

II. TINJAUAN PUSTAKA

A. Pencemaran Logam Cd (Kadmium)

Menurut Charlena (2004), logam berat dalam tanah pada prinsipnya berada dalam bentuk bebas (mobil) dengan sifat beracun serta dapat terserap tanaman maupun tidak bebas (immobil) yaitu berikatan dengan bahan organik, anorganik, dan hara. Adanya logam berat dapat mempengaruhi ketersediaan hara tanaman serta mengkontaminasi tanaman. Ketika logam berat memasuki lingkungan tanah, maka akan terjadi keseimbangan dalam tanah, kemudian akan terserap oleh tanaman melalui akar, dan selanjutnya akan terdistribusi ke bagian tanaman lainnya (Charlena, 2004).

Logam Kadmium (Cd) bernomor atom 48 dan massa atom 112,41 termasuk dalam logam transisi pada periode V. Logam Cd juga dikenal sebagai unsur *chalcophile*, cenderung ditemukan dalam deposit sulfide (Manahan, 2001). Kemelimpahan Cd pada kerak bumi adalah 0,13 $\mu\text{g/g}$. Pada lingkungan akuatik, Cd relatif bersifat mudah berpindah. Cd memasuki lingkungan akuatik terutama dari deposisi atmosferik dan efluen pabrik yang menggunakan logam ini dalam proses kerjanya. Di perairan umumnya Cd hadir dalam bentuk ion-ionnya yang terhidrasi, garam-garam klorida, terkomplekskan dengan ligan anorganik atau membentuk kompleks dengan ligan organik (Weiner, 2008).

Logam Cd terdapat dalam tanah secara alami dengan kandungan rata-rata rendah yaitu 0,4 mg Cd/kg tanah. Pada tanah yang bebas polusi kandungannya adalah 0,06 – 1,1 mg/kg. Peningkatan kandungan Cd dapat diperoleh dari asap kendaraan bermotor dan pupuk fosfat yang terakumulasi di tanah. Ion logam berat

(Cd²⁺) merupakan bentuk yang dapat diserap oleh tanaman diantara unsur mineral penting yang dibutuhkan tanaman. Pada umumnya tanaman menyerap hanya sedikit (1-5%) larutan Cd yang ditambahkan ke dalam tanah. Akumulasi dalam jangka waktu yang lama dapat meningkatkan kandungan Cd dalam tanah dan tanaman yang sedang tumbuh. Sayuran mengakumulasi Cd lebih banyak dibandingkan tanaman pangan yang lain (Charlena, 2004).

Penyerapan Cd dari tanah oleh tanaman dipengaruhi oleh total pemasukan Cd dalam tanah, pH tanah, kandungan Zn, jenis tanaman dan kultivar. Penyerapan Cd akan tinggi pada pH rendah dan menurun pada pH tinggi. Kandungan seng (Zn) yang tinggi dapat mengurangi penyerapan Cd. Jika Cd telah memasuki rantai makanan, maka pada akhirnya akan terakumulasi pada konsumen tingkat tinggi yaitu hewan dan manusia (Subowo dkk., 1999).

Kadmium sangat membahayakan kesehatan karena pengaruh racun akut dari unsur tersebut sangat buruk dapat mempengaruhi system saraf dan system ginjal manusia. Di antara penderita yang keracunan kadmium mengalami tekanan darah tinggi, kerusakan ginjal, kerusakan jaringan testicular, dan kerusakan sel-sel jaringan darah merah. Di Jepang kontaminasi Cd pada beras yang berasal dari lahan sawah yang lama mengalami kekeringan telah menimbulkan penyakit itai-itai dengan gejala nyeri pada pinggang dan otot kaki (Subowo dkk., 1999).

Pengaruh Cd terhadap tumbuhan adalah dapat membuat tumbuhan menjadi klorosis dan nekrosis bahkan bisa membuat mati tumbuhan tersebut yang keracunan logam Cd (Sun dkk., 2009). Logam Cd juga berpengaruh terhadap proses fotosintesis sehingga akan membawa dampak buruk terhadap pertumbuhan

dari tumbuhan tersebut (Olivares, 2003). Gejala keracunan lain yang ditunjukkan oleh tumbuhan adalah tanaman terlihat tidak sehat, layu, akar menghitam, dan daun menguning (Astrini dkk., 2014).

B. Fitoremediasi

Saat ini telah dikembangkan metode adsorpsi logam berat menggunakan biomassa tumbuhan, dikenal sebagai metode fitoremediasi (Nur, 2013). Penelitian yang telah dilakukan diperoleh informasi tentang adanya kemampuan tumbuhan dalam mengikat logam dan mengakumulasi dalam jaringan tumbuhan, baik secara aktif melalui metabolisme tumbuhan maupun secara pasif dengan mengikat logam dengan gugus fungsional dalam jaringan tumbuhan (Gardea-Torresdey, dkk. 1998).

Ide dasar bahwa tumbuhan dapat digunakan untuk remediasi lingkungan sudah dimulai dari tahun 1970-an. Seorang ahli geobotani di Caledonia menemukan tumbuhan *Sebertia acuminata* yang dapat mengakumulasi hingga 20% Ni dalam tajuknya (Brown, 1995) dan pada tahun 1980-an beberapa penelitian mengenai akumulasi logam berat oleh tumbuhan sudah mengarah pada realisasi penggunaan tumbuhan untuk membersihkan polutan (Salt 2000).

Fitoremediasi didefinisikan sebagai “pencucian” polutan yang dimediasi oleh tumbuhan, termasuk pohon, rumput-rumputan, dan tumbuhan air. “Pencucian” bisa berarti penghancuran, inaktivasi atau immobilisasi polutan ke bentuk yang tidak berbahaya (Chaney, 1995). Fitoremediasi adalah upaya penggunaan tanaman dan bagian-bagiannya untuk dekontaminasi limbah dan masalah-masalah pencemaran lingkungan baik secara *ex-situ* menggunakan kolam

buatan atau reaktor maupun *in-situ* atau secara langsung di lapangan pada tanah atau daerah yang terkontaminasi limbah (Subroto, 1996).

Menurut Priyanto dan Prayitno (2007) dalam Hardiani (2009) mekanisme penyerapan dan akumulasi logam berat oleh tanaman dapat dibagi menjadi tiga proses yang sinambung, sebagai berikut :

1. Penyerapan oleh akar. Agar tanaman dapat menyerap logam, maka logam harus dibawa ke dalam larutan di sekitar akar (rizosfer) dengan beberapa cara bergantung pada spesies tanaman. Senyawa-senyawa yang larut dalam air biasanya diambil oleh akar bersama air, sedangkan senyawa-senyawa hidrofobik diserap oleh permukaan akar.
2. Translokasi logam dari akar ke bagian tanaman lain. Setelah logam menembus endodermis akar, logam atau senyawa asing lain mengikuti aliran transpirasi ke bagian atas tanaman melalui jaringan pengangkut (xilem dan floem) ke bagian tanaman lainnya.
3. Lokalisasi logam pada sel dan jaringan. Hal ini bertujuan untuk menjaga agar logam tidak menghambat metabolisme tanaman. Sebagai upaya untuk mencegah peracunan logam terhadap sel, tanaman mempunyai mekanisme detoksifikasi, misalnya dengan menimbun logam di dalam organ tertentu seperti akar.

Gugus fungsi dalam jaringan tanaman yang berfungsi sebagai pengikat logam adalah gugus amina ($-NH_2$), gugus karboksil ($-COOH$), juga gugus sulfidril ($-SH$) yang terdapat dalam protein (Mohamad, 2012). Disamping itu dalam jaringan tanaman terdapat dinding sel yang tersusun atas selulosa, lignin dengan

gugus hidroksil (-OH). Gugus-gugus polar ini diduga bereaksi dengan logam berat . Penyerapan kontaminan bersamaan dengan penyerapan nutrisi dan air oleh akar tumbuhan dan translokasi atau akumulasi senyawa itu ke bagian tumbuhan seperti akar, batang dan daun (Yang, dkk. 2005).

Secara alami tumbuhan memiliki beberapa keunggulan dalam meremediasi lingkungan tercemar jika dibanding dengan teknologi remediasi lainnya baik secara kimia maupun fisik, yaitu (Feller, 2000) :

1. Beberapa famili tumbuhan memiliki sifat toleran dan hiperakumulator terhadap logam berat
2. Banyak jenis tumbuhan dapat merombak polutan
3. Pelepasan tumbuhan yang telah dimodifikasi secara genetik ke dalam suatu lingkungan relatif lebih dapat dikontrol dibandingkan dengan mikroba
4. Tumbuhan memberikan nilai estetika
5. 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
6. Dengan kemampuan fotosintesis, tumbuhan dapat menghasilkan energi yang dapat dicurahkan selama proses detoksifikasi polutan
7. Asosiasi tumbuhan dengan mikroba memberikan banyak nilai tambah dalam memperbaiki kesuburan tanah.

Semua tumbuhan memiliki kemampuan menyerap logam tetapi dalam jumlah yang bervariasi. Sejumlah tumbuhan dari banyak famili terbukti memiliki sifat hipertoleran karena memiliki perakaran yang mampu menyerap logam serta

mampu mengakumulasi logam dengan konsentrasi tinggi pada jaringan akar dan tajuknya, sehingga bersifat hiperakumulator (Hidayati, 2005). 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 (McGrath dkk., 1997):

1. 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 sekali sehingga menjadikan penyerapan logam oleh tumbuhan hiperakumulator melebihi tumbuhan normal
2. 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.
3. Sistem translokasi unsur dari akar ke tajuk pada tumbuhan hiperakumulator lebih efisien dibandingkan tanaman normal. Hal ini dibuktikan oleh rasio konsentrasi logam tajuk/akar pada tumbuhan hiperakumulator lebih dari satu.

Karakteristik tumbuhan hiperakumulator adalah:

- a. Tahan terhadap unsur logam dalam konsentrasi tinggi pada jaringan akar dan tajuk
- b. Tingkat laju penyerapan unsur dari tanah yang tinggi dibanding tanaman lain
- c. Memiliki kemampuan mentranslokasi dan mengakumulasi unsur logam dari akar ke tajuk dengan laju yang tinggi. Pada kondisi normal konsentrasi Zn, Cd, atau Ni pada akar adalah 10 kali lebih tinggi dibanding konsentrasi pada tajuk, tetapi pada tumbuhan hiperakumulator, konsentrasi logam pada tajuk melebihi tingkat konsentrasi pada akar (Brown, 1995).
- d. Secara ideal memiliki potensi produksi biomassa yang tinggi (Reeves, 1992).

Menurut Corseuil dan Moreno (2000), mekanisme tumbuhan dalam menghadapi bahan pencemar beracun adalah :

1. Penghindaran (*escape*) fenologis. Apabila pengaruh yang terjadi pada tanaman musiman, tanaman dapat menyelesaikan daur hidupnya pada musim yang cocok.
2. Eksklusi, yaitu tanaman dapat mengenal ion yang bersifat toksik dan mencegah penyerapan sehingga tidak mengalami keracunan.
3. Penanggulangan (*ameliorasi*). Tanaman mengabsorpsi ion tersebut, tetapi berusaha meminimumkan pengaruhnya. Jenisnya meliputi pembentukan khelat (*chelation*), pengenceran, lokalisasi atau bahkan ekskresi.
4. Toleransi. Tanaman dapat mengembangkan sistem metabolit yang dapat berfungsi pada konsentrasi toksik tertentu dengan bantuan enzim.

Mekanisme penyerapan dan akumulasi logam berat oleh tumbuhan dapat dibagi menjadi tiga proses yang sinambung, yaitu penyerapan logam oleh akar, translokasi logam dari akar ke bagian tumbuhan lain, dan lokalisasi logam pada bagian sel tertentu untuk menjaga agar tidak menghambat metabolisme tumbuhan tersebut (Connel dan Miller, 1995). Pembentukan reduktase di membran akar berfungsi mereduksi logam yang selanjutnya diangkut melalui kanal khusus di dalam membran akar. Setelah logam dibawa masuk ke dalam sel akar, selanjutnya logam harus diangkut melalui jaringan pengangkut, yaitu xilem dan floem ke bagian tumbuhan lain oleh molekul khelat. Berbagai molekul khelat yang berfungsi mengikat logam dihasilkan oleh tumbuhan, misalnya histidin yang terikat pada Ni dan fitokhela-tin-glutation yang terikat pada Cd (Salt dkk., 1998).

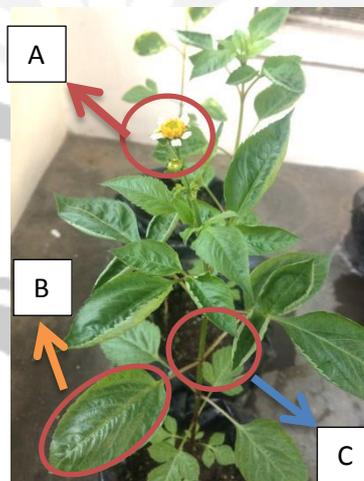
Proses penguraian logam menurut Mangkoedihardjo dan Samudro (2010) adalah tiga tahap fitoproses yang berlangsung dalam tumbuhan yaitu sebagai berikut:

1. Fitoekstraksi : proses penyerapan kontaminan dari medium tumbuhnya. Kontaminan terserap tumbuhan selanjutnya terdistribusi ke dalam berbagai organ tumbuhan (translokasi).
2. Fitodegradasi : penguraian kontaminan yang terserap melalui proses metabolik dalam tumbuhan.
3. Fitovolatilisasi : proses pelepasan kontaminan ke udara setelah terserap tumbuhan

C. Ketul (*Bidens pilosa L.*)

Bunga ketul (*Bidens pilosa* L.) merupakan bunga terna semusim (herba) dengan tinggi mencapai 1 m. Deskripsi bunga ketul adalah sebagai berikut (Syah dkk., 2014) :

1. Bunga pita berjumlah 4-6
2. Mahkota berwarna kuning yang merupakan hemaprodit serta menyatu dengan buah keras di bawahnya dan bunga tabung yang begitu banyak keluar dari tengah bunga pita dengan kepala sari menjulur keluar berwarna coklat dan putik yang bagian tepinya bergerigi
3. Bunga terletak diujung tangkai bunga dan di ketiak daun
4. Buah keras berwarna hitam kecoklatan dengan gerigi disekitar permukaannya dengan jumlah duri 2-3 dan bergerigi banyak



Gambar 1. *Bidens pilosa* L.

(Sumber : Dokumentasi pribadi, 2017)

Keterangan gambar : A = Bunga ; B = Daun; C= Batang

Ketul berasal dari Afrika selatan, akan tetapi telah menyebar luas di Jawa sejak sebelum 1835. Kini diketahui tersebar di seluruh daerah tropis dan menjadi tumbuhan pengganggu di banyak negara. Terna ini adalah gulma yang sangat umum dijumpai di Nusantara. Menyukai tanah yang lembab dan sinar matahari

penuh, ketul didapati hingga ketinggian 2.300 m. Tumbuhan ini berbunga sepanjang tahun, dan dalam waktu seminggu (apabila kondisinya sesuai) 35–60% biji (buah) yang terjatuh di tanah akan berkecambah. Daya kecambahnya pun tetap tinggi; setelah 3–5 tahun tersimpan, sekitar 80% biji masih mampu berkecambah (Soerjani dkk., 1987).

Klasifikasi ilmiah *Bidens pilosa* L. (Astuti dkk, 2013)

Kerajaan	: Plantae
Devisi	: Spermatophyta
Sub devisi	: Angiospermae
Kelas	: Dicotyledonae
Bangsa	: Asterales
Suku	: Asteraceae
Genus	: <i>Bidens</i>
Jenis	: <i>Bidens pilosa</i> L.

Bidens pilosa L. termasuk dalam tumbuhan yang berpotensi sebagai hiperakumulator untuk logam berat Cd. Akumulasi logam Cd pada *Bidens pilosa* L. terdapat tahap berbunga dan dewasa. Namun, pengoptimalan *Bidens pilosa* L. sebagai hiperakumulator logam Cd diperlukan dalam penelitian selanjutnya (Sun dkk., 2009).

D. Mikoriza

Fungi mikoriza menjadi kunci dalam memfasilitasi penyerapan unsur hara oleh tumbuhan, peningkatan pertumbuhan dan hasil produk tanaman (Dodd, 2000; Smith dan Read, 2008; Upadhayaya dkk., 2010). Mikoriza meningkatkan pertumbuhan tanaman pada tingkat kesuburan tanah yang rendah, lahan terdegradasi dan hifa FMA membantu memperluas fungsi sistem perakaran dalam memperoleh nutrisi (Galii dkk., 1993; Garg dan Chandel, 2010). Secara khusus, fungi mikoriza berperan penting dalam meningkatkan penyerapan ion dengan

tingkat mobilitas rendah, seperti ion fosfat (PO_4^{3-}) dan amonium (NH_4^+) (Suharno dan Santosa, 2005) dan unsur hara tanah yang relatif immobil lain seperti belerang (S), tembaga (Cu), seng (Zn), dan juga boron (B) (Smith dan Read, 2008).

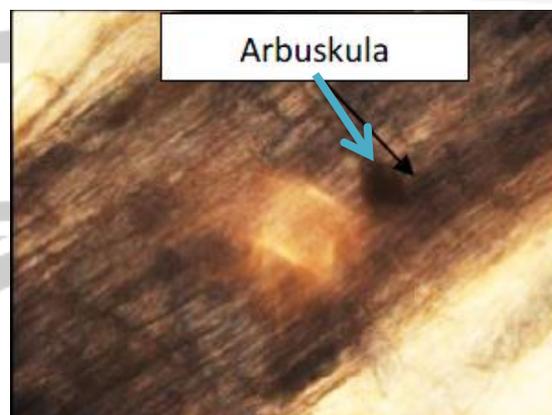
Mikoriza juga meningkatkan luas permukaan kontak dengan tanah, sehingga meningkatkan daerah penyerapan akar hingga 47 kali lipat, yang mempermudah melakukan akses terhadap unsur-unsur di dalam tanah. Mikoriza tidak hanya meningkatkan laju transfer nutrisi di akar tanaman inang, tetapi juga meningkatkan ketahanan terhadap cekaman biotik dan abiotik (Smith dan Read, 2008). Selain itu, mikoriza juga membantu mempertahankan stabilitas pertumbuhan tanaman pada kondisi tercemar (Khan, 2005). Unsur-unsur logam berat seperti Hg, Pb, Cd, As dapat difasilitasi FMA untuk stabilisasi logam dalam proses remediasi sehingga tidak membahayakan secara langsung di lingkungan (Khan, 2006; Suharno dan Sancayaningsih, 2013).

Akar tanaman yang terbungkus oleh mikoriza menyebabkan akar tersebut terhindar dari serangan penyakit dan hama. Infeksi patogen terhambat, di samping itu mikoriza menggunakan semua kelebihan dan eksudat akar lainnya, sehingga tercipta lingkungan yang tidak cocok bagi pertumbuhan pathogen (Marx, 1982). Menurut Anas (1997), mekanisme perlindungan dapat diterangkan sebagai berikut:

1. Adanya selaput hifa (mantel) dapat berfungsi sebagai *barier* masuknya patogen.
2. Mikoriza menggunakan hampir semua kelebihan karbohidrat dan eksudat lainnya, sehingga tercipta lingkungan yang tidak cocok untuk patogen.

3. Cendawan mikoriza dapat mengeluarkan antibiotik yang dapat mematikan patogen
4. Akar tanaman yang sudah diinfeksi cendawan mikoriza, tidak dapat diinfeksi oleh cendawan patogen yang menunjukkan adanya kompetisi.

Tiga komponen penting dalam sistem akar bermikoriza itu adalah perannya terhadap akar itu sendiri, hifa internal yang berhubungan dengan akar, dan hifa eksternal yang berhubungan dengan tanah. Menurut Brundrett (1991) serta Smith dan Read (2008) struktur terpenting dalam sistem simbiosis dengan akar tumbuhan adalah arbuskula di dalam akar. Arbuskula (Gambar 2) merupakan struktur yang dibentuk oleh hifa internal dan menghubungkan fungi dengan sel korteks akar. Struktur inilah yang berperan dalam lalu lintas unsur hara dari fungi ke tumbuhan maupun sebaliknya.



Gambar 2. Struktur Arbuskula
(Sumber : Suamba dkk., 2014)

Keterangan : Struktur arbuskula berwarna gelap dan menggumpal

Cara mikoriza menyerap logam yang ada dalam tanah adalah dengan mengikat ion-ion logam dalam dinding sel hifanya dan dapat melindungi tanaman dari ion-ion logam tersebut. Logam berat disimpan dalam crystalloid di dalam miselium jamur dan pada sel-sel korteks akar tanaman bermikoriza (Lakitan,

2001). Logam berat diserap oleh akar tumbuhan dalam bentuk ion-ion yang larut dalam air seperti unsur hara yang ikut masuk bersama aliran air (Arisusanti dan Purwani, 2013).

Menurut Sukmawaty dkk. (2016), identifikasi mikoriza yang bersimbiosis dengan akar dapat dilihat dan diketahui melalui pengamatan morfologi akar yaitu bentuk akar dan keberadaan akar halus, karakteristik spora, dan struktur simbiosis yang terjadi antara fungi dan akar. Struktur simbiosis yang paling sering dijumpai adalah struktur arbuskula dan vesikula. Arbuskula adalah struktur simbiosis yang jika diamati di mikroskop akan terlihat berwarna gelap dan menggumpal, sedangkan untuk vesikula akan terlihat berbentuk bulat dan berwarna biru karena struktur ini menyerap larutan pewarna *Lactophenol blue*.



Gambar 3. Struktur Mikoriza Arbuskula Pada Akar
(Sumber : Suamba dkk., 2014)

E. EDTA

Penggunaan pengkelat sintetis untuk optimalisasi fitoremediasi telah dieksplorasi oleh banyak peneliti (Opeolu, 2005; Chen dan Cutright, 2002; Lim dkk., 2005; Fodor dkk., 2003). Logam yang larut dalam pengkelat dengan membentuk ikatan ligan logam, dapat membebaskan logam dari partikel tanah

atau meningkatkan mobilitas mereka di dalam sistem biologi tanaman. EDTA adalah kelat yang umumnya dipilih dalam penelitian karena telah terbukti efektivitasnya pada aplikasi fitoremediasi (Le Duc dan Terry., 2005; Madrid dkk., 2003).

Khelat meningkatkan mobilitas logam di dalam tanah melalui membran akar tanaman dan membantu dalam translokasi logam dari akar ke nonakar (batang dan daun) (Zhuang dkk., 2005). Dua fungsi utama EDTA dalam peningkatan fitoremediasi adalah menyerap logam dari tanah yang mengandung logam, meningkatkan bioavailabilitas dan pembentukan kompleks kelat-logam yang tidak akan terikat erat dengan dinding sel akar tanaman (Chen dan Cutright, 2002 dalam Mohamad, 2012). Zhuang dkk., (2005) menunjukkan bahwa dengan EDTA 19 kali, 2 kali dan 13 kali lebih besar dalam meningkatkan fitoekstraksi Pb dibandingkan tanpa penambahan EDTA oleh *Viola baoshanensis*, *Vertiveria zizanioides*, dan hibrida *Rumex patientia* dan *timshmicus*.

EDTA meningkatkan mobilitas logam dan dapat menyebabkan kontaminan bermigrasi keluar dari rhizosphere yang menyebabkan terkontaminasi terhadap area menjadi lebih besar. Madrid dkk., (2003) menunjukkan bahwa tanpa EDTA, konsentrasi Cu, Fe, Mn, Zn, Cd, Ni dan Pb pada lindi dari tanah berada di bawah batas deteksi(batas ambang batas). Adanya penambahan EDTA, semua logam kecuali Cu secara efektif dimobilisasi. EDTA membentuk ikatan dengan kestabilan tinggi pada beberapa logam termasuk Cu, Fe, Pb dan Zn di mana menunjukkan bahwa kehadirannya di tanah dan air tanah dapat dilihat setelah fitoremediasi selesai (Lombi, dkk., 2001).

F. Hipotesis

1. Penambahan mikoriza dan EDTA serta kombinasi keduanya mampu memberikan hasil yang berbeda dalam total akumulasi logam kadmium pada tumbuhan ketul (*Bidens pilosa L.*)
2. Perlakuan kombinasi (mikoriza + EDTA) memiliki efektivitas yang lebih baik dalam menyerap logam kadmium dalam tanah dibandingkan perlakuan penambahan mikoriza dan penambahan EDTA saja.

