

## **BAB II**

### **TINJAUAN PUSTAKA**

#### **2.1 Tumbuhan Hiperakumulator dan Hipertoleransi**

Hiperakumulator adalah tanaman yang dapat menyerap logam berat sekitar 1% dari berat keringnya (Fahrudin, 2010). 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 *et al.* 1995 dalam Hidayati, 2005).

Sifat hiperakumulator berarti dapat mengakumulasi unsur logam tertentu dengan konsentrasi tinggi pada tajuknya dan dapat digunakan untuk tujuan fitoekstraksi. Mengacu pada hukum toleransi Shelford yang menyatakan bahwa kehadiran dan keberhasilan suatu organisme tergantung kepada suatu faktor yang terdapat di lingkungan. Distribusi spesies akan dikontrol oleh faktor lingkungan yang berada pada kisaran toleransi sempit. Artinya, masing-masing organisme mempunyai batas toleransi terhadap suatu faktor yang ada di lingkungan untuk saling berkompetisi dan bertahan hidup (Leksono, 2007).

Tumbuhan hiperakumulator merupakan tumbuhan yang dapat digunakan dalam proses fitoremediasi. Fitoremediasi merupakan salah satu cara pembersihan polutan menggunakan tumbuhan, umumnya terdefinisi seperti pembersihan dari toksin atau kontaminan dari lingkungan dengan menggunakan tumbuhan *hyperaccumulator*. Fitoremediasi berasal dari dua kata yaitu *Phyto* dalam bahasa Yunani yang berarti tumbuhan/tanaman dan *remediare* yang berasal dari bahasa latin yaitu memperbaiki atau membersihkan sesuatu. Jadi fitoremediasi (phytoremediation) merupakan suatu sistem dimana tanaman dapat mengubah zat kontaminan (pencemar/polutan) menjadi berkurang atau tidak berbahaya bahkan menjadi bahan yang dapat digunakan kembali. (Irawanto, 2010).

Fitoremediasi merupakan salah satu metode remediasi dengan mengandalkan peran tumbuhan untuk menyerap, mendegradasi, mentransformasi dan mengimobilisasi bahan pencemar logam berat atau polutan. Tanaman mempunyai toleransi terhadap logam berat yang bersifat esensial untuk pertumbuhan dan perkembangan (Hardiani, 2009). Tanaman yang mempunyai kemampuan menyerap logam berat melalui akar dan mengakumulasinya dalam berbagai organnya, dikenal sebagai tanaman hiperakumulator. Jenis tanaman ini sangat terbatas. Beberapa peneliti mengusulkan selain tanaman hiperakumulator, jenis tanaman hipertoleransi yang mempunyai biomassa tinggi bisa juga digunakan sebagai tanaman alternatif dalam fitoremediasi (Ebbs, 1998 dalam Hardiani, 2008).

Mekanisme penyerapan dan akumulasi logam berat oleh tanaman dapat dibagi menjadi tiga proses yang sinambung (Hardiani, 2009), 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.

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. Translokasi ini merupakan komponen yang harus diperhatikan dalam penentuan tumbuhan hiperakumulator (Agunbiade, 2009 dalam Hidayat, 2011).

Menurut Lasat (2003) dalam Hardiani (2008), menyatakan bahwa untuk acuan tanaman yang bersifat hiperakumulator adalah tanaman yang dapat menyerap logam berat, sebagai berikut:

1. Dapat mengakumulasi logam merkuri (Hg) sebesar 10 mg/kg berat kering.
2. Dapat mengakumulasi logam kadmium (Cd) sebesar 100 mg/kg berat kering.
3. Dapat mengakumulasi logam kobal (Co), kromium (Cr), tembaga (Cu), dan timbal (Pb) sebesar 1000 mg/kg berat kering.
4. Dapat mengakumulasi logam nikel (Ni) dan seng (Zn) sebesar 10000 mg/kg berat kering.

Beberapa jenis tumbuhan yang diketahui mampu mengakumulasi merkuri dalam jumlah yang lebih tinggi dibandingkan jenis lainnya. Sebagai contoh, *Paspalum conjugatum* diketahui mampu mengakumulasi 47 Hg/kg bobot kering, *Cyperus Monocephala* 13,05 Hg/kg, *Ipomea batatas* 18,57-22,57 mg Hg/kg, *Zingiber sp* 49,33 mg Hg/kg, *Caladium* 9,12 mg Hg/kg *Digitaria radicata* 50,93 mg Hg/kg, *Commelia nuda* 30,37 mg Hg/kg dan *Lindernia crustacea* mampu mengakumulasi hingga 89,13 mg Hg/kg. Potensi daya adaptasi dan daya serap terhadap merkuri dari beberapa jenis tumbuhan tersebut sangat signifikan (Juhaeti dkk, 2009)

Mekanisme toleransi yang penting pada tumbuhan adalah logam diawaracunkan dengan cara dikelat dengan fitokelatin, yakni peptide kecil yang kaya akan asam amino sistein yang mengandung belerang. Atom belerang dalam sistein hampir dipastikan penting untuk mengikat logam tersebut, namun diduga

atom nitrogen atau oksigen turut berperan pula. Fitokelatin dihasilkan oleh banyak spesies, tetapi sejauh ini diketahui bahwa fitokelatin hanya dijumpai bila terdapat logam dalam jumlah yang meracuni. Pembentukan fitokelatin merupakan respons tumbuhan untuk beradaptasi terhadap keadaan lingkungan yang rawan (Gekeler dkk, 1989 dalam Safitri, 2008).

### **2.1.1 Persyaratan Tumbuhan Untuk Digolongkan Sebagai Hiperakumulator**

Suatu jenis tumbuhan dikategorikan sebagai species hiperakumulator ketika memenuhi persyaratan sebagai berikut:

1. Bersifat toleran terhadap kandungan logam yang tinggi sehingga pertumbuhan akar dan pucuk tidak mengalami hambatan. Tanaman yang toleran tidak akan terganggu pertumbuhannya walaupun tumbuh pada tanah dengan toksisitas yang tinggi. Toleransi ini diduga berasal dari kemampuan tanaman untuk menyimpan logam dalam vakuola sel atau mampu mengkelat logam-logam (Chaney *et al.*, 1997 dalam Widyati, 2011).
2. Mampu menyerap logam (*uptake*) yang terdapat dalam larutan tanah dengan cepat. Kecepatan *uptake* ditentukan oleh jenis tumbuhan dan macam logam yang di-*uptake*. Mampu mentranslokasikan suatu unsur logam dari akar ke bagian pucuk tanaman dengan kecepatan tinggi. (Chaney *et al.*, 1997 dalam Widyati, 2011).
3. Mampu mentranslokasikan suatu unsur logam dari akar ke bagian pucuk tanaman dengan kecepatan tinggi. (Chaney *et al.*, 1997 dalam Widyati, 2011).

4. Harus mampu menghasilkan biomasa yang tinggi dalam waktu yang cepat (cepat tumbuh), mudah dibudidayakan dan mudah dipanen. (Peer *et al.*, 2008 dalam Widyati, 2011).

### **2.1.2 Tumbuhan Yang Berpotensi Sebagai Hiperakumulator**

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.

Famili yang paling banyak dijumpai sebagai hiperakumulator adalah Brassicaceae, spesies dari famili ini mampu mengakumulasi lebih dari satu jenis logam. Salah satu contoh adalah *Brassica juncea* mampu mengakumulasi Se, As, Cd, Cu, Hg dan Zn. *Thlaspi caerulescens* merupakan akumulator Cd sedangkan *Alyssum* sp merupakan akumulator dari Ni. Contoh lainnya, *Pistia stratiotes* dapat mengakumulasi Ag, Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb dan Zn dengan konsentrasi mencapai 5 mM per kg biomas. Tumbuhan *Pistia stratiotes* mengakumulasi logam pada jaringan akar. Tembakau (*Nicotiana tabaccum*) juga dikenal mempunyai kemampuan untuk mengakumulasi Hg.

Beberapa jenis tumbuhan paku seperti *Pteris vittata* dapat mengakumulasi As. Jenis *Pteris* yang lain misalnya *Pteris cretica*, *Pteris longifolia* dan *Pteris umbrosa* juga mampu mengakumulasi As. Tumbuhan paku air *Azolla caroliniana* (Azollaceae) dapat digunakan untuk membersihkan

Hg dan Cr dalam air dan mengakumulasi dalam jaringan sehingga dapat dimanfaatkan sebagai pemurni air (Gratao *et al.*, 2005 dalam Widyati, 2011).

## 2.2 Merkuri

Merkuri, memiliki nama kima hydragyum yang diberi simbol (Hg) yang berarti "perak cair" (liquid silver) merupakan jenis logam sangat berat yang berbentuk cair pada temperatur kamar, berwarna putih keperakan, memiliki sifat sebagai berikut (Sismanto dkk, 2007) :

1. Berwujud cair pada temperatur kamar. Zat cair ini sangat mudah menguap (tekanan gas/uapnya adalah 0,0018 mm Hg pada 25°C)
2. Terjadi pemuaian secara menyeluruh pada temperatur 396°C
3. Merupakan logam yang paling mudah menguap
4. Logam yang sangat baik untuk menghantar listrik
5. Dapat melarutkan berbagai logam untuk membentuk alloy yang disebut juga amalgam
6. Merupakan unsur yang sangat beracun bagi hewan dan manusia.

Sumber pajanan Hg menurut (ATSDR, 1999 dalam Inwiasri, 2008) adalah sebagai berikut:

1. Uap dan fungisida dan obat-obatan seperti obat cacing, tambal gigi, pencahar, krem pemutih, antiseptik atau disinfektan.
2. Pekerja pada pabrik baterai, alat listrik, lampu merkuri, termometer, obat-obatan yang mengandung Hg.
3. Sumber Hg lain adalah Hg metal dan bahan tambal gigi. Biasanya bahan tambal gigi tersebut mengandung 50% Hg metal, 35% perak, 9% tin, 6%

Cu dan sedikit Zn, Selain itu dokter gigi dan asistennya dapat terpajan oleh uap Hg.

4. Beberapa orang terpajan Hg dengan kadar yang tinggi melalui rantai makanan yang utama adalah dari makan ikan dan kerang yang terkontaminasi oleh Hg.
5. Kegiatan tambang emas juga merupakan sumber pajanan Hg amalgam.

### **2.2.1 Karakteristik dan Sifat Merkuri**

Merkuri membeku pada temperatur  $-38.9\text{ }^{\circ}\text{C}$  dan mendidih pada temperatur  $357\text{ }^{\circ}\text{C}$  (Stwertka, 1998 dalam Setiabudi 2005). Dengan karakteristik ini, merkuri sering dimanfaatkan untuk berbagai peralatan ilmiah, seperti termometer, barometer, termostat, lampu fluorescent, obat-obatan, insektisida, dsb. Sifat penting merkuri lainnya yaitu memiliki kemampuan untuk melarutkan logam lain dan membentuk logam paduan (alloy) yang dikenal sebagai amalgam. Emas dan perak adalah logam yang dapat terlarut dengan merkuri, sehingga merkuri dipakai untuk mengikat emas dalam proses pengolahan bijih sulfida mengandung emas (proses amalgamasi). Amalgam merkuri-emas dipanaskan sehingga merkuri menguap meninggalkan logam emas dan campurannya. (Setiabudi, 2005)

Merkuri berada di lingkungan secara alamiah dan berada dalam beberapa bentuk yang pada prinsipnya dapat dibagi menjadi 3 bentuk utama yaitu (Inswiasri, 2008):

1. Merkuri metal ( $\text{Hg}^0$ ) merupakan logam berwarna putih, berkilau dan pada suhu kamar berada dalam bentuk cairan. Pada suhu kamar akan menguap



dan membentuk uap merkuri yang tidak berwarna dan tidak berbau. Makin tinggi suhu, makin banyak yang menguap.

2. Senyawa merkuri anorganik terjadi ketika merkuri dikombinasikan dengan elemen lain seperti klorin (Cl), sulfur atau oksigen. Senyawa-senyawa ini biasa disebut garam-garam merkuri. Senyawa merkuri anorganik berbentuk bubuk putih atau kristal, kecuali merkuri sulfida (HgS) yang biasa disebut Chinabar adalah berwarna merah dan akan menjadi hitam setelah terkena sinar matahari.
3. Senyawa merkuri organik terjadi ketika merkuri bertemu dengan karbon atau organomerkuri. Banyak jenis organomerkuri, tetapi yang paling populer adalah metilmerkuri (dikenal dengan monometilmercuri)  $\text{CH}_3\text{-Hg-COOH}$ .

### 2.2.2 Kegunaan Merkuri

Merkuri digunakan dalam berbagai bidang (Lestaris, 2010), yaitu:

a. Bidang Kedokteran

Logam merkuri digunakan untuk campuran penambal gigi, kosmetik, penyakit diuretik.

b. Bidang Pertanian

Digunakan sebagai fungisida. Contohnya, senyawa *metil merkuri disiano diamida* ( $\text{CH}_3\text{-Hg-NH-CH}_2\text{NHCN}$ ), *metil merkuri siano* ( $\text{CH}_3\text{-Hg-CN}$ ), *metil merkuri asetat* ( $\text{CH}_3\text{-Hg-CH}_2\text{-COOH}$ ), dan senyawa *etil merkuri klorida* ( $\text{C}_2\text{H}_5\text{-Hg-Cl}$ ).

c. Bidang Industri

Dalam industri pulp dan kertas banyak digunakan senyawa FMA (fenil merkuri asetat) yang digunakan untuk mencegah pembentukan kapur pada pulp dan kertas basah selama proses penyimpanan. Merkuri juga digunakan dalam industri cat untuk mencegah pertumbuhan jamur sekaligus sebagai komponen pewarna.

d. Bidang Pertambangan

Logam merkuri digunakan untuk membentuk amalgam. Contohnya dalam pertambangan emas, logam merkuri digunakan untuk mengikat dan memurnikan emas.

e. Peralatan Fisika

Merkuri digunakan dalam thermometer, barometer, pengatur tekanan gas dan alat-alat listrik.

### **2.2.3 Toksisitas Merkuri**

Penggunaan merkuri di dalam industri sering menyebabkan pencemaran lingkungan, baik melalui air buangan, maupun melalui sistem ventilasi udara. Merkuri yang dibuang ke sungai, pantai atau badan air disekitar industri tersebut akan mengkontaminasi (bioakumulasi) ikan-ikan dan makhluk air lainnya termasuk ganggang dan tanaman air. Ikan-ikan dan hewan tersebut kemudian dikonsumsi oleh manusia sehingga di dalam jaringan tubuh manusia terpapar merkuri secara terusmenerus. Merkuri di bidang pertanian dapat mencemari tanah-tanah pertanian yang dapat berakibat terhadap hasil-hasil pertanian, terutama sayur-sayuran.

Kadar merkuri yang tinggi pada perairan umumnya diakibatkan oleh buangan industri (*industrial wastes*) dan efek samping dari penggunaan senyawa-senyawa merkuri di bidang pertanian. Merkuri dapat berada dalam bentuk metal, senyawasenyawa anorganik dan senyawa organik. Terdapatnya merkuri di perairan dapat disebabkan oleh dua hal, yaitu pertama oleh kegiatan perindustrian seperti pabrik cat, kertas, peralatan listrik, klorin dan koustik soda, kedua oleh alam itu sendiri melalui proses pelapukan batuan dan meletusnya gunung berapi. Namun, pencemaran merkuri yang disebabkan kegiatan alam pengaruhnya terhadap biologi maupun ekologi tidak signifikan (Khalifah, 2007).

Pada manusia keracunan merkuri mengakibatkan terganggunya fungsi ginjal dan hati. Disamping itu akan mengganggu sistem enzim dan mekanisma sintetik apabila berupa ikatan dengan kelompok sulfur di dalam protein dan enzim. Merkuri (Hg) organik dari jenis metil-merkuri dapat memasuki *placenta* dan merusak janin pada wanita hamil, mengganggu saluran darah ke otak serta menyebabkan kerusakan otak. Tercatat sejumlah kejadian tragis yang disebabkan keracunan merkuri (Hg) di negara-negara Jepang, Guatemala, Irak, dan Pakistan (O'Neill, 1994 dalam Herman, 2006).

Kasus keracunan di Minamata, Jepang adalah pencemaran oleh pembuangan limbah industri mengandung metilmerkuri ke dalam air danau dan menyebabkan tercemarnya ikan didalamnya. Sejumlah bayi menderita kerusakan otak serius, dipercaya dilahirkan oleh para ibu yang telah mengkonsumsi ikan tercemar merkuri. Di Irak, Guatemala, dan Pakistan terjadi kematian ribuan penduduk karena mengkonsumsi biji-bijian yang telah tercemar metil-merkuri

yang berasal dari pembasmi hama serangga. Kasus-kasus tersebut menunjukkan bahwa faktor penyebab keracunan adalah mengkonsumsi makanan yang telah tercemar oleh Hg-organik industri. Ini merupakan penemuan penting bahwa limbah mengandung Hg dari kegiatan industri mungkin juga dapat terjadi pada usaha pertambangan logam; dimana ketika memasuki sistem akuatik dapat diserap oleh organisme di dalamnya, kemudian melalui proses metilasi dalam tubuh organisme berkembang menjadi metil-merkuri yang bersifat racun (Herman, 2006).

Merkuri biasanya masuk ke dalam tubuh manusia lewat pencernaan, baik melalui ikan maupun air. Apabila terjadi akumulasi yang lebih, dapat berakibat pada degenerasi sel-sel saraf di otak kecil yang menguasai kondisi saraf, gangguan pada luas pandang, degenerasi pada sarung selaput saraf dan bagian otak kecil (Widodo, 2008). Unsur ini dapat bercampur dengan enzim di dalam tubuh manusia menyebabkan hilangnya kemampuan enzim untuk bertindak sebagai katalisator untuk fungsi tubuh yang penting (Setiabudi, 2005).

Menurut Palar (1994) dalam Warour (2008) ada beberapa efek yang ditimbulkan oleh merkuri terhadap tubuh antara lain: (1) Semua senyawa merkuri adalah racun bagi tubuh, apabila berada dalam jumlah yang cukup; (2) Senyawa-senyawa merkuri yang berbeda, menunjukkan karakteristik yang berbeda pula dalam daya racun yang dimilikinya, penyebarannya, akumulasi dan waktu retensinya di dalam tubuh; (3) Biotransformasi tertentu yang terjadi dalam suatu tatanan lingkungan, dan atau dalam tubuh organisme hidup yang telah kemasukan merkuri disebabkan oleh perubahan bentuk atas senyawa-senyawa merkuri, dari

satu tipe ke tipe lainnya; (4) Pengaruh utama yang ditimbulkan oleh merkuri di dalam tubuh adalah menghalangi kerja enzim dan merusak selaput dinding (membran) sel. Keadaan itu disebabkan karena kemampuan merkuri dalam membentuk ikatan kuat dengan gugus yang mengandung belerang (sulfur) yang terdapat dalam enzim atau dinding sel; (5) Merkuri dalam tubuh umumnya bersifat permanen.

#### **2.2.4 Ambang Batas Merkuri**

Dari beberapa kasus akibat merkuri, dilaporkan telah melebihi ambang batas yang ditetapkan, antara lain oleh Food and Drug Administration (FDA) menetapkan ambang batas kandungan merkuri maksimum 0,0005 ppm untuk air dan 0,5 ppm untuk makanan, sedangkan World Health Organisation (WHO) menetapkan batasan maksimum yang lebih rendah yaitu 0,0001 ppm untuk air. Jepang, Swiss, Swedia menetapkan ambang batas 1 ppm produk laut yang boleh dikonsumsi, sedangkan pemerintah Jerman dan AS menetapkan 0,5 ppm (mg/kg).

Pemerintah Indonesia memberi batas melalui Baku Mutu Ambient dan Limbah yang ditetapkan oleh pemerintah Republik Indonesia dengan KEK-02/MENKLH/1/1988. Baku mutu air untuk golongan A dan B kandungan merkuri maksimum yang dianjurkan 0,0005 ppm dan maksimum yang diperbolehkan sebesar 0,0001 ppm. Pada air golongan C kadar maksimum yang diperbolehkan sebesar 0,002 ppm, sedangkan golongan D sebesar 0,0005 ppm. Untuk baku mutu air limbah kandungan merkuri yang diijinkan untuk air golongan I sebesar 0,001 ppm, golongan II sebesar 0,002 ppm, golongan III sebesar 0,005 ppm sedangkan golongan IV sebesar 0,001 ppm (Fahrudin, 2010).

