahan nutrisi, kondisi reaksi redok, optimasi pH dan lain-lain
- 2) Inokulasi daerah yang tercemar dengan mikroorganisme yang mempunyai kemampuan spesifik mentransformasi kontaminan
- 3) Aplikasi dari imobilisasi enzim
- 4) Penggunaan tanaman (*fitoremediasi*) untuk menghilangkan atau transformasi kontaminan.

Bioremediasi merupakan proses biologi secara alami yang aplikasinya merupakan proses mikrobiologi yang menyebabkan terjadinya terjadinya pemutusan senyawa dari senyawa kompleks menjadi senyawa sederhana dan mengakibatkan perubahan sifat polutan dari bersifat toksik menjadi non toksik. Pada proses bioremediasi ada beberapa persyaratan supaya bioremediasi dapat berjalan dengan sukses, adapun kriteria menurut Steven and Marc, 1996 adalah:

- a. Adanya populasi mikroba, yaitu mikroba yang dapat mendegradasi polutan
- b. Terdapatnya sumber energi dan sumber karbon yang bisa digunakan sebagai sumber energi dengan melepaskan elektron selama transformasi dan juga digunakan oleh sel mikroba tersebut.

- c. Adanya elektron aseptor, elektron lepas dikarenakan adanya transformasi karbon.
- d. Adanya nutrisi, Pertumbuhan bakteri memerlukan nutrisi antara lain: nitrogen, fosfor, calcium, potasium, magnesium, besi dan lain-lain.
- e. Kondisi lingkungan yang mendukung seperti temperatur, pH, salinitas, tekanan, konsentrasi polutan dan kehadiran inhibitor.

Berdasarkan agen dan proses biologis serta pelaksanaan rekayasa, bioremediasi dapat dibagi menjadi lima kelompok (Gossalam, 1999) yaitu:

a. In situ Bioremediasi

In situ bioremediasi juga disebut interistik bioremediasi atau *natural attenuation*, secara prinsip merupakan rancangan yang mengandalkan kemampuan mikroorganisma *indogen* dalam merombak polutan untuk melenyapkan polutan dari lingkungan .

b. Ex situ Bioremediasi

Ex situ bioremediasi merupakan pemindahan polutan dalam suatu tempat untuk diberikan suatu perlakuan (*above ground treatment*)

c. Bioaugmentasi

Bioaugmentasi merupakan perlakuan biologis dengan menggunakan mikroorganisme perombak pemulih lingkungan yang tercemar. Ada beberapa situasi yang mensyaratkan penggunaan mikroorganisma selektif tersebut seperti:

- 1) Mikroorganisme *indogen* hanya mampu merombak polutan dengan kecepatan sangat rendah.
- 2) Mikroorganisme *indogen* perombak polutan pada lingkungan bersangkutan jumlahnya tidak banyak.
- 3) Lingkungan telah tercemar berat sehingga perlu dilakukan pemulihan populasi mikroorganisme
- 4) Bila kecepatan perombakan polutan menjadi faktor tertentu.
- 5) Jika waktu dan biaya yang tersedia untuk melakukan bioremediasi hanya sedikit.

d. *Surfactant-aided Bioremediation*

Surfactant-aided Bioremediation, umumnya digunakan untuk mendegradasi polutan yang melekat pada partikel tanah (tanah, pasir atau sendimen)

e. Fitoremediasi

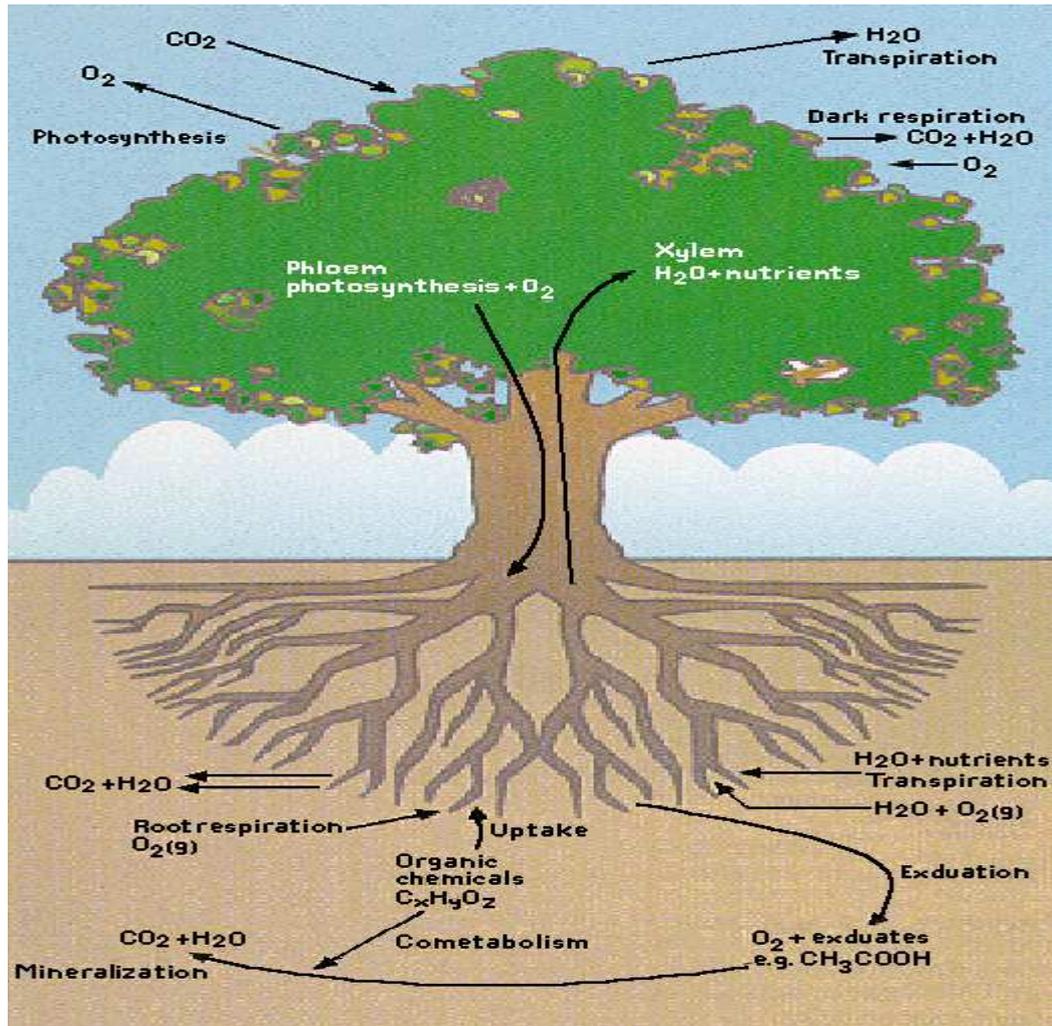
Penggunaan tanaman atau pohon untuk memulihkan tanah atau badan perairan yang telah tercemar. Tanaman bisa berperan aktif maupun pasif dalam proses penyisihan polutan .

2. Fitoremediasi

Fitoremediasi adalah teknologi proses dengan menggunakan vegetasi (tanaman) untuk menghilangkan dan memperbaiki kondisi tanah, *sludge*, kolam, sungai dari kontaminan (Melethia dkk, 1996). Metode fitoremediasi sangat berkembang pesat karena metoda ini mempunyai beberapa keunggulan diantaranya secara finansial relatif murah bila dibandingkan dengan metoda konvensional biaya dapat dihemat sebesar 75-85%.

Penelitian yang menunjukkan kesuksesan metoda fitoremediasi sudah banyak dilakukan diantaranya penelitian tanah dan air tanah yang tercemar oleh trichloroethylen (TCE) di *Naval Air Station joint Reserve Base Forth Worth* dengan menggunakan tanaman kapas setelah satu tahun terjadi pengurangan konsentrasi TCE ditanah dan di air tanah . Penelitian yang lain yaitu di pabrik amunisi di Iowa yang terkontaminasi oleh TNT baik tanah dan air tanahnya konsentrasi TNT ditanah dapat berkurang sehingga tinggal 1-5% saja (Kelly, 1997)

Penelitian metoda fitoremediasi yang disebabkan oleh kontaminan hidrokarbon juga sudah banyak dilakukan diantaranya di Alabama tanah sekitar 1500 kubik yard tercemar oleh kontaminan hidrokarbon dan secara-rata-rata kandungan TPH pada tanah melebihi 100 ppm, tetapi setelah satu tahun tanah tersebut ditutup oleh vegetasi kandungan dan TPH ditanah secara rata-rata kurang dari 10 ppm. (Kelly, 1997)



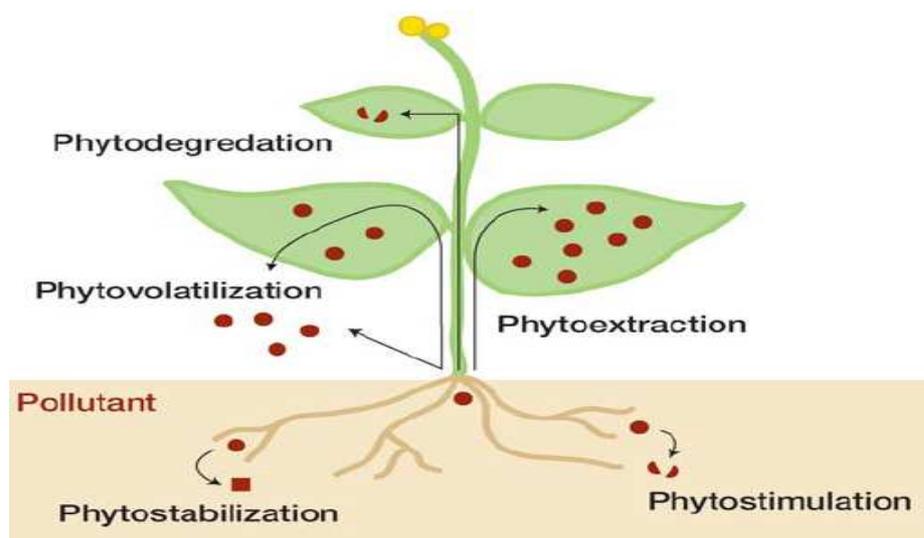
Gambar 2. Skematik aliran air, karbondioksida dan zat kimia pada tanaman (sumber: Schnoor, 1997).

a. Mekanisme kerja tanaman

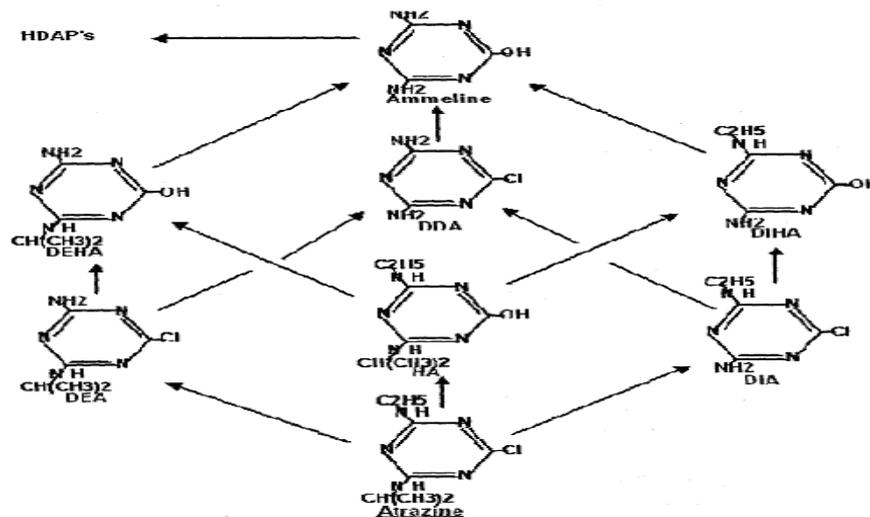
Mekanisme kerja fitoremediasi terdiri dari beberapa konsep dasar yaitu: *fitoekstraksi*, *fitovolatilisasi*, *fitodegradasi*, *fitostabilisasi*, *rhizofiltrasi* dan interaksi dengan mikroorganisme pendegradasi polutan. (Kelly, 1997). *Fitoekstraksi* merupakan penyerapan polutan oleh tanaman dari air atau tanah dan kemudian diakumulasi/disimpan didalam tanaman (daun atau batang), tanaman seperti itu disebut dengan *hiperakumulator*. Setelah polutan terakumulasi, tanaman bisa dipanen dan tanaman tersebut tidak boleh dikonsumsi tetapi harus di musnahkan dengan insinerator kemudian dilandfiling. *Fitovolatilisasi* merupakan proses penyerapan polutan oleh tanaman dan polutan tersebut dirubah menjadi bersifat volatil dan kemudian ditranspirasikan oleh tanaman. Polutan yang di

lepaskan oleh tanaman ke udara bisa sama seperti bentuk senyawa awal polutan, bisa juga menjadi senyawa yang berbeda dari senyawa awal.

Fitodegradasi adalah proses penyerapan polutan oleh tanaman dan kemudian polutan tersebut mengalami metabolisme didalam tanaman. Metabolisme polutan didalam tanaman melibatkan enzim antara lain *nitroductase*, *laccase*, *dehalogenase* dan *nitrilase*. *Fitostabilisasi* merupakan proses yang dilakukan oleh tanaman untuk mentransformasi polutan didalam tanah menjadi senyawa yang non toksik tanpa menyerap terlebih dahulu polutan tersebut kedalam tubuh tanaman. Hasil transformasi dari polutan tersebut tetap berada didalam tanah. *Rhizofiltrasi* adalah proses penyerapan polutan oleh tanaman tetapi biasanya konsep dasar ini berlaku apabila medium yang tercemarnya adalah badan perairan.



Gambar 3. Kemungkinan jalur penyerapan polutan pada tanaman pada proses fitoremediasi (titik merah menunjukan polutan)



Gambar.4. Mekanisme degradasi atrazine oleh tanaman poplar . HA (hydroxyatrazine), DEA (de-ethylhydroxyatrazine), DEHA (de-ethylhydroxyatrazine) ,DIA(de-isopropylatrazine), DIHA(de-isopropylhydroxyatrazine), DDA(dide-alkylatrazine) , HAD (hydroxylated de-alkyl atrazine) (Burken dan Schnoor, 1997).

b. Interaksi Tanaman dan Mikroorganisme pada proses remediasi tanah yang tercemar.

Tanaman sering kali ditemukan di lokasi-lokasi yang mengalami pencemaran . Tanaman ini dapat berperan langsung atau tidak langsung dalam proses remediasi lingkungan yang tercemar. Tanaman yang tumbuh dilokasi yang tercemar belum tentu berperan secara aktif dalam penyisihan kontaminan, bisa saja tanaman tersebut berperan secara tidak langsung. Yang berperan aktif dalam biodegradasi polutan adalah mikroorganisme tanah sedangkan tanaman bersifat mendorong percepatan remediasi lokasi yang tercemar tersebut.

Ada beberapa penelitian mengenai peranan positif tanaman dalam proses remediasi seperti yang dilakukan Anderson dkk dalam Erickson dkk, 1999 : beberapa tanaman tidak secara aktif berperan dalam remediasi tanah tetapi tanaman berfungsi sebagai faktor pendorong dan fasilitator membantu mikroorganisme tanah dalam meningkatkan efisiensi biodegradasi polutan. Peranan tanaman dalam proses mempercepat remediasi pada lokasi yang tercemar bisa dalam berbagai cara antara lain:

1). *Solar driven-pump-and-traet-system*

Tanaman mengalami transpiransi, proses ini adalah penyerapan air dan air tersebut diuapkan keudara melewati stomata pada daun. Proses transpirasi ini menggunakan matahari sebagai sistem yang membantu transpirasi. Pada saat transpirasi terjadi akar tanaman menghisap zat cair dan larutan yang berada disekitar akar tertarik kedaerah *rhizospher* sehingga kontaminan lebih terkonsentrasi didaerah *rhizospher* dan mempermudah bakteri untuk mengambil sebagai sumber nutrisi. Proses penarikan polutan kedaerah rhizosfer dengan bantuan sinar matahari disebut dengan *Solar driven-pump-and-traet-system*.

2). Biofilter

Tanaman dapat mengadsorpsi dan biodegradasi kontaminan yang berada di udara, air dan daerah buffer. Proses adsorpsi tersebut bersifat menyaring/filter untuk kontaminan.

3). Transfer oksigen dan menurunkan water table

Tanaman dengan sistem perakarannya dapat berfungsi sebagai oksigen transfer bagi mikroorganismenya dan dapat menurunkan *water table* sehingga difusi gas dapat terjadi. Fungsi ini biasanya dilakukan oleh tanaman apabila kontaminannya bersifat *readly degraded*.

4). Penghasil sumber karbon dan energi

Kontaminan biasanya bersifat tidak terlarut baik pada air sehingga sebelum dapat mendegradasi polutan, mikroorganismenya memerlukan nutrisi alternatif sebelum dapat menggunakan polutan sebagai sumber karbon dan energi. Dari beberapa hasil penelitian tanaman dapat berperan sebagai penghasil sumber karbon dan energi alternatif yaitu dengan cara mengeluarkan eksudat atau metabolisme oleh akar tanaman. Eksudat tersebut dapat digunakan oleh mikroorganismenya tanah sebagai sumber karbon dan energi alternatif sebelum mikroorganismenya tersebut menggunakan polutan sebagai sumber karbon dan energi.

5). *Rhizofiltrasi*

Tanaman menyerap polutan yang terkandung didalam air melalui perakaran tanaman.

c. Persyaratan tanaman untuk fitoremediasi

Pada penelitian fitoremediasi di lapangan ada beberapa persyaratan bagi tanaman yang akan digunakan dalam penelitian tersebut. Tidak semua tanaman dapat digunakan dikarenakan semua tanaman tidak dapat melakukan metabolisme, volatilisasi dan akumulasi semua polutan dengan mekanisme yang sama. Menurut Youngman (1999) untuk menentukan tanaman yang dapat digunakan pada penelitian fitoremediasi dipilih tanaman yang mempunyai sifat:

- 1) Cepat tumbuh.
- 2) Mampu mengkonsumsi air dalam jumlah yang banyak pada waktu yang singkat.
- 3) Mampu meremediasi lebih dari satu polutan.
- 4) Toleransi yang tinggi terhadap polutan.

Banyak tanaman yang telah diteliti dan memperlihatkan kemampuan dalam meremediasi polutan seperti logam dan senyawa hidrophobik seperti BTEX (benzen, toluene, ethylbenzen dan Xylen), Larutan klor, Limbah amunisi dan senyawa nitrogen. Pada tabel 1 memperlihatkan tanaman dan polutan yang dapat diremediasi.

Tabel. 1. Daftar Tanaman dan senyawa kimia yang dapat diremediasi

Tanaman	Senyawa kimia
Arabidopsis	Merkuri
Blader Champion	Seng, tembaga
Famili Brassicaceae	Selenium, sulfur, timbal, cadmium, chromium, nikel, seng, tembaga, cesium, strotium
Buxaceae	Nikel
Famili Compositae	Cesium Stontium
Euphorbiaceae	Nikel
Tomat	Tembaga, seng, timbal
Poplar	Pestisida, atrazine, TCE, carbon tetrachloria, senyawa nitrogen, TNT
Pennycress	Seng, cadmium
Bunga matahari	Cesium ,strotium, uranium
Genus lemma	Limbah bom
Parrot feather	Limbah bom
Arrow root	TNT,RDX
Perennial rye grass	Polychlorinatedphenyl, Polyaromatic hidrokarbon

Sumber : Kelly. 1997. *Phytoremediation*.

D. Penutup

Lingkungan merupakan suatu sistem yang mempunyai daya sangat baik untuk selalu mempertahankan keseimbangannya. Keseimbangan tersebut bersifat sangat dinamis artinya selalu ada pergeseran kesetimbangan akan tetapi selalu ada *feed back* internal yang dapat mengembalikan kesetimbangan tersebut.

Limbah yang merupakan bahan sisa hasil produksi yang tidak bernilai ekonomis dibuang ke lingkungan menjadi input eksternal bagi ekosistem. Dikarenakan sifat limbah yang bersifat toksik, menyebabkan terjadinya cekaman bagi ekosistem dan dapat menyebabkan terjadinya ketidakseimbangan dalam ekosistem. Akan tetapi ekosistem mempunyai daya lenting untuk tetap mengembalikan kesetimbangan kepada kesetimbangan awal. Apabila terjadi pencemaran yang mengakibatkan cekaman ekstrim maka ekosistem tersebut mengalami perubahan dan membuat kesetimbangan baru sesuai dengan kondisi aktual. Kesetimbangan tersebut menjadi suatu proses untuk mengembalikan kembali kondisi ekosistem kepada kesetimbangan awal.

Bioremediasi merupakan salah satu konsep yang menerapkan teori diatas. Ketika terjadi pencemaran maka ekosistem mengalami penyederhanaan sehingga dari segi keanekaragaman mengalami penurunan. Komponen ekosistem yang ada pada kondisi lingkungan tercemar sangat terbatas, hanya komponen yang dapat beradaptasilah yang masih dapat bertahan dengan kondisi aktual. Dengan menggunakan teknik bioremediasi kondisi lingkungan direkayasa agar komponen biotik yang ada (*endogenous*) atau dengan memberikan komponen biotik dari luar (*eksogenous*) dapat melakukan *recovery* kondisi lingkungan menjadi kondisi dengan kualitas lingkungan yang lebih baik.

E. Daftar Pustaka

- Backer, C dan Herson,D. 1994. *Bioremediation* .USA. Mcgraw Hill.Inc
- Begon, M., J.L. Harper, and C.R. Townsend. 1986. *Ecology: Individuals, Populations and Communities*. Sinauer Associates, Inc. Publisher. Sunderland, Massachusetts. 876 halaman.
- Boughey, A.S. 1975. *Man and the Environment: an Introduction to Human Ecology and Evolution*. Second Edition. MacMillan Publishing Co. Inc. New York. 576 halaman.
- Bruken, J.G, dan Schnoor.J.L. 1997. *Uptake and Metabolism of Atrazine by Poplar Trees*. Enviromental Science and Technology, Volume 31, No 5.
- Clark,R.B.1986. *Marine Polution*.Oxford. Claredon Press.
- Erickson L.E, M.K. Banks, L.C.Davis, A.P.Schwab, N. Muralidharan, and K. Reilley. 1999. *Using Vegetaion To Enhance In Situ Bioremediation*. Downloading available at [http ://www .engg.ksu.edu /HSRC /phytoem /vegenhance.html](http://www.engg.ksu.edu/HSRC/phytoem/vegenhance.html)
- Gossalam. 1999. *Kemampuan Degradasi Hidrokarbon Minyak Bumi Oleh Isolat Bakteri Dari Lingkungan Hutan Magrove*. Thesis Magister ITB.Bandung.
- Kelly.E.B.1997. Ground Water Polution: *Phytoremediation*. Downloading available at [http: www.cee.vt.edu/program_areas /enviromental/teach/gwprimer /phyto/phyto/html](http://www.cee.vt.edu/program_areas/enviromental/teach/gwprimer/phyto/phyto/html)
- Melithia,C. L.A. Jhonson, dan W. Amber. 1996. Ground Water Polution: *In situ Biodegradation*. Down loading, available at [http:www. cee. vt.edu/ program_areas/ enviromental teach/gwprimer /group1 / ind /ex /html](http://www.cee.vt.edu/program_areas/enviromental/teach/gwprimer/group1/ind/ex/html)
- Odum, E.P. 1993. *Dasar-dasar Ekologi*. Edisi Ketiga. (Terjemahan). Gadjah Mada University Press. Yogyakarta. 697 halaman.
- Sheehan, D. 1997. *Bioremediation Protocol*. Humana Press. Totowa. New Jersey
- Smith dan Smith, 1998. *Element of Ecology*. Benjamin/Cumming Science Publishing. San Franscisco.

- Siahaan, N.H.T. 2004. *Hukum Lingkungan dan Ekologi Pembangunan*. Erlangga. Jakarta.
- Steven, B dan Marc, K. 1996. *In situ Bioremediation Of Petroleum Aromatic Hydrocarbon*. Ground Water Polution. Down loading, available at http://www.cee.vt.edu/program_areas/enviromental/teach/gwprimer/group1/ind/ex/html.
- Thomas, J.M, C.H. Ward, R.L. Raymond, J.T. Wilson, dan R.C. Loehr. 1992. *Bioremediation*. Encyclopedia Of Microbiology. Volume 1. Academic Press. Austin.
- Udiharto. 1992. *Aktivitas Mikroba Dalam Degradasi Crude Oil*. Diskusi Ilmiah VII hasil Penelitian PPPTMGB” LEMIGAS. Jakarta.
- Youngman, L. 1999. *Physiological respon Of Switchgrass (Panicum Virgatum L) to Organic And Inorganic Amened Heavy-Metal Contaminated Chat Tailings*. Phytoremediation of Soil and Water Contaminants, American Chemical society Symposium. Washington, D.C.