

II. TINJAUAN PUSTAKA

A. Pencemaran Lingkungan (Tanah)

Pencemaran lingkungan adalah suatu keadaan yang terjadi karena perubahan kondisi tata lingkungan (tanah, udara, dan air) yang tidak menguntungkan (merusak dan merugikan kehidupan manusia, binatang, dan tumbuhan) yang disebabkan oleh kehadiran benda-benda asing (seperti sampah, limbah industri, minyak, logam berbahaya dan sebagainya). Hal ini salah satunya sebagai akibat perbuatan manusia, sehingga mengakibatkan lingkungan tersebut tidak berfungsi seperti semula (Susilo, 2003). Kontaminasi pada tanah dan perairan diakibatkan oleh banyak penyebab termasuk limbah industri, limbah pertambangan, residu pupuk dan pestisida hingga bekas instalasi senjata kimia. Bentuk kontaminasi berupa berbagai unsur dan substansi kimia berbahaya (Squires 2001; Matsumoto 2001; Wise dkk, 2000) yang mengganggu keseimbangan fisik, kimia, dan biologi tanah.

Ketika suatu zat berbahaya atau beracun telah mencemari permukaan tanah, maka ia dapat menguap, tersapu air hujan dan atau masuk ke dalam tanah. Pencemaran yang masuk ke dalam tanah kemudian terendap sebagai zat kimia beracun di tanah. Zat beracun di tanah tersebut dapat berdampak langsung kepada manusia ketika bersentuhan atau dapat mencemari air tanah dan udara di atasnya. Kontaminasi oleh logam berat seperti kadmium (Cd), seng (Zn), plumbum (Pb), kuprum (Cu), kobalt (Co), selenium (Se) dan nikel (Ni) menjadi perhatian serius karena dapat menjadi potensi polusi pada

permukaan tanah maupun air tanah dan dapat menyebar ke daerah sekitarnya melalui air, angin, penyerapan oleh tumbuhan, dan bioakumulasi pada rantai makanan (Chaney dkk., 1998).

Pada dasarnya kontaminasi logam dalam tanah pertanian bergantung pada: 1) Jumlah logam yang ada pada batuan tempat tanah terbentuk, 2) Jumlah mineral yang ditambahkan pada tanah sebagai pupuk, 3) Jumlah deposit logam dari atmosfer yang jatuh ke dalam tanah, dan 4) Jumlah yang terambil pada proses panen ataupun merembes ke dalam tanah yang lebih dalam (Darmono, 2001). Kandungan logam dalam tanah sangat berpengaruh terhadap kandungan logam pada tanaman yang tumbuh di atasnya, kecuali terjadi interaksi diantara logam itu sehingga terjadi hambatan penyerapan logam tersebut oleh tanaman. Akumulasi logam dalam tanaman tidak hanya tergantung pada kandungan logam dalam tanah, tetapi juga tergantung pada unsur kimia tanah, jenis logam, pH tanah, dan spesies tanaman (Darmono, 2001).

B. Logam Berat Timbal (Pb)

Menurut Connel dan Miller (1995), logam berat adalah suatu logam dengan berat jenis lebih besar. Logam ini memiliki karakter seperti berkilau, lunak atau dapat ditempa, mempunyai daya hantar panas dan listrik yang tinggi dan bersifat kimiawi, yaitu sebagai dasar pembentukan reaksi dengan asam. Selain itu logam berat adalah unsur yang mempunyai nomor atom lebih besar dari 21 dan terdapat di bagian tengah daftar periodik.

Logam berat adalah istilah yang digunakan secara umum untuk kelompok logam dan metaloid dengan densitas lebih besar dari 5 g/cm^3 , terutama pada unsur seperti Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb dan Zn. Unsur-unsur ini biasanya erat kaitannya dengan masalah pencemaran dan toksisitas. Logam berat secara alami ditemukan pada batu-batuan dan mineral lainnya, maka dari itu logam berat secara normal merupakan unsur dari tanah, sedimen, air, dan organisme hidup yang akan menyebabkan pencemaran bila konsentrasinya telah melebihi batas normal. Jadi konsentrasi relatif logam dalam media adalah hal yang paling penting (Alloway dan Ayres, 1997).

Timbal atau timah hitam (Pb) adalah logam lunak berwarna abu-abu kebiruan mengkilat serta mudah dimurnikan dari pertambangan. Timbal (Pb) memiliki titik lebur rendah, mudah dibentuk, memiliki sifat kimia yang aktif, sehingga bisa digunakan untuk melapisi logam agar tidak timbul perkaratan. Timbal meleleh pada temperatur 328°C , titik didih 1740°C , dan memiliki berat jenis $11,34 \text{ gr/ml}$ dengan berat atom $207,20$ (Widowati, dkk., 2008). Selain dalam bentuk logam murni, timbal dapat ditemukan dalam bentuk senyawa anorganik dan organik. Semua bentuk Pb tersebut berpengaruh sama terhadap toksisitas pada manusia (Darmono, 2001).

Timbal (Pb) secara alami banyak ditemukan dan tersebar luas pada bebatuan dan lapisan kerak bumi. Di perairan logam Pb ditemukan dalam bentuk Pb^{2+} , PbOH^+ , PbHCO_3 , PbSO_4 dan PbCO^+ (Perkins, 1977 dalam Rohilan, 1992). Pb^{2+} di perairan bersifat stabil dan lebih mendominasi dibandingkan dengan Pb^{4+} (GESAMP, 1985). Masuknya logam Pb ke dalam

perairan melalui proses pengendapan yang berasal dari aktivitas di darat seperti industri, rumah tangga, erosi, jatuhnya partikel-partikel dari sisa proses pembakaran yang mengandung tetraetil Pb, air buangan dari pertambangan bijih timah hitam, dan buangan sisa industri baterai (Palar, 1994).

Soepardi (1983) dalam Charlena (2004) menjelaskan bahwa timbal (Pb) tidak akan larut ke dalam tanah jika tanah tidak masam. Pengapuran tanah mengurangi ketersediaan timbal (Pb) dan penyerapan oleh tanaman. Timbal akan diendapkan sebagai hidroksida fosfat dan karbonat.

Tabel 1. Jenis-jenis batuan induk pembentuk tanah yang mengandung logam berat Pb

Jenis batuan	Pb (ppm)
Ultra basalt	1 - 14
Basalt	3 - 6
Granit	18 - 24
Sabs dan Liat	20 - 23
Sabs Hitam	20 - 30
Pasir	10 - 12
Kapur	5 - 9

Sumber: Barchia (2009)

Sudarmaji, dkk., (2006) juga mengatakan bahwa secara alami Pb juga ditemukan di udara yang kadarnya berkisar antara 0,0001-0,001 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Tumbuh-tumbuhan termasuk sayur-mayur dan padi-padian dapat mengandung Pb, penelitian yang dilakukan di USA kadarnya berkisar antara 0,1-1,0 $\mu\text{g}/\text{kg}$ berat kering. Logam berat Pb yang berasal dari tambang dapat berubah menjadi PbS (galena), PbCO_3 (*cerusite*) dan PbSO_4 (*anglesite*). Galena merupakan sumber utama Pb yang berasal dari pertambangan sumber daya mineral. Kandungan Pb total pada tanah pertanian berkisar antar 2-200 ppm. Kadar unsur Pb yang tersedia dalam tanah sangat rendah, tetapi

dibutuhkan tanaman dalam jumlah sangat sedikit. Hasil analisis jaringan tanaman (rerumputan) pada masa pertumbuhan aktif menunjukkan bahwa kandungan Pb berkisar dari 0,3-1,5 mg/kg bahan kering (Alloway, dan Ayres, 1997).

Menurut Sudarmaji, dkk., (2006), timbal (Pb) dapat bersumber dari hasil pembakaran bahan tambahan (*additive*) Pb pada bahan bakar kendaraan bermotor menghasilkan emisi Pb anorganik. Logam berat Pb yang bercampur dengan bahan bakar tersebut akan bercampur dengan oli dan melalui proses di dalam mesin maka logam berat Pb akan keluar dari knalpot bersama dengan gas buang lainnya, sedangkan industri yang berpotensi sebagai sumber pencemaran Pb adalah semua industri yang memakai Pb sebagai bahan baku maupun bahan penolong, misalnya:

a. Industri pengecoran maupun pemurnian

Industri ini menghasilkan timbal konsentrat (*primary lead*), maupun *secondary lead* yang berasal dari potongan logam (*scrap*).

b. Industri baterai

Industri ini banyak menggunakan logam Pb terutama *lead antimony alloy* dan *lead oxides* sebagai bahan dasarnya.

c. Industri bahan bakar

Pb berupa *tetra ethyl lead* dan *tetra methyl lead* banyak dipakai sebagai anti *knock* pada bahan bakar, sehingga baik industri maupun bahan bakar yang dihasilkan merupakan sumber pencemaran Pb.

d. Industri kabel

Industri kabel memerlukan Pb untuk melapisi kabel. Saat ini pemakaian Pb di industri kabel mulai berkurang, walaupun masih digunakan campuran logam Cd, Fe, Cr, Au dan As yang juga membahayakan untuk kehidupan makhluk hidup.

e. Industri kimia yang menggunakan bahan pewarna

Pada industri ini seringkali dipakai Pb karena toksisitasnya relatif lebih rendah jika dibandingkan dengan logam pigmen yang lain. Sebagai pewarna merah pada cat biasanya dipakai *red lead*, sedangkan untuk warna kuning dipakai *lead chromate* (Sudarmaji, dkk., 2006).

Timbal merupakan logam berat yang sangat beracun, dapat dideteksi secara praktis pada seluruh benda mati di lingkungan dan seluruh sistem biologi. Sumber utama timbal adalah makanan dan minuman. Komponen ini beracun terhadap seluruh aspek kehidupan. Timbal menunjukkan beracun pada sistem saraf, *hemetologic*, *hemetotoxic* dan memengaruhi kerja ginjal. Rekomendasi dari WHO, logam berat Pb dapat ditoleransi dalam seminggu dengan takaran 50 mg/kg berat badan untuk dewasa dan 25 mg/kg berat badan untuk bayi dan anak-anak. Mobilitas timbal di tanah dan tumbuhan cenderung lambat dengan kadar normal pada tumbuhan berkisar 0,5-3 ppm.

Timbal (Pb) sebagian besar diakumulasi oleh organ tanaman, yaitu daun, batang, akar dan akar umbi-umbian (bawang merah). Perpindahan timbal dari tanah ke tanaman tergantung komposisi dan pH tanah. Konsentrasi timbal yang tinggi (100-1000 mg/kg) akan mengakibatkan

pengaruh toksik pada proses fotosintesis dan pertumbuhan tanaman (Charlena, 2004).

Logam Pb bersifat toksik pada manusia dan dapat menyebabkan keracunan akut dan kronis. Keracunan akut biasanya ditandai dengan rasa terbakar pada mulut, adanya rangsangan pada sistem gastrointestinal yang disertai dengan diare. Sedangkan gejala kronis umumnya ditandai dengan mual, anemia, sakit di sekitar mulut dan dapat menyebabkan kelumpuhan (Darmono, 2001).

Fardiaz (1992) menambahkan bahwa daya racun dari logam ini disebabkan terjadi penghambatan proses kerja enzim oleh ion-ion Pb^{2+} . Penghambatan tersebut menyebabkan terganggunya pembentukan hemoglobin darah. Hal ini disebabkan adanya bentuk ikatan yang kuat (ikatan kovalen) antara ion-ion Pb^{2+} dengan gugus sulphur di dalam asam-asam amino. Untuk menjaga keamanan dari keracunan logam ini, batas maksimum timbal dalam makanan laut yang ditetapkan oleh Departemen Kesehatan RI dan FAO adalah sebesar 2,0 ppm. Pada organisme air kadar maksimum Pb yang aman dalam air adalah sebesar 50 ppb (EPA, 1973).

Keberadaan unsur logam pada tanah dapat terjadi karena berbagai hal yaitu penggunaan bahan agrokimia (pupuk, pestisida dan fungisida), polusi (asap kendaraan bermotor), penggunaan bahan bakar minyak, pupuk organik, buangan limbah rumah tangga, industri, dan pertambangan sehingga terjadi kontaminasi logam-logam pada tanah dan tumbuh-tumbuhan (Alloway dan Ayres, 1997). Adapun batas kritis untuk beberapa kontaminan logam berat

pada tanah, air dan tanaman ditunjukkan pada Tabel 2 dan kisaran kadar logam berat sebagai pencemar dalam tanah dan tanaman ditunjukkan pada Tabel 3.

Tabel 2. Batas kritis logam berat pada tanah, air dan tanaman

Logam berat	Tanah ^a (ppm)	Air ^b (ppm)	Tanaman ^c (ppm)
Pb	100	0,003	50
Cd	0,5	0,005 - 0,10	5 - 30
Co	10	0,4 - 0,6	15 - 30
Cr	2,5	0,5 - 1,0	5 - 30
Ni	20	0,2 - 0,5	5 - 30
Cu	60 - 125	2 - 3	20 - 100
Mn	1.500	-	-
Zn	70	5 - 10	100 - 400

Sumber : ^a Kementerian Kependudukan dan Lingkungan Indonesia bekerjasama dengan Universitas Dalhousie Canada (1992)

^b Pemerintah Republik Indonesia (1990)

^c Alloway dan Ayres (1997)

Tabel 3. Kisaran kadar logam berat sebagai pencemar dalam tanah dan tanaman

Unsur	Kisaran Kadar Logam Berat (ppm)	
	Tanah	Tanaman
As	0,1 - 40	0,1 - 5
B	2 - 100	30 - 75
F	30 - 300	2 - 20
Cd	0,1 - 7	0,2 - 0,8
Mn	100 - 4000	15 - 200
Ni	10 - 1000	1
Zn	10 - 300	15 - 200
Cu	2 - 100	4 - 15
Pb	2 - 200	0,1 - 10

Sumber: Barchia (2009)

Faktor-faktor yang memengaruhi kadar timbal dalam tanaman yaitu jangka waktu tanaman kontak dengan timbal, kadar timbal dalam tanah, morfologi dan fisiologi tanaman, umur tanaman dan faktor yang memengaruhi areal seperti banyaknya tanaman penutup serta jenis tanaman di

sekeliling tanaman tersebut. Dua jalan masuknya timbal ke dalam tanaman yaitu, melalui akar dan daun. Timbal setelah masuk ke sistem tanaman akan diikat oleh membran-membran sel, mitokondria dan kloroplas. Bahkan pencemaran dapat menyebabkan terjadinya kerusakan fisik. Kerusakan tersembunyi dapat berupa penurunan kemampuan tanaman dalam menyerap air, pertumbuhan yang lambat atau pembukaan stomata yang tidak sempurna (Hutagalung dan Jalaluddin, 1982).

C. Fitoremediasi

Fitoremediasi adalah penggunaan tumbuhan untuk menghilangkan, memindahkan, menstabilkan, atau menghancurkan bahan pencemar baik itu senyawa organik maupun anorganik. Fitoremediasi didefinisikan sebagai pencucian polutan ke bentuk yang tidak berbahaya (Chaney, 1995). Fitoremediasi merupakan metode yang murah, efisien, dan ramah lingkungan. Metode fitoremediasi sangat berkembang pesat karena metode ini mempunyai beberapa keunggulan diantaranya relatif murah bila dibandingkan dengan metode konvensional sehingga biaya dapat dihemat sebesar 75-85% (Schanoor dan Cutcheon, 2005).

Menurut Mangkoedihardjo (2010), proses fitoremediasi secara umum dibedakan berdasarkan mekanisme fungsi dan struktur tumbuhan. Adapun klasifikasi proses fitoremediasi adalah sebagai berikut:

1. Fitostabilisasi (*phytostabilization*)

Akar tumbuhan melakukan imobilisasi polutan dengan cara mengakumulasi, mengadsorpsi pada permukaan akar dan mengendapkan

presipitat polutan dalam zona akar. Proses ini secara tipikal digunakan untuk dekontaminasi zat-zat anorganik yaitu sulfur, nitrogen, dan beberapa logam berat.

2. Fitoekstraksi/fitoakumulasi (*phytoextraction/phytoaccumulation*)

Akar tumbuhan menyerap polutan dan selanjutnya ditranslokasi ke dalam organ tumbuhan. Proses ini cocok digunakan untuk dekontaminasi zat-zat anorganik seperti pada proses fitostabilisasi.

3. Rizofiltrasi (*rhizofiltration*)

Akar tumbuhan mengadsorpsi atau presipitasi pada zona akar atau mengabsorpsi larutan polutan sekitar akar ke dalam akar. Proses ini digunakan untuk bahan larutan yang mengandung bahan organik maupun anorganik.

4. Fitodegradasi/fitotransformasi (*phytodegradation/phytotransformation*)

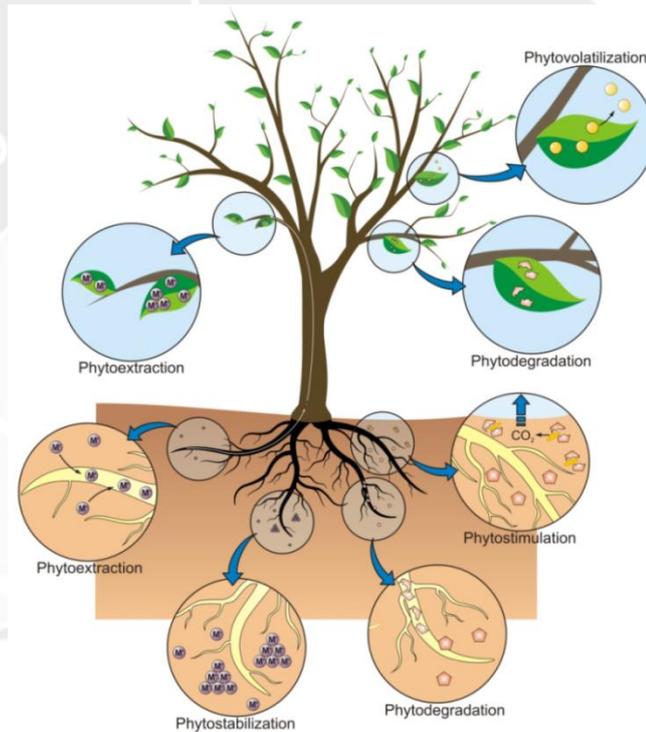
Organ tumbuhan menguraikan polutan yang diserap melalui proses metabolisme tumbuhan atau secara enzimatik.

5. Rizodegradasi (*rhizodegradation*)

Polutan yang diuraikan oleh mikroba dalam tanah, yang diperkuat/sinergis oleh ragi, fungi, dan zat-zat keluaran akar tumbuhan (eksudat) yaitu gula, alkohol dan asam. Eksudat itu merupakan makanan mikroba yang menguraikan polutan maupun biota tanah lainnya. Proses ini tepat untuk dekontaminasi zat organik.

6. Fitovolatilisasi (*phytovolatilization*)

Penyerapan polutan oleh tumbuhan dan dikeluarkan dalam bentuk uap cair ke atmosfer. Kontaminan bisa mengalami transformasi sebelum lepas ke atmosfer. Proses ini tepat digunakan untuk kontaminan zat-zat organik.



Gambar 1. Mekanisme penyerapan logam berat oleh tanaman
(Sumber: Favas dkk., 2014)

Menurut Homaee, dkk., (2006), bahwa tanaman lobak (*Rhaphanus sativa* L.) mampu berperan dalam fitoremediasi logam Pb. Konsentrasi maksimum Pb di dalam akar yaitu sebesar 440 $\mu\text{g}/\text{gr}$, sedangkan di dalam daun sebesar 42 $\mu\text{g}/\text{gr}$. Dalam penelitian ini terlihat bahwa lobak berperan dalam proses fitoekstraksi. Sedangkan yang dilaporkan oleh Huang, dkk., (2000), bahwa tanaman jagung (*Zea mays* L.) dan kacang kapri (*Pisum sativum* L.) dapat menyerap Pb. Melalui penambahan EDTA di dalam tanah

meningkatkan konsentrasi Pb di dalam pucuk kedua tumbuhan tersebut dari sekitar 500 mg/kg menjadi 10.000 mg/kg dengan kandungan Pb di dalam tanah lebih kurang 2.500 mg/kg.

Kerusakan akibat pencemaran dapat terjadi karena adanya akumulasi bahan toksik dalam tubuh tumbuhan, perubahan pH, peningkatan atau penurunan aktivitas enzim, rendahnya kandungan asam askorbat di daun, tertekanya fotosintesis, peningkatan respirasi, produksi bahan kering rendah, perubahan permeabilitas, terganggunya keseimbangan air dan penurunan kesuburannya dalam waktu yang lama. Gangguan metabolisme berkembang menjadi kerusakan kronis dengan konsekuensi tak beraturan. Tumbuhan akan berkurang produktivitasnya dan kualitas hasilnya juga rendah (Guritno dan Sitompul, 1995).

Beberapa penelitian menunjukkan bahwa pencemaran mengakibatkan menurunnya pertumbuhan dan produksi tanaman serta diikuti dengan gejala yang tampak (*visible symptoms*). Kerusakan tanaman karena pencemaran berawal dari tingkat biokimia (gangguan proses fotosintesis, respirasi, serta biosintesis protein dan lemak), selanjutnya tingkat ultrastruktural (disorganisasi sel membran), kemudian tingkat sel (dinding sel, mesofil, pecahnya inti sel) dan diakhiri dengan terlihatnya gejala pada jaringan daun seperti klorosis dan nekrosis (Malhotra dan Khan, 1984 dalam Treshow, 1989).

Tanaman yang tumbuh di daerah dengan tingkat pencemaran tinggi dapat mengalami berbagai gangguan pertumbuhan serta rawan akan berbagai

penyakit, antara lain klorosis, nekrosis, dan bintik hitam. Partikulat yang terdeposisi di permukaan tanaman dapat menghambat proses fotosintesis (Fatoba dan Emem, 2008). Menurut Gothberg (2008), tingginya kandungan Pb pada jaringan tumbuhan menyebabkan berkurangnya kadar klorofil daun sehingga proses fotosintesis terganggu, selanjutnya berakibat pada berkurangnya produksi suatu tumbuhan.

D. Tumbuhan Sebagai Hiperakumulator

Secara alami tumbuhan memiliki beberapa keunggulan, yaitu: (i) Beberapa famili tumbuhan memiliki sifat toleran dan hiperakumulator terhadap logam berat, (ii) Banyak jenis tumbuhan dapat merombak polutan, (iii) Pelepasan tumbuhan yang telah dimodifikasi secara genetik ke dalam suatu lingkungan relatif lebih dapat dikontrol dibandingkan dengan mikroba, (iv) Tumbuhan memberikan nilai estetika, (v) Dengan perakarannya yang dapat mencapai 100×10^6 km akar per ha, tumbuhan dapat mengadakan kontak dengan bidang tanah yang sangat luas dan penetrasi akar yang dalam, (vi) Dengan kemampuan fotosintesis, tumbuhan dapat menghasilkan energi yang dapat dicurahkan selama proses detoksifikasi polutan, dan (vii) Asosiasi tumbuhan dengan mikrobia memberikan banyak nilai tambah dalam memperbaiki kesuburan tanah (Feller, 2000).

Semua tumbuhan memiliki kemampuan menyerap logam tetapi dalam jumlah yang bervariasi. Sejumlah tumbuhan dari banyak famili terbukti memiliki sifat hipertoleran, yakni mampu mengakumulasi logam dengan

konsentrasi tinggi pada jaringan akar dan tajuknya, sehingga bersifat hiperakumulator. Sifat hiperakumulator berarti dapat mengakumulasi unsur logam tertentu dengan konsentrasi tinggi pada tajuknya dan dapat digunakan untuk tujuan fitoekstraksi. Dalam proses fitoekstraksi ini logam berat diserap oleh akar tanaman dan ditranslokasikan ke tajuk untuk diolah kembali atau dibuang pada saat tanaman dipanen (Chaney, 1995).

Mekanisme biologis dari hiperakumulasi unsur logam pada dasarnya meliputi proses-proses: (i) Interaksi rizosferik, yaitu proses interaksi akar tanaman dengan media tumbuh (tanah dan air). Dalam hal ini tumbuhan hiperakumulator memiliki kemampuan untuk melarutkan unsur logam pada rizosfer dan menyerap logam bahkan dari fraksi tanah yang tidak bergerak sehingga menjadikan penyerapan logam oleh tumbuhan hiperakumulator melebihi tumbuhan normal (McGrath, dkk., 1997), (ii) Proses penyerapan logam oleh akar pada tumbuhan hiperakumulator lebih cepat dibandingkan tumbuhan normal, terbukti dengan adanya konsentrasi logam yang tinggi pada akar (Lasat, dkk., 1996). Akar tumbuhan hiperakumulator memiliki daya selektifitas yang tinggi terhadap unsur logam tertentu, (iii) Sistem translokasi unsur dari akar ke tajuk pada tumbuhan hiperakumulator lebih efisien dibandingkan tanaman normal. Hal ini dibuktikan oleh konsentrasi logam tajuk/akar pada tumbuhan hiperakumulator lebih dari satu (Gabbrielli, dkk., 1991).

Karakteristik tumbuhan hiperakumulator adalah: (i) Tahan terhadap unsur logam dalam konsentrasi tinggi pada jaringan akar dan tajuk, (ii)

Tingkat laju penyerapan unsur dari tanah yang tinggi dibanding tanaman lain, (iii) Memiliki kemampuan mentranslokasi dan mengakumulasi unsur logam dari akar ke tajuk dengan laju yang tinggi (Reeves, 1992).

Banyak jenis tumbuhan berpembuluh (*vascular plants*) ditemukan mempunyai kemampuan untuk mengakumulasi logam berat (*metal hyperaccumulator plants*). Lebih dari 400 jenis tumbuhan telah ditemukan mempunyai kemampuan hiperakumulator termasuk anggota famili Asteraceae, Brassicaceae, Caryophyllaceae, Cyperaceae, Cunouniaceae, Fabaceae, Flacourtiaceae, Lamiaceae, Poaceae, Violaceae dan Euphorbiaceae. Tumbuhan yang termasuk hiperakumulator adalah anturium merah/kuning, alamanda kuning/ungu, akar wangi, bambu air, cana presiden merah/kuning/putih, dahlia, dracenia merah/hijau, helikonia kuning/merah, jaka, keladi loreng/sente/hitam, kenyeri merah/putih, lotus kuning/merah, onje merah, pancing merah/mutih, padi-padian, papirus, pisang mas, ponaderia, sempol merah/putih, spider lili, dan lain-lain (Hindersah, 2004).

E. Deskripsi, Taksonomi dan Kemampuan Tanaman Alfalfa (*Medicago sativa* L.)

Alfalfa atau Lucerne (*Medicago sativa* L.) merupakan tanaman tahunan yang dapat tumbuh kembali setelah pemotongan (defoliiasi). Alfalfa digunakan di Amerika sebagai sumber hijauan bagi ternak kuda, sapi penggemukan dan sapi perah. Alfalfa juga berfungsi untuk mencegah erosi

karena kemampuannya dalam menutup tanah sangat baik. Secara ekonomi alfalfa merupakan komoditas yang bernilai (Earthnotes, 2001).

Alfalfa memiliki kandungan protein yang tinggi hingga mencapai 25% dan 8 asam amino, kaya akan kandungan kalsium dan kalium, mineral mikro, tinggi kandungan vitamin A, B1, B2, B6, B12, C, D, E, K dan U, betakaroten, garam organik, tinggi klorofil, fosfor, besi dan magnesium, rendah kandungan serat kasarnya tapi masih memenuhi kebutuhan serat untuk ternak ruminansia (Earthnotes, 2001). Nilai pencernaan alfalfa berkisar antara 71-80% (Phillips, dkk., 2003).

Alfalfa dapat beradaptasi dengan baik pada berbagai macam iklim dan kondisi tanah. Alfalfa beradaptasi sangat baik pada tanah lempung yang dalam dengan bagian tanah yang berpori. Alfalfa juga membutuhkan banyak kapur dan tidak bagus tumbuh pada tanah yang masam (Hanson dan Barnes, 1973). Umumnya alfalfa dapat tumbuh baik pada pH 6,2 (Rowell, 1994).

Alfalfa responsif terhadap aplikasi pemupukan, khususnya fosfor, sulfur dan potasium (Whiteman, 1980) dan menurut Pearson dan Ison (1987) efisiensi penggunaan pupuk fosfor umumnya berkisar 0,7 – 1,0, namun bisa juga turun hingga nol bila diaplikasikan saat curah hujan tinggi pada tanah berpasir. Di Missouri, alfalfa diperhadapkan dengan beberapa penyakit: busuk akar (*phytophthora root rot*), penyakit layu (*bacterial wilt*), *anthracnose*, dan *sclerotinia* (batang putih atau kosong, busuk batang). Belum ditemukan cara mengatasinya secara kimia, kontrol terbaik adalah dengan

pengecahan melalui pemilihan varietas yang resisten terhadap *phytophthora root rot*, *bacterial wilt* dan *anthracnose* (Henning dan Nelson, 1993)

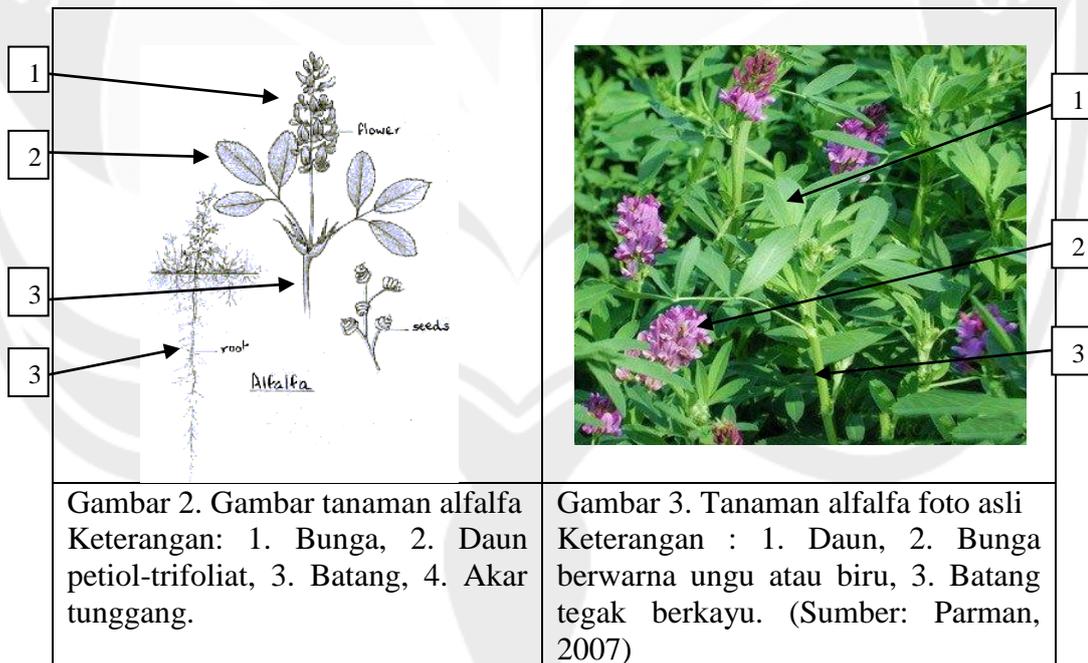
Menurut USDA (2011), pengelompokan tanaman alfalfa dalam sistem binomial adalah sebagai berikut:

Kerajaan	: Plantae
Subkerajaan	: Tracheobionta
Filum	: Tracheophyta
Subfilum	: Spermatophytina
Super divisi	: Spermatophyta
Divisi	: Magnoliophyta
Super kelas	: Angiospermae
Kelas	: Gymnospermae
Subkelas	: Dicotyledonae
Bangsa	: Fabales
Suku	: Fabaceae
Marga	: <i>Medicago</i>
Jenis	: <i>Medicago sativa</i> L.

Alfalfa termasuk tanaman leguminosa (suku polong-polongan) yang berkembang secara luas sebagai pakan ternak. Pertumbuhan akar yang dalam dapat mencapai 4,5 meter sehingga tanaman tangguh menghadapi musim kering atau kekeringan yang panjang. Tanaman bercabang dan membentuk rhizome, membutuhkan sinar matahari dan kadar kapur yang cukup, toleran kekeringan tetapi tidak tahan kelembaban tinggi dan penggembalaan berat (Al-Neem, 2008).

Menurut Radovic, dkk., (2009) alfalfa memerlukan drainase (penyaluran air) yang baik, pH 6,5 atau lebih, dengan kesuburan tanah yang baik. Alfalfa dapat beradaptasi pada daerah kering dengan curah hujan 200 mm/tahun atau daerah basah 2500 mm/tahun. Batang tanaman tumbuh

mendatar, berkayu di bagian dasar, cabang-cabang dan menanjak sampai tegak setinggi 30 – 120 cm. Daun satu tangkai (petiol) berdaun tiga (trifoliat), panjang 5 – 15 mm, berbulu pada permukaan bawah, tangkai daun berbulu, bunga berbentuk tandan yang rapat berisi 10 – 35 bunga, mahkota bunga berwarna ungu atau biru jarang yang berwarna putih (Mannetje dan Jones, 2000). Menurut Hoy, dkk. (2002) alfalfa termasuk tanaman leguminosa yang biasa tumbuh di daerah *temperate* (sedang) dan berumur 8 - 10 tahun tergantung kondisi iklim dan lingkungan pertumbuhan tanaman. Bunga dan morfologi tanaman alfalfa terlihat seperti yang disajikan dalam Gambar 2 dan 3 di bawah ini.



Menurut Subantoro (2009), pertumbuhan tanaman alfalfa dipengaruhi oleh berbagai faktor, antara lain:

a. Iklim

Tanaman alfalfa merupakan jenis tanaman sub-tropis sehingga bila dibudidayakan di daerah tropik perlu adaptasi serta perlakuan khusus. Tanaman alfalfa yang berkembang di Indonesia dapat tumbuh optimal pada ketinggian kurang dari 100 mdpl. Hal itu menunjukkan bahwa tanaman alfalfa dapat tumbuh dengan baik pada dataran rendah dengan temperatur yang lebih tinggi. Intensitas cahaya optimal diperlukan oleh tanaman alfalfa untuk mengimbangi kandungan klorofil empat kali lipat daripada tanaman sayuran (Subantoro, 2009).

Unsur iklim merupakan faktor penentu dalam budidaya tanaman. Tanaman alfalfa merupakan jenis tanaman sub-tropis sehingga bila dibudidayakan di daerah tropik perlu adaptasi serta perlakuan khusus. Adapun data mengenai karakteristik tanaman alfalfa yang tahan terhadap musim kemarau di Grati (Jawa Timur) sebagai berikut :

Tabel 4. Karakter tanaman alfalfa yang tahan musim kemarau

Umur	Hasil Hijauan (kg/ha)	Uraian (Musim)
49 hari	1.500	Musim hujan
24 hari (<i>regrowth</i>)	2.100	Musim hujan
28 hari (<i>regrowth</i>)	2.000	Hujan berkurang
30 hari (<i>regrowth</i>)	2.540	Mulai musim kemarau
33 hari (<i>regrowth</i>)	3.571	Musim kemarau
36 hari (<i>regrowth</i>)	4.077	Musim kemarau hebat
Tanaman hidup terus		

Sumber: Subantoro (2009)

Data tersebut menunjukkan bahwa tanaman alfalfa mempunyai daya adaptasi yang luas terhadap perubahan musim, serta menghasilkan hijauan yang optimal pada musim kemarau. Tanaman alfalfa merupakan leguminose perrenial yang tahan terhadap invasi *weed*, menahan erosi dan tetap hijau sepanjang tahun baik musim hujan maupun musim kemarau (Subantoro, 2009).

Tanaman alfalfa yang berkembang di Indonesia dapat tumbuh dengan optimal pada ketinggian kurang dari 100 mdpl. Hal itu menunjukkan bahwa tanaman alfalfa dapat tumbuh dengan baik pada dataran rendah dengan temperatur yang lebih tinggi. Hal itu akan mengoptimalkan produksi tanaman melalui efisiensi fotosintesis. Belum ada penelitian yang menjelaskan tentang berapa besar intensitas cahaya yang diperlukan agar diperoleh hasil yang optimal.

Temperatur merupakan faktor penting dalam pertumbuhan bagi tanaman secara umum, maupun pada tanaman alfalfa. Tanaman alfalfa sebagai tanaman sub-tropis mempunyai kemampuan beradaptasi dengan lingkungan dengan temperatur yang relatif tinggi. Alfalfa tumbuh baik pada temperatur antara 15-25⁰C (Peters, 2007).

b. Tanah

Pertumbuhan tanaman alfalfa baik pada jenis tanah grumosol yang bersifat sangat basa dan temperatur rendah. Adapun penyebaran tanah grumosol (vertisols) di Indonesia ada tiga daerah yaitu :

1. Dataran rendah kaki bukit yang berbatasan dengan gunung berapi.

2. Dataran rendah berbatasan dengan cekungan dan bukit-bukit kapur.
3. Dataran aluvial campuran gunung berapi dan bahan batu pasir dari pantai (Subantoro, 2009).

Tanaman alfalfa dapat tetap tumbuh dengan baik pada jenis tanah yang kurang produktif dan tingkat kesuburan yang relatif rendah. Dengan demikian tanaman alfalfa dapat dikembangkan pada daerah-daerah tersebut, sebagai upaya meningkatkan penggunaan lahan tidur yang tidak produktif. Pemanfaatan tanah yang kurang produktif tersebut dalam kurun waktu yang lama mampu meningkatkan produktifitas lahan (Subantoro, 2009).

Tanaman alfalfa memiliki kemampuan mengikat nitrogen (N) dari udara. Nitrogen adalah unsur terpenting dalam pertumbuhan tanaman. Kandungan gas nitrogen (N_2) di udara sebesar 79% namun tidak dapat dimanfaatkan tanaman. Akan tetapi tanaman dapat memanfaatkan nitrogen dari udara bila bersimbiose dengan bakteri tanah rhizobium dan membentuk bintil akar. Nitrogen diambil dalam bentuk N_2 dan diubah menjadi amonium (NH_4) sehingga dapat digunakan tanaman (Evers, 2004).

Alfalfa merupakan tanaman leguminosa yang sangat selektif terhadap *rhizobium*. Tanaman alfalfa termasuk golongan famili Leguminosae atau familia Fabaceae dan ditandai dengan adanya bintil-bintil akar akibat asosiasi dengan bakteri *Rhizobium* sp sehingga mampu memfiksasi nitrogen atmosfer secara efektif (Rao, 1994).

Nitrogen udara yang diikat oleh tanaman alfalfa digunakan untuk tanaman sendiri maupun untuk tanaman kompanionnya. Chapmen dan Myers (1987) dan Russelle (2004) melaporkan bahwa hasil fiksasi nitrogen oleh leguminosa dapat tersedia bagi tanaman yang berada di sekitarnya selama musim pertumbuhan melalui pembusukan akar dan bintil akar merupakan hal penting dalam transfer nitrogen. Pengaruh ini berdampak positif karena dapat mengurangi polusi dengan mengeluarkan nitrogen sesuai dengan kebutuhan tanaman di sekitarnya. Menurut Freeyer (2004), lahan setelah ditanami alfalfa selama 4 tahun kemudian ditanami jagung menjadi lebih efektif dalam penggunaan urea sampai 33%. Hal ini disebabkan alfalfa mampu mengikat N dari udara sebesar 35 kg/ha pada tahun I dan 102 kg N/ha tahun ke II (Ball, 2008).

Kemudian Martensson dan Ljunggren (1984) dan Freeyer (2004) melaporkan N yang dihasilkan alfalfa per m² 7,85 – 10,37 g. Menurut Russelle (2004), sumbangan N dalam tanah sebesar 75 lb N/akre atau setara 84,24 kg N/ha dan setelah 2 – 3 tahun meningkat 130 lb N/akre atau setara 146,01 kg N/ha. Tanaman demikian akan menyuburkan tanah secara alami sehingga akan terpenuhi kebutuhan nitrogen.

Daun tanaman alfalfa banyak mengandung protein dan serat yang tinggi yang sangat cocok digunakan sebagai hijauan bagi ternak ruminansia maupun sebagai suplemen. Kandungan unsur lain yaitu flavonoid terdiri apigenin, glikosida, luteolin dan adenosine yang berfungsi sebagai antiperadangan, antibodi, antiparasit dan antioksidan (Rahmayanti dan

Sitanggang, 2006). Namun senyawa flavonoid dalam jumlah besar dapat bersifat sebagai antinutrisi, sehingga perlu pertimbangan sebelum dikonsumsi. Demikian juga Purwantari, dkk. (2009) melaporkan pada tanaman alfalfa di Indonesia mengandung senyawa fitoestrogen antara lain daidzin, apigenin, coumestrol, dan biochanin.

Fitoestrogen tersebut merupakan senyawa bukan steroid yang ada di dalam tanaman yang berfungsi untuk melindungi diri dari serangan hama (Hughes, 1988). Alfalfa sangat disenangi oleh serangga dan hama. Telah ditemukan lebih dari 17 spesies, yang menyerang alfalfa sehingga dari sejak tumbuh hingga tanaman menjelang panen (Randolph dan Garner, 1997). Akibat serangan hama, di AS pernah dilaporkan kehilangan hasil hijauan yang mencapai 6 ton bahan kering per ha (Aldryhin, 1994). Kemudian di Bogor juga dilaporkan bahwa serangan hama tersebut menurunkan produksi hijauan alfalfa sebesar 56,8%. Selain hama, alfalfa juga terserang penyakit seperti virus mosaik dan serangan virus ini menurunkan produktivitas hijauan (Yardiminci, dkk., 2007).

Hasil penelitian di luar negeri telah berhasil membuktikan berbagai zat yang terkandung didalam tanaman alfalfa tersebut. Daun tanaman alfalfa banyak mengandung saponin, coumestrol, vitamin, mineral, dan antioksidan. Kandungan protein dan serat yang tinggi sangat cocok digunakan sebagai hijauan bagi ternak sapi atau ruminansia, bahkan juga baik bagi manusia (Laila, 2005 dalam Parman, 2007). Tanaman alfalfa menurut Stochmal dkk. (2001) mengandung sembilan macam flavonoid, apigenin, glikosida luteolin

dan adenosine. Salah satu pemanfaatan alfalfa, diantaranya dapat diolah menjadi minuman suplemen dengan nama *liquid chlorophyll*, *soft capsul*, dan minuman penyegar yang diproduksi oleh beberapa pabrik farmasi yang cukup terkenal di dunia.

Faktor-faktor yang memengaruhi pertumbuhan tanaman, yang secara luas dapat dikategorikan sebagai faktor eksternal (lingkungan) dan internal (genetik), dikelompokkan sebagai berikut:

1. Faktor eksternal

- a. Iklim: cahaya, temperatur, air, panjang hari, angin, dan gas (CO_2 , O_2 , N_2 , SO_2 , F_1 , Cl , dan O_3). Gas-gas ini seringkali merupakan polutan atmosfer (kecuali untuk tiga gas pertama) dan konsentrasinya dapat cukup tinggi untuk menghambat pertumbuhan.
- b. Edafik (tanah): tekstur, struktur, bahan organik, kapasitas pertukaran kation, pH, kejenuhan basa, dan ketersediaan nutrisi.
- c. Biologi: gulma, serangga, organisme penyebab penyakit, nematoda, macam-macam tipe herbivora, dan mikroorganisme tanah, seperti bakteri pemfiksasi N_2 dan bakteri denitrifikasi, serta mikoriza (asosiasi simbiotik antara jamur dengan akar tanaman) (Gardner, dkk., 1991).

2. Faktor internal

- a. Ketahanan terhadap tekanan iklim, tanah, dan biologi
- b. Laju fotosintetik
- c. Respirasi
- d. Pembagian hasil asimilasi dan N

- e. Klorofil, karoten, dan kandungan pigmen lainnya
- f. Tipe dan letak meristem
- g. Kapasitas untuk menyimpan cadangan makanan
- h. Aktivitas enzim
- i. Pengaruh langsung gen (misalnya heterosis, epistasis)
- j. Diferensiasi (Gardner, dkk., 1991).

F. Spektrofotometri Serapan Atom (SSA)

Spektrofotometri Serapan Atom (SSA) atau *Atomic Absorption Spectrophotometer* (AAS) merupakan teknik analisis kuantitatif dari unsur-unsur yang pemakaiannya sangat luas, diberbagai bidang karena prosedurnya selektif, spesifik, biaya analisa relatif murah, sensitif tinggi (ppm-ppb). AAS dapat dengan mudah membuat matriks yang sesuai dengan standar, waktu analisa sangat cepat dan mudah dilakukan. Analisis AAS pada umumnya digunakan untuk analisis unsur. Teknik AAS menjadi alat yang canggih dalam analisis, disebabkan karena sebelum pengukuran tidak selalu memerlukan pemisahan unsur yang ditentukan karena kemungkinan penentuan satu logam unsur dengan kehadiran unsur lain dapat dilakukan, asalkan katoda berongga yang diperlukan tersedia. AAS dapat digunakan untuk mengukur logam sebanyak 61 logam. Metode AAS berprinsip pada absorpsi cahaya oleh atom. Atom tersebut akan menyerap cahaya pada panjang gelombang tertentu (Basset, 1994).

Sumber cahaya pada AAS adalah sumber cahaya dari lampu katoda yang berasal dari elemen yang sedang diukur kemudian dilewatkan ke dalam nyala api yang berisi sampel yang telah teratomisasi, kemudian radiasi tersebut diteruskan ke detektor melalui monokromator. *Chopper* digunakan untuk membedakan radiasi yang berasal dari nyala api. Detektor akan menolak arah searah arus (DC) dari emisi nyala dan hanya mengukur arus bolak-balik dari sumber radiasi atau sampel. Atom dari suatu unsur pada keadaan dasar akan dikenai radiasi maka atom tersebut akan menyerap energi dan mengakibatkan elektron pada kulit terluar naik ke tingkat energi yang lebih tinggi atau tereksitasi. Atom-atom dari sampel akan menyerap sebagian sinar yang dipancarkan oleh sumber cahaya. Penyerapan energi cahaya terjadi pada panjang gelombang tertentu sesuai dengan energi yang dibutuhkan oleh atom tersebut (Basset, 1994).

G. Indeks Bioremediasi dan Faktor Transfer

Efektivitas tanaman dalam menyerap logam berat dapat dilihat dengan melakukan pengujian pada medium tanam. Hasil pengujian yang terukur kemudian akan dihitung sebagai indeks bioremediasi. Perhitungan Indeks Bioremediasi (IBR) yang merupakan tingkat penurunan konsentrasi timbal (Pb) pada media tanam dilakukan berdasarkan data hasil perlakuan. Tingkat penurunan konsentrasi logam berat (%) diperoleh dengan membandingkan selisih konsentrasi awal dan akhir dengan konsentrasi awal kemudian dikalikan 100% (Tommy dan Palapa, 2009).

Perpindahan logam berat di lingkungan dinyatakan sebagai faktor transfer. Faktor transfer didefinisikan sebagai perbandingan konsentrasi pada jaringan tanaman atau hewan terhadap konsentrasi pada media. Faktor transfer dapat digunakan untuk mengetahui seberapa besar kemampuan tanaman dalam menyerap bahan logam berat dari dalam tanah atau air. Nilai faktor transfer besarnya bervariasi bergantung pada jenis tanaman dan kondisi hidupnya (Opeolu, 2005).

Dari nilai faktor transfer tersebut dapat dilihat apakah suatu tanaman tertentu dapat digunakan sebagai agen fitoremediator. Nilai faktor transfer lebih besar dari satu (< 20) menandakan bahwa tanaman tersebut mempunyai kemampuan mengakumulasi logam berat yang baik. Nilai faktor transfer sama ≥ 20 menandakan bahwa tanaman tersebut ekonomis dan efektif untuk diaplikasikan sebagai agen fitoremediator karena dapat menghemat biaya pembersihan sampai 95% (Tjahaja, dkk., 2006).

H. Hipotesis

1. Pertumbuhan tanaman alfalfa meliputi pertambahan tinggi, luasan daun, pemanjangan akar, dan berat kering akan terhambat bila menyerap timbal dalam jumlah yang berlebihan.
2. Tanaman alfalfa memiliki potensi meremediasi tanah tercemar logam berat timbal (Pb).