

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 TANAH

Tanah sangat berperan bagi lingkungan kita dalam lima hal yaitu :

- a. Tanah membantu pertumbuhan tanaman tingkat tinggi terutama dalam melengkapi media dan pensuplai unsur hara yang penting bagi seluruh tanaman. Sifat-sifat tanah sering menentukan asal vegetasi sekarang dan secara tidak langsung juga menentukan jumlah dan jenis binatang (termasuk manusia) seperti membantu pertumbuhan vegetasi.
- b. Sifat tanah merupakan faktor utama dalam mengontrol keberadaan air dalam sistem hidrologi. Tanah mempengaruhi kehilangan air, penggunaan air, kontaminasi air, dan penjernihan air.
- c. Fungsi tanah sebagai sistem resiklus alami. Di tanah, hasil buangan dan tubuh mati dari tanaman, binatang, dan manusia didekomposisikan dan membuat unsur hara tersedia bagi penggunaan tanaman yang tumbuh kembali bagi kehidupan generasi berikutnya.
- d. Tanah melengkapi habitat untuk sebagian besar kehidupan organisme, dan sebagian kecil binatang mamalia, reptilia sampai serangga kecil, sampai sejumlah besar sel mikroskopis dan keragaman hayati.
- e. Dalam ekosistem yang dibangun manusia, tanah berperan penting sebagai media keteknikan. Tanah tidak hanya penting sebagai bahan bangunan dalam bentuk pengisi bumi dan bata, tetapi juga melengkapi fondasi untuk pembuatan jalan, lapangan terbang, dan pembangunan rumah (Brady dan Weil, 1999).

Menurut Suripin (2004), ilmu tanah memandang tanah dari dua konsep utama, yaitu :

- (1) sebagai hasil hancuran bio-fisika-kimia, dan (2) sebagai habitat tumbuh-tumbuhan.

Sebagai sumberdaya alam, untuk pertanian, tanah mempunyai dua fungsi utama, yaitu (1) sebagai sumber unsur hara bagi tumbuhan dan (2) sebagai pendukung tanaman, atau matrik tempat akar tumbuhan berjangkar sehingga tumbuhan tetap bisa tumbuh ke atas, dan air tanah tersimpan, dan tempat unsur-unsur hara dan air ditambahkan. Kedua fungsi tersebut dapat menurun atau hilang. Hilangnya atau menurunnya fungsi tanah inilah yang kita sebut kerusakan tanah. Tetapi hilangnya fungsi kedua tidak mudah diperbaharui oleh karena diperlukan waktu yang sangat panjang untuk pembentukan tanah.

Tanah merupakan suatu ekosistem yang mendukung kehidupan makhluk hidup baik flora maupun fauna didalamnya. Sebagai suatu ekosistem, keberadaan makhluk tersebut pada umumnya telah membentuk suatu rangkaian aktivitas yang membentuk siklus atau hubungan saling menguntungkan maupun hubungan dalam rantai makanan, sebagai mangsa dan pemangsa. Aktivitas biologis yang terjadi di tanah, berperan penting dalam transformasi zat anorganik dan biodegradasi zat organik melalui rangkaian proses yang panjang dan kompleks.

2.2 FAUNA TANAH

Menurut Hanafiah (2008), di tanah, berdasarkan fungsinya dalam budidaya pertanian, secara umum terdapat dua golongan jasad hayati tanah, yaitu yang menguntungkan dan yang merugikan. Jasad hayati yang menguntungkan ini, yaitu yang terlibat dalam proses dekomposisi bahan organik dan pengikatan/penyediaan unsur hara, yang keduanya bermuara ke penyediaan hara tersedia bagi tanaman, serta sebagai pemangsa parasit, sedangkan jasad yang merugikan adalah yang memanfaatkan tanaman hidup baik sebagai sumber pangan atau sebagai inangnya, disebut sebagai hama atau penyakit tanaman, maupun sebagai kompetitor dalam penyerapan hara di tanah. Secara umum jasad hayati tanah digolongkan sebagai berikut seperti terlihat pada Tabel 2.1.

Tabel 2.1 Penggolongan Jasad Hayati Tanah

Golongan/Sub	Jenis	Macam
(1) Fauna :		
a. Fauna Makro	a. Herbivora (pemakan tanaman)	1. Cacing (Annelida) 2. Bekicot (Mollusca) 3. Annelida, yaitu : <ul style="list-style-type: none"> • Crustaceae seperti kepiting • Chilopoda seperti kelabang • Diplopoda seperti kaki seribu • Arachnida seperti laba-laba, kutu dan kalajengking, dan • Serangga (Insecta) seperti belalang, kumbang, rayap, lalat, jangkrik, lebah dan semut, dan • Hewan-hewan kecil lain yang bersarang di tanah, seperti ular, tikus, kadal dll.
b. Fauna Mikro	b. Karnivora	Pemangsa hewan-hewan kecil : serangga, rayap, laba-laba Pemangsa parasit : Annelida, Protozoa dan Rotifera
(2) Flora Mikro	a. Ganggang b. Cendawan c. Aktinomicetes d. Bakteri	

Fauna Tanah merupakan salah satu komponen ekosistem tanah yang berperan dalam memperbaiki struktur tanah melalui penurunan berat jenis, peningkatan ruang pori, aerasi, drainase, kapasitas penyimpanan air, dekomposisi bahan organik, pencampuran partikel tanah, penyebaran mikroba, dan perbaikan struktur agregat tanah (Witt, 2004). Walaupun pengaruh fauna tanah terhadap pembentukan tanah dan dekomposisi bahan organik bersifat tidak langsung, secara umum fauna tanah dapat dipandang sebagai pengatur terjadinya proses fisik, kimia maupun biokimia di tanah (Hill, 2004).

Berdasarkan ukuran, secara garis besar terdapat 3 kelompok Invertebrata yang hidup di tanah, yaitu: mikrofauna, mesofauna, dan makrofauna. Mikrofauna memacu proses dekomposisi bahan organik dengan memperkecil ukuran bahan dengan enzim selulase yang kemudian dimanfaatkan oleh mikroba perombak lainnya. Mesofauna dan makrofauna selain memperkecil ukuran bahan organik, aktivitas metabolismenya menghasilkan *faeces* yang

mengandung berbagai hara dalam bentuk tersedia bagi tanaman dan annelida lainnya. Beberapa makrofauna seperti cacing tanah mempunyai peranan penting dalam mempengaruhi kesehatan dan produktivitas tanah. Lubang cacing merupakan rongga-rongga di tanah yang dapat meningkatkan aerasi, penetrasi akar, dan infiltrasi air (Curry & Good, 1992).

Komponen biotik di tanah memberi sumbangan terhadap proses aliran energi dari ekosistem tanah. Kelompok biotik ini melakukan penguraian sisa-sisa tumbuhan dan hewan yang telah mati (dekomposisi). Adanya perbedaan keadaan lingkungan biotop (satuan geografi terkecil habitat yang dicirikan oleh biotanya) mengakibatkan perbedaan struktur maupun sifat biota dari biotop tersebut. Annelida merupakan salah satu komponen dalam ekosistem tanah, berperan dalam memperbaiki struktur tanah melalui penurunan berat jenis (*bulk density*), peningkatan ruang pori, aerasi, drainase, kapasitas penyimpanan air, dekomposisi sisa organik, pencampuran partikel tanah dan penyebaran mikroba (Anwar *et al.*, 2006).

Dalam hubungan timbal balik dengan mikroba, peranan utama fauna tanah adalah mengoyak, memasukkan, dan melakukan pertukaran secara kimia hasil proses dekomposisi serasah tanaman. Klasifikasi menurut cara hidup fauna tanah didasarkan pada morfologi dan fisiologi tergantung pada kedalaman tanah. Fauna fitotrofik memakan tanaman hidup, fauna zootrofik memakan materi binatang, fauna mikrotrofik hidup dalam mikroorganisme, dan fauna saprofitik menggunakan materi organik yang telah mati. Melalui proses mineralisasi materi yang telah mati akan menghasilkan garam-garam mineral yang akan digunakan oleh tumbuh-tumbuhan.

2.3 OLIGOCHAETA

Cacing tanah termasuk hewan tingkat rendah, karena tidak memiliki tulang belakang (invertebrata). Cacing tanah tergolong ke dalam Filum Annelida. Annelida berasal dari kata

“*Annulus*” yang berarti cincin. Tubuh hewan ini terdiri dari cincin-cincin atau segmen-segmen. Cacing tanah dikelompokkan dalam ordo Oligochaeta. Oligochaeta (dalam bahasa Yunani, *oligo*=sedikit, *chaetae*=rambut kaku) merupakan annelida berambut sedikit. Oligochaeta terdiri atas dua subordo yakni Archiologochaeta memiliki jumlah seta tidak sama setiap segmen, saluran jantan membuka pada satu segmen eksterior. Subordo Neologochaeta (seta lumbricin atau perichaetin, lubang jantan tidak teratur pada segmen belakang saluran). Diperkirakan ada 3500 jenis cacing tanah (*Oligochaeta*), yang terbagi dalam 18 famili penting. Namun demikian famili *Lumbricidae* adalah yang paling banyak dipelajari. *Lumbricidae* sangat penting bagi kehidupan manusia sebab mempunyai kemampuan membentuk tanah-tanah baru.

Cacing tanah berperan dalam dekomposisi, pembangunan, pemeliharaan struktur tanah. Populasi cacing tanah di daerah tropis seperti di Indonesia juga tidak begitu banyak, meskipun di Mexico, cacing tanah ditemukan dalam jumlah besar terutama spesies endogeik, yang berperan sebagai *soil feeders*, sehingga dapat dikatakan bahwa cacing tanah berperan dalam dinamika tanah (Fragoso, 1992).

Cacing tanah dapat dikelompokkan menjadi tiga yaitu kelompok cacing epigeik (*litter dwellers*), cacing endogeik (*shallow soil dwelling*) dan anecik (*deep burrowers*). Namun dalam pembagian yang paling baru cacing tanah secara ekologi dapat dikelompokkan menjadi lima (Curry, 1994). Beberapa pertimbangan yang digunakan dalam pembagian ini meliputi tingkah lakunya, kemampuan membuat lubang, kesukaan makanan, warna tubuh, bentuk dan ukuran.

Komunitas cacing tanah dicirikan oleh nilai rata-rata absolut kepadatan populasi, biomassa, kelimpahan spesies dan keanekaragaman jumlah spesies. Komunitas cacing tanah dibagi tiga kelompok yaitu komunitas *epigeik*, anecik dan endogeik. Cacing tanah epigeik dicirikan oleh kebiasaannya memangsa seresah, ada pigmentasi dorsal, hidup di seresah/pada

laporan permukaan kurang lebih 5 cm dari tanah. Cacing anecik adalah spesies pembuat lorong-lorong tanah dengan *antero dorsal pigmentation*, ujung posterior datar (pipih), hidup di tanah tetapi makan seresah. Komunitas endogeik adalah semua cacing tanah yang tak berpigmen, penggembur tanah, gerakan lambat dan makanannya tanah. Sedangkan struktur komunitas ditentukan dengan melihat perbandingan besarnya jumlah cacing tanah diantara ketiga komunitas tersebut. Struktur komunitas epigeik-anecik-endogeik terbentuk bila komposisi epigeik lebih dari 50% (Fragoso dan Lavelle, 1992).

Oligochaeta (Oligos = sedikit, chaeta = bulu kaku) adalah meliputi cacing tanah dan beberapa spesies yang hidup dalam air tawar. Oligochaeta tubuhnya juga bersegmen-segmen, jumlah setae sedikit. Tubuh cacing ini umumnya berbentuk panjang cylindris, dengan panjang sekitar 18 cm dan diameter tubuhnya sekitar 0,935 cm. Setae tidak terdapat pada parapodia, prostomium jelas ada tetapi umumnya tanpa extremitas, selalu bersifat hermaphrodit, testis dan ovarium terdapat dalam segmen-segmen bagian anterior, dan testis selalu terletak di sebelah anterior ovarium, ductuli genitales bermuara ke dalam suatu rongga, yang disebut spermathecae, reproduksi dilakukan dengan fertilisasi silang, ova terdapat di dalam cocon, pertumbuhan atau perkembangan secara langsung tanpa melalui stadium larva.

Classis Oligochaeta, meliputi 2 ordo yaitu :

1. Ordo Terricolae

adalah Oligochaeta yang bersifat terrestrial yaitu hidup di tanah

Contoh :

- Lumbricus
- Allolobophora
- Eutyphoeus

2. Ordo Limicolae

adalah Oligochaeta yang bersifat aquatis

Contoh :

- Tubifex
- Stylaria
- Aelosoma

Secara alamiah, morfologi dan anatomi cacing tanah berevolusi menyesuaikan diri terhadap lingkungannya. Arlen (1994) menjelaskan bahwa cacing tanah yang ditemukan hidup di tumpukan sampah dan tanah sekitarnya mempunyai ukuran panjang sangat bervariasi, yaitu berkisar antara beberapa milimeter sampai 15 cm atau lebih. Faktor-faktor ekologis yang memengaruhi cacing tanah meliputi: (a) keasaman (pH), (b) kelengasan, (c) temperatur, (d) aerasi dan CO₂, (e) bahan organik, (f) jenis, dan (g) suplai nutrisi. Secara sistematis, cacing tanah bertubuh tanpa kerangka yang tersusun oleh segmen-segmen fraksi luar dan fraksi dalam yang saling berhubungan secara integral, diselaputi oleh epidermis berupa kutikula (kulit kaku) berpigmen tipis dan seta, kecuali pada dua segmen pertama (bagian mulut), bersifat *hemaphrodit* (berkelamin ganda) dengan peranti kelamin seadanya pada segmen-segmen tertentu. Apabila dewasa, bagian epidermis pada posisi tertentu akan membengkak membentuk *klitelium* (tabung peranakan atau rahim), tempat mengeluarkan *kokon* (selubung bulat) berisi telur dan *ova* (bakal telur). Setelah kawin (kopulasi), telur akan berkembang di dalamnya dan apabila menetas langsung serupa cacing dewasa. Tubuh dibedakan atas bagian *anterior* dan *posterior*. Pada bagian anteriornya terdapat mulut, prostomium dan beberapa segmen yang agak menebal membentuk *klitelium*. Secara struktural, cacing tanah mempunyai rongga besar *coelomic* yang mengandung *coelomycetes* (pembuluh-pembuluh mikro), yang merupakan sistem vaskuler tertutup. Saluran makanan

berupa tabung anterior dan posterior, kotoran dikeluarkan lewat anus atau peranti khusus yang disebut *nephridia*. Respirasi (pernapasan) terjadi melalui kutikuler (Hanafiah, dkk.2008).

Populasi cacing tanah sangat erat hubungannya dengan keadaan lingkungan cacing tanah itu berada. Lingkungan yang dimaksud disini adalah kondisi-kondisi fisik, kimia, biotik dan makanan yang secara bersama-sama dapat mempengaruhi populasi cacing tanah. Cacing tanah umumnya memakan serasah daun dan juga materi tumbuhan lainnya yang telah mati, kemudian dicerna dan dikeluarkan berupa kotoran. Kemampuan hewan ini dalam mengonsumsi serasah sebagai makanannya bergantung pada ketersediaan jenis serasah yang disukainya, disamping itu juga ditentukan oleh kandungan karbon dan nitrogen serasah.

Cacing tanah yang tersebar di seluruh dunia berjumlah sekitar 1.800 spesies. Cacing tanah yang terdapat di Indonesia tergolong ke dalam famili *Enchytraeidae*, *Glassocolicidae*, *Lumbricidae*, *Moniligastridae*, *Megascolicidae*. Genus yang pernah ditemukan ialah *Enchytraeus*, *Fridericia*, *Drawida*, *Dichogaster*, *Eudichaster*, *Pontoscolex*, *Pheretima*, *Megascolex*, *Perionyx* dan *Allolobophora*. *Megascolex* sp. lebih menyukai kondisi lingkungan dengan pH sedikit asam (<6), kelembaban tanah berkisar antara 80-90% dan kadar organik tergolong tinggi (>1%), sedangkan cacing tanah dari spesies *Drawida* sp lebih menyukai kondisi lingkungan dengan pH netral (6-7), kelembaban tanah berkisar antara 85-95%, dan kadar organik tergolong cukup rendah (>1%). *Pontoscolex corethrurus* lebih menyukai kondisi lingkungan dengan pH sedikit asam (<6) dengan kadar organik tergolong cukup tinggi (Arlen, 1998).

Secara umum annelida dapat dipandang sebagai pengatur terjadinya proses di tanah. Dengan perkataan lain fauna tanah berperan dalam menentukan kesuburan tanah bahkan beberapa jenis annelida dapat digunakan sebagai indikator tingkat kesehatan tanah di suatu daerah pertanian.

2.4 PAKAN ALAMI CACING TANAH

Cacing tanah dan organisme tanah lainnya merupakan variabel biotik penyusun suatu komunitas yang memiliki beberapa peranan, diantaranya adalah sebagai pengurai dalam rantai makanan, jembatan transfer energi kepada organisme yang memiliki tingkat tropik yang lebih tinggi, membantu kegiatan metabolisme tumbuhan dengan menguraikan serasah daun-daunan dan ranting. Disamping itu cacing tanah dapat digunakan untuk mengestimasi kondisi ekologis suatu ekosistem tanah. Selanjutnya dijelaskan bahwa cacing tanah juga dapat mengubah kondisi tanah yang didiaminya melalui keunikan aktivitas dan perilakunya. Hewan ini memakan tanah berikut bahan organik yang terdapat di tanah dan kemudian dikeluarkan sebagai kotoran di permukaan tanah. Aktivitas ini menyebabkan lebih banyak udara yang masuk ke dalam tanah, tanah menjadi teraduk dan terbentuk agregasi-agregasi sehingga tanah dapat menahan air lebih banyak dan menaikkan kapasitas air tanah. Cacing tanah sangat penting dalam proses dekomposisi bahan organik tanah.

Bahan organik tanah sangat besar pengaruhnya terhadap perkembangan populasi cacing tanah karena bahan organik yang terdapat di tanah sangat diperlukan untuk melanjutkan kehidupannya. Bahan organik juga mempengaruhi sifat fisik-kimia tanah dan bahan organik itu merupakan sumber pakan untuk menghasilkan energi dan senyawa pembentukan tubuh cacing tanah (Anwar, 2006)

Menurut Paoletti (1999), menyatakan bahwa cacing tanah secara umum dapat dikelompokkan berdasarkan tempat hidupnya, kotorannya, kenampakan warna, dan makanan kesukaannya sebagai berikut:

1. Epigeasis; cacing yang aktif dipermukaan, warna gelap, penyamaran efektif, tidak membuat lubang, kotoran tidak nampak jelas, pemakan serasah di permukaan tanah dan tidak mencerna tanah. Contohnya : *Lumbricus rubellus* dan *Lumbricus castaneus*.

2. Anazesis; berukuran besar, membuat lubang terbuka permanen ke permukaan tanah; pemakan serasah di permukaan tanah dan membawanya ke dalam tanah, mencerna sebagian tanah, warna sedang bagian punggung, dengan penyamaran rendah, kotoran di permukaan tanah atau terselip di antara tanah. Contohnya : *Eophila tellinii*, *Lumbricus terrestris*, dan *Allolobophora longa*.
3. Endogaesis; hidup di dalam tanah dekat permukaan tanah, sering dalam dan meluas, kotoran di dalam lubang, tidak berwarna, tanpa penyamaran, pemakan tanah dan bahan organik, serta akar-akar mati. Contohnya : *Allolobophora chlorotica*, *Allolobophora caliginosa*, dan *Allolobophora rosea*.
4. Coprophagic; hidup pada pupuk kandang, seperti : *Eisenia foetida*, *Dendrobaena veneta*, dan *Metaphire schmaridae*.
5. Arboricolous; hidup di dalam suspensi tanah pada hutan tropik basah, seperti : *Androrrhinus spp.*

Berdasarkan jenis makanannya cacing tanah dibagi menjadi tiga, yaitu: (1) *litter feeder* (pemakan bahan organik sampah, kompos, pupuk hijau), (2) *limifagus* (pemakan tanah subur/*mud* atau tanah basah), dan (3) *geofagus* (pemakan tanah). Kelompok *geofagus* akan memakan masa tanah dan *litter feeder/limifagus* biasanya dengan mendesak masa tanah. Hal ini berhubungan dengan kegiatan membuat lubang yang berbeda pada tiap jenis cacing tanah. Ada yang dilakukan dengan mendesak masa tanah dan ada juga yang dilakukan dengan memakan masa tanah.

2.5 LINDI

Sampah di TPA akan mengalami proses penguraian secara kimia dan biokimia. Masalah akan timbul ketika air hujan dan air permukaan meresap ke dalam timbunan sampah. Ditambah lagi dengan penguraian sampah secara kimia dan biokimia, akan menimbulkan

cairan rembesan dengan kandungan padatan dan kebutuhan oksigen yang sangat tinggi yang kemudian bercampur dengan air hujan, disebut juga dengan lindi (Martono, 1996).

Air lindi membawa materi tersuspensi dan terlarut yang merupakan produk dari degradasi sampah. Komposisi air lindi dipengaruhi oleh beberapa faktor seperti jenis sampah terdeposit, jumlah curah hujan di daerah TPA dan kondisi spesifik tempat pembuangan tersebut. Air lindi pada umumnya mengandung senyawa-senyawa organik dan anorganik yang tinggi. Selayaknya benda cair, air lindi akan mengalir ke tempat yang lebih rendah. Air lindi ini dapat merembes masuk ke dalam tanah dan bercampur dengan air tanah sampai pada jarak 200 meter, ataupun mengalir di permukaan tanah dan bermuara pada aliran air sungai. Secara langsung air tanah atau air sungai tersebut akan tercemar. Air lindi juga dapat mencemari sumber air minum pada jarak 100 dari sumber pencemaran.

Air lindi pada umumnya mengandung senyawa-senyawa organik (hidrokarbon, asam humat, fulfat, tanat dan galat) dan anorganik (natrium, kalium, kalsium, magnesium, klor, sulfat, fosfat, fenol, nitrogen dan senyawa logam berat) yang tinggi. Mekanisme masuknya air lindi masuk ke lapisan air tanah, terutama air tanah dangkal (sumur) melalui proses sebagai berikut :

1. Air lindi ditemukan pada lapisan tanah yang digunakan sebagai *open dumping*, yaitu kira-kira berjarak 2 meter di bawah permukaan tanah.
2. Secara khusus, bila air lindi masuk dengan cara infiltrasi di tanah, segera permukaan tanah dijenuhi air.
3. Akibat adanya faktor seperti air hujan, mempercepat air lindi masuk ke lapisan tanah yaitu zona aerasi yang mempunyai kedalaman 10 meter di bawah permukaan tanah.
4. Akibat banyaknya air lindi yang terbentuk menyebabkan air lindi masuk ke lapisan air tanah dangkal atau lapisan air tanah jenuh.

5. Pada lapisan tanah jenuh tersebut, air yang terkumpul bercampur dengan air lindi dimana di air tanah dangkal ini dimanfaatkan untuk sumber air minum melalui sumur-sumur dangkal (Mahardika, 2010).

2.6 OSMOREGULASI

Osmoregulasi adalah proses mengatur konsentrasi cairan dan menyeimbangkan pemasukan serta pengeluaran cairan tubuh oleh sel atau organisme hidup. Osmoregulasi diperlukan karena adanya perbedaan konsentrasi cairan tubuh dengan lingkungan di sekitarnya. Osmoregulasi juga berfungsi ganda sebagai sarana untuk membuang zat-zat yang tidak diperlukan oleh sel atau organisme hidup. Semua organisme mempunyai masalah yang sama yaitu dalam mempertahankan konsentrasi osmotik cairan yang tepat dengan gradien konsentrasi yang tidak berbeda jauh dengan konsentrasi osmotik lingkungan hidupnya. Namun kenyataannya setiap organisme mempunyai kemampuan yang berbeda-beda untuk menghadapi masalah osmoregulasi sebagai respon terhadap perubahan osmotik lingkungan eksternalnya. Mekanisme osmoregulasi dilakukan dengan cara mengatur volume H₂O dalam cairan ekstrasel serta mengatur pertukaran ion, terutama Na⁺ dan Cl⁻ antara cairan ekstra dan intrasel.

Proses inti dalam osmoregulasi yaitu osmosis. Osmosis adalah pergerakan air dari cairan yang mempunyai kandungan air lebih tinggi (yang lebih encer) menuju ke cairan yang mempunyai kandungan air lebih rendah (yang lebih pekat). Sehubungan dengan mekanisme regulasi ion dan air (Isnaeni, 2006). Menurut Fujaya (2004) menyatakan ada tiga pola osmoregulasi yaitu :

1. Regulasi hipertonik atau hiperosmotik, yaitu pengaturan secara aktif konsentrasi cairan tubuh yang lebih tinggi dari konsentrasi media.

2. Regulasi hipotonik atau hipoosmotik, yaitu pengaturan secara aktif konsentrasi cairan tubuh yang lebih rendah dari konsentrasi media
3. Regulasi isotonik atau isoosmotik, yaitu bila kerja konsentrasi cairan tubuh sama dengan konsentrasi media.

2.7 LOGAM BERAT DI TANAH

Tanah merupakan bagian dari siklus logam berat. Pembuangan limbah ke tanah apabila melebihi kemampuan tanah dalam mengolah limbah akan mengakibatkan pencemaran tanah. Jenis limbah yang potensial merusak lingkungan hidup adalah limbah yang termasuk dalam Bahan Beracun Berbahaya (B3) yang di dalamnya terdapat logam-logam berat.

Aktivitas manusia (*anthropogenic*) merupakan kontributor yang besar bagi keberadaan logam berat di tanah. Logam berat masuk ke di tanah melalui pupuk, biosides, program reklamasi, buangan pertambangan, industri, dan emisi kendaraan bermotor. Selain itu kontaminasi yang berasal dari pembuangan melalui limbah (*sewage*), dan pembuangan tanah (*land disposal*) serta sedimen. Mobilitas logam berat di tanah, umumnya dalam bentuk ion atau dalam bentuk senyawa kompleks yang terbentuk dengan senyawa organik yang terlarut. Logam berat di tanah yang membahayakan pada kehidupan organisme dan lingkungan adalah dalam bentuk terlarut. Di tanah, logam tersebut mampu membentuk kompleks dengan bahan organik di tanah sehingga menjadi logam yang tidak larut. Logam yang diikat menjadi kompleks organik ini sukar untuk dicuci serta relatif tidak tersedia bagi tanaman.

Menurut Duffus (2002) logam yang berat didefinisikan dengan mempunyai berat jenis lebih besar $3,5 \text{ g/cm}^3$ dan bahkan ada yang sampai 7 g/cm^3 . Logam berat harus didefinisikan dalam kaitannya dengan posisi dari elemen dalam tabel periodik, karena posisi ini berkaitan dengan sifat-sifat senyawa kimia senyawa termasuk elemennya (Appenroth 2010).

Kandungan logam berat di tanah secara alamiah sangat rendah, kecuali tanah tersebut sudah tercemar. Kandungan logam di 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 di tanah, tetapi juga tergantung pada unsur kimia tanah, jenis logam, pH tanah, dan spesies tanaman (Darmono, 2001). Logam berat memasuki lingkungan tanah melalui penggunaan bahan kimia yang berlangsung mengenai tanah, penimbunan debu, hujan atau pengendapan, pengikisan tanah dan limbah buangan. Interaksi logam berat dan lingkungan tanah dipengaruhi oleh tiga faktor, yaitu : a) proses sorpsi atau desorpsi, b) difusi pencucian, dan c) degradasi. Besarnya penyerapan logam berat di tanah dipengaruhi oleh sifat bahan kimia, kepekatan bahan kimia di tanah, kandungan air tanah, dan sifat-sifat tanah misalnya bahan organik dan liat. Logam berat mempunyai potensi sebagai polutan yang berbahaya. Kehadiran logam berat di tanah patut mendapat perhatian yang serius karena :

1. Sifat racun logam dan potensi karsinogeniknya.
2. Mobilitas logam di tanah bisa dengan cepat berubah, dari yang tadinya *immobile* atau dalam bentuk logamnya menjadi bentuk terlarut dalam spesies yang dengan mudah bisa berubah.
3. Logam mempunyai sifat konservatif dan cenderung kumulatif dalam tubuh manusia.

Kontaminan anorganik di tanah yang terjadi akibat aktivitas antropogenik sangat tinggi, seperti misalnya dari industri logam dan kimia, pertambangan, dan penggunaan pupuk. Interaksi antara kontaminan dengan tanah yang melibatkan beberapa reaksi yang kompleks, bila konsentrasi kontaminan dalam larutan berkurang karena bereaksi, seringkali disatukan dalam proses yang disebut sorpsi. Bila kontaminan yang terlarut dalam air tanah

kontak dengan tanah, maka kemungkinan konsentrasinya akan berkurang karena kontaminan tersebut akan bereaksi atau terikat pada permukaan tanah melalui mekanisme sorpsi. Tanah permukaan umumnya mempunyai kandungan zat organik yang juga dapat bereaksi dengan zat pencemar. Bila tanah tersebut kontak dengan kontaminan atau polutan (dalam bentuk cair atau gas), reaksi yang terjadi yang melibatkan tanah dengan suatu zat dalam medium, akan sangat beraneka tergantung dari sifat zat pencemar dan mineral tanah tersebut.

Logam berat dalam limbah biasanya dalam kondisi seperti tidak terlarut, terlarut, anorganik, tereduksi, teroksidasi, logam bebas, terpresipitasi, terserap dan dalam bentuk kompleks (Ridhowati, 2013). Setelah batas itu terlampaui, maka pencemar akan berada di alam secara tetap atau terakumulasi dan kemudian berdampak pada manusia, material, hewan, tumbuhan dan ekosistem.

Menurut Notodarmojo (2005), tanah merupakan medium bagi mikroorganisme. Beragam mikroorganisme mulai dari virus sampai jamur terdapat di tanah. Tanah merupakan suatu ekosistem yang mendukung kehidupan flora maupun fauna. Diantara organisme yang penting dan perlu mendapat perhatian dalam kaitannya dengan keberadaan zat pencemar di tanah adalah mikroorganisme. Mikroorganisme, yang terdiri dari berbagai jenis, mampu mengubah atau melakukan transformasi biotik terhadap kontaminan, terutama kontaminan organik. Reaksi-reaksi antara zat pencemar dengan partikel tanah pada umumnya adalah reaksi antara zat dalam bentuk terlarut dalam air tanah (*soil solution*) dengan partikel tanah. Sebaliknya, tanah-tanah yang telah tercemar akan melepaskan zat pencemarnya, melalui mekanisme desorpsi ataupun pelarutan ke dalam air tanah tersebut, yang selanjutnya akan bergerak bersama-sama air tanah tersebut.

Tanah secara alami telah mengandung logam berat meskipun hanya sedikit. Berdasarkan analisis Notohadiprawiro dkk (1998) jenis tanah *Vertisol* Sragen, *Ferrassol* Karanganyar (Solo), dan *Regosol* Kuningan Yogyakarta mengandung logam berat 20.9-49.8

(Zn), 18.7- 35.4 (Cu), 5.6- 15.1 (Pb), dan 6.4-28.8 ppm (Ni). Kadarnya pun tergantung dari bahan induk pembentuk tanah itu sendiri. Tanah pun memiliki kemampuan dalam menyerap logam berat yang berbeda untuk tiap jenis tanah berdasarkan bahan induk penyusun tanah tersebut. Menurut standar umum kadar Pb dan Cd yang boleh ada pada tanah adalah masing-masing 150 ppm dan 2 ppm namun untuk jenis tanah yang berasal dari batuan beku.

Unsur logam berat tanah terkandung dalam bebatuan beku, metamorfik, sedimen dll. Kadar logam berat di tanah dipengaruhi oleh reaksi tanah dan fraksi – fraksi tanah yang bersifat dapat mengikat ion logam berat. Senyawa – senyawa tertentu seperti bahan ligand dapat mempengaruhi aktivitas ion logam berat, yaitu membentuk kompleks logam-ligand yang stabil, gugus – gugus karboksil dan fenoksil berperan mengikat semua unsur logam mikro (Napitupulu, 2008).

Kadar logam berat di tanah dipengaruhi oleh reaksi tanah dan fraksi – fraksi tanah yang bersifat dapat mengikat ion logam. Dengan peningkatan pH kadar logam berat dalam fase larutan menurun akibat meningkatnya reaksi hidrolisis, kerapatan kompleks adsorpsi dan muatan yang dimiliki koloid tanah. Derajat keasaman (pH) bersama-sama dengan bahan mineral liat dan kandungan oksida-oksida hidrat dapat mengatur adsorpsi spesifik logam berat yang meningkat secara linear dengan pH sampai tingkat maksimum (Napitupulu, 2008).

Menurut Brummer (Verloo, 1993), keseluruhan logam berat di tanah dapat dipisahkan menjadi berbagai fraksi atau bentuk:

1. Larut air, berada dalam larutan tanah.
2. Tertukarkan, terikat pada tapak-tapak jerapan (*adsorption sites*) pada koloid tanah dan dapat dibebaskan oleh reaksi pertukaran ion.
3. Terikat secara organik, berasosiasi dengan senyawa humus yang tidak terlarutkan.
4. Terjerat (*occluded*) di dalam oksida besi dan mangan.
5. Senyawa-senyawa tertentu, seperti karbonat, fosfat, dan sulfida.

6. Terikat secara struktural di dalam mineral silikat atau mineral primer.

Bagian terbesar segala logam berat yang ada di tanah, yaitu 95 – 99% jumlah total, berada dalam fraksi 2, 3, 4, 5, dan 6. Meskipun fraksi 1 jumlahnya hanya sedikit, namun dilihat dari segi ekologi, fraksi ini paling penting karena penyerapan tanaman dan pengangkutan dalam lingkungan bergantung padanya. Ion logam berat juga terkoordinasikan pada senyawa organik, terutama asam-asam humat dan fulvat, membentuk kelat. Dalam keadaan ini mobilitas logam berat meningkat. Logam berat menjadi lebih mudah terpindahkan ke bagian tubuh tanah yang lebih dalam (terkoluviasi) atau lebih mudah tercuci (*leached*). Derajat keasaman (pH) larutan berpengaruh langsung atas kelarutan unsur logam berat. Kenaikan pH menyebabkan logam berat mengendap. Yang lebih penting ialah pengaruh tidak langsung lewat pengaruhnya atas KTK. Sebagian KTK berasal dari muatan tetap dan sebagian lagi berasal dari muatan tidak tetap (*variable charge*). Muatan tidak tetap bergantung pada pH yang meningkat sejalan dengan peningkatan pH, maka peningkatan pH membawa peningkatan KTK. Logam berat terjerap lebih banyak atau lebih kuat sehingga mobilitasnya menurun. Tanah penjerap, anion yang terjerap dapat membantu penjerapan kation logam berat karena meningkatkan kerapatan muatan negatif pada permukaan komponen penjerap. Dapat pula sebaliknya, anion yang terjerap menghalangi penjerapan kation logam berat karena menutupi tapak jerapan. Potensial redoks tanah yang bersama dengan reaksi tanah menentukan spesies kimiawi logam berat. Misalnya, spesies utama Cd dalam keadaan oksidasi dan masam ialah Cd^{2+} , $CdSO_4$ dan $CdCl^+$, dalam keadaan oksidasi dan basa disamping yang telah disebutkan juga terdapat $CdHCO_3^+$, dan dalam keadaan anoksik kompleks sulfat diganti dengan kompleks sulfida.

Ketersediaan hayati logam berat, berarti keterserapannya oleh tumbuhan, dikendalikan oleh berbagai faktor tanah dan biologi (macam, fase pertumbuhan, dan fase perkembangan tumbuhan) secara rumit, bahkan ada faktor yang pengaruhnya saling bertentangan. Menurut

Verloo (1993) ada kejadian yang penyerapan suatu logam berat oleh tumbuhan dari tanah yang tercemar berat lebih sedikit daripada penyerapannya dari tanah yang tercemar ringan. Hal ini berkenaan dengan kenaikan pH yang lebih tinggi oleh bahan pencemar yang lebih banyak dan sejalan dengan ini KTK juga meningkat lebih tinggi, sehingga penyerapan oleh tanah menjadi lebih kuat.

Logam berat memasuki lingkungan tanah melalui penggunaan bahan kimia yang berlangsung mengenai tanah, penimbunan debu, hujan atau pengendapan, pengikisan tanah dan limbah buangan. Interaksi logam berat dan lingkungan tanah dipengaruhi oleh tiga faktor, yaitu : proses sorpsi atau desorpsi, difusi pencucian, dan degradasi.

Besarnya penyerapan logam berat di tanah dipengaruhi oleh sifat bahan kimia, kepekatan bahan kimia di tanah, kandungan air tanah, dan sifat-sifat tanah misalnya bahan organik dan liat (Miller, 1995). Adsorpsi secara umum adalah proses penggumpalan substansi terlarut yang ada di dalam larutan oleh permukaan benda atau zat penyerap. Adsorpsi adalah masuknya bahan yang menggumpal dalam suatu zat padat. Sebagian besar adsorben merupakan bahan yang sangat berpori dan adsorpsi terutama terjadi pada dinding berpori atau pada suatu tempat tertentu di dalam partikel. Proses pemisahan dapat terjadi karena adanya perbedaan berat molekul, bentuk atau kepolaran yang menyebabkan molekul-molekul tertentu melekat pada permukaan yang lebih kuat daripada molekul-molekul yang lain atau karena ukuran porinya terlalu kecil untuk dapat memuat molekul yang lebih besar. Adsorpsi dipengaruhi oleh permukaan suatu zat dan juga luas area. Adsorben memiliki luas permukaan yang besar untuk bereaksi, apabila suatu zat dalam cairan kecil, maka semakin besar potensi untuk dapat terikat atau menempel. Mekanisme sorpsi dapat berupa pertukaran ion (untuk yang terionisasi) dan ikatan hidrofobik (untuk zat organik yang tidak larut).

2.8 LOGAM BERAT

Logam merupakan unsur alam yang diperoleh dari laut, erosi batuan, vulkanisme dan sebagainya. Golongan logam umumnya memiliki daya hantar dan daya panas yang tinggi. Berdasarkan densitasnya, golongan logam dibagi atas dua golongan, yaitu golongan logam ringan (*light metal*) yang mempunyai densitas $< 5 \text{ g/cm}^3$, sedangkan logam berat (*heavy metal*) mempunyai densitas $> 5 \text{ g/cm}^3$ (Hutagalung *et al.*, 1997), dengan nomor atom 22 sampai dengan 92. Menurut Watts (2000) logam berat sebagai logam yang mempunyai nomor atom lebih besar dari besi (Fe), dan mempunyai densitas lebih dari 5 g/cm^3 .

Menurut Darmono (2001) sifat logam berat sangat unik, tidak dapat dihancurkan secara alami dan cenderung terakumulasi dalam rantai makanan melalui proses biomagnifikasi. Pencemaran logam berat ini menimbulkan berbagai permasalahan diantaranya: 1) berhubungan dengan estetika (perubahan bau, warna dan rasa air); 2) berbahaya bagi kehidupan tanaman dan binatang; 3) berbahaya bagi kesehatan manusia; 4) menyebabkan kerusakan pada ekosistem. Karakteristik logam berat menurut Palar (2008) adalah sebagai berikut:

1. Memiliki spesifikasi gravitasi yang sangat besar (4 gr/cm^3)
2. Mempunyai nomor atom 23-34 dan 40-50 serta unsur lantanida dan aktanida.
3. Mempunyai respon biokimia (spesifik) pada organism hidup.

Logam berat merupakan zat pencemar yang memiliki efek berbahaya karena sifatnya yang tidak dapat diuraikan secara biologis dan stabil. Ada dua hal yang menyatakan logam berat termasuk sebagai pencemar berbahaya, yaitu tidak dihancurkan oleh mikroorganisme yang hidup di lingkungan dan terakumulasi dalam komponen-komponen lingkungan, terutama tanah dengan membentuk kompleks bersama bahan organik dan anorganik secara adsorpsi dan kombinasi. Logam berat pada konsentrasi rendah umumnya sudah beracun bagi makhluk hidup.

Keberadaan logam di tanah dan larutan tanah secara alamiah berasal dari pelapukan batuan induk (*parents materials*) yang mengandung unsur tersebut. Beberapa jenis logam yang termasuk kategori logam berat antara lain sebagai berikut : Aluminium (Al), Antimon (Sb), Cadmium (Cd), Chromium (Cr), Cobalt (Co), Cuprum (Cu), Ferrum (Fe), Mangan (Mn), Merkuri (Hg), Molybdenum (Mo), Selenium (Se), Silver (Ag), Tin (Tn), Plumbum (Pb), Vanadium (V) dan Zinc (Zn). Logam berat seperti : Merkuri (Hg), Cadmium (Cd), Plumbum (Pb), Chromium (Cr), Cuprum (Cu), Cobalt (Co) sangat berbahaya bila kadarnya yang terlarut dalam tubuh manusia cukup tinggi atau melebihi ambang batas baku.

Logam-logam berat ini bersifat sangat toksik (beracun) yang dapat masuk ke tubuh manusia melalui beberapa cara yaitu dari makanan, melalui pernafasan dan penetrasi melalui kulit. Semua logam berat umumnya dapat menjadi racun yang akan meracuni tubuh makhluk hidup (Palar, 1994). Logam berat masuk ke jaringan tubuh makhluk hidup melalui beberapa jalan, yaitu saluran pernapasan, pencernaan dan penetrasi melalui kulit (Darmono, 2001). Logam berat berdasarkan sifat racunnya yang berdampak terhadap kesehatan manusia dapat dikelompokkan menjadi empat golongan yaitu:

1. Sangat beracun, yaitu dapat mengakibatkan kematian atau gangguan kesehatan dalam waktu singkat. Logam-logam tersebut antara lain : Pb, Hg, Cd, As, Sb, Ti, Be, dan Cu.
2. Moderat, yaitu mengakibatkan gangguan kesehatan baik yang dapat pulih maupun yang tidak dapat pulih dalam waktu yang relatif lama. Logam-logam tersebut antara lain : Ba, Be, Cu, Au, Li, Mn, Se, Te, Va, Co dan Rb.
3. Kurang beracun, dalam jumlah besar dapat menimbulkan gangguan kesehatan. Logam-logam tersebut antara lain : Bi, Co, Fe, Ca, Mg, Ni, K, Zn, dan Ag.
4. Tidak beracun, yaitu tidak menimbulkan gangguan kesehatan seperti : Al dan Na.

Logam berat merupakan kontaminan yang banyak terdapat di lingkungan, karena logam berat berbahaya bagi manusia dan biota lainnya, tergantung pada fisikokimia (karakteristik kimia) dari logam berat tersebut dan kondisi kimia yang berlaku. Kontaminasi logam berat dapat menyebabkan pencemaran tanah, kerusakan struktur tanah, kehancuran *landscape* ekologi dan penurunan keanekaragaman hayati dengan hilangnya vegetasi penutup dan konsekuensi resiko diperburuk dengan munculnya tanah yang terkontaminasi logam dan area sekitarnya serta penduduk. Sebenarnya antara sifat racun dan daya guna dari logam berat terhadap kehidupan tidak terdapat perbedaan yang jelas, dan bersifat nisbi. Hal ini berkenaan dengan jenis logam berat, jumlahnya yang terserap serta ketahanan dari makhluk yang bersangkutan. Logam berat Fe, Cu, dan Zn merupakan unsur hara mikro yang diperlukan berbagai tumbuhan, namun dalam jumlah yang banyak (tergantung jenis tanaman) bersifat racun. Menurut Verloo (1993), keseluruhan logam berat yang ada di tanah dapat dipilah menjadi beberapa fraksi atau bentuk, yaitu :

1. Larut dalam air, berada dalam larutan tanah
2. Tertukarkan, terikat pada tapak-tapak jerapan (*adsorption sites*) pada koloid tanah dan dapat dibebaskan oleh reaksi pertukaran ion
3. Terikat secara organik, berasosiasi dengan senyawa humus yang tidak terlarutkan.
4. Terjerap (*occluded*) di dalam oksida besi dan mangan
5. Senyawa-senyawa tertentu, seperti karbonat, fosfat dan sulfida.
6. Terikat secara struktural di dalam mineral silikat atau mineral primer.

Sebagian besar 95% logam berat yang ada di tanah berada dalam bentuk (fraksi) 2,3,4,5,dan 6, walaupun fraksi 1 jumlahnya sedikit tetapi dilihat dari segi ekologi fraksi ini paling penting karena penyerapan tanaman dan pengangkutan logam berat dalam lingkungan bergantung padanya. Semua senyawa toksikan dari logam berat pada dasarnya akan mengalami Absorpsi Distribusi Metabolisme dan Eliminasi (ADME).

Unsur-unsur logam berat tersebar di permukaan bumi. Logam berat tersebut dapat berbentuk senyawa organik, anorganik atau terikat dalam senyawa yang lebih berbahaya daripada keadaan murninya. Logam berat dapat masuk ke dalam tubuh manusia melalui rantai makanan pendek maupun panjang, serta melalui pernafasan. Logam berat termasuk zat pencemar karena sifatnya yang stabil dan sulit untuk diuraikan. Logam berat dianggap berbahaya bagi kesehatan bila terakumulasi secara berlebihan di dalam tubuh, akumulasi logam berat menyebabkan tingginya konsentrasi di dalam tubuh. Logam-logam berat tersebut berada di lingkungan sekitar kita baik dalam bentuk padat, cair maupun gas yang bisa terdapat di tanah, air dan udara.

Logam berat dapat masuk dalam tubuh manusia umumnya melalui makanan baik dari tumbuh-tumbuhan yang tumbuh di tanah pertanian yang tercemar banyak logam berat ataupun dari bahan kimia yang digunakan di lahan pertanian. Logam berat juga dapat terakumulasi dalam tubuh manusia karena mengkonsumsi daging ternak ataupun ikan yang tercemar logam berat. Logam berat merupakan *trace element* yang mempunyai potensi toksin bagi tumbuhan atau makhluk hidup lainnya. *Trace element* didefinisikan sebagai elemen yang keberadaannya di alam sangat sedikit, yang bila terdapat dalam konsentrasi yang cukup memiliki potensi mengganggu atau beracun pada makhluk hidup (Notodarmojo, 2005).

2.9 TOKSISITAS LOGAM BERAT

Peranan tanah terhadap pengangkutan dan menghilangkan bahan-bahan pencemar sangatlah besar. Proses pengangkutan tersebut, diantaranya adalah pengaliran (*flow on*), peresapan (*absorption*) dan pelumeran (*leaching*). Proses peresapan dari bahan-bahan pencemar yang terjadi pada lapisan tanah dipengaruhi oleh banyak hal, diantaranya adalah :

1. Karakteristik atau ciri khas dari struktur bahan pencemar, karena bahan pencemar akan mengalami pertukaran ion ketika melewati lapisan lempung dan organik.

2. Kandungan bahan organik yang terdapat dalam lapisan tanah. Hal ini menjadi penentu, apakah bahan pencemar yang ada akan ditahan atau diteruskan oleh lapisan tanah.
3. Derajat keasaman (pH) tanah, yang sangat dipengaruhi oleh seberapa besar kadar lapisan lempung yang ada pada tanah. Bila lapisan lempung ini sangat besar jumlahnya, maka proses peresapan akan menjadi sangat rendah atau tidak terjadi peresapan sama sekali. Hal itu disebabkan partikel tanah lempung sangat halus dan tersusun sangat rapat, sehingga sulit untuk dilalui.
4. Ukuran partikel tanah. Besar kecilnya ukuran partikel tanah akan sangat menentukan besar kecilnya pori-pori tanah. Semakin besar partikel tanah akan semakin besar pula pori-pori tanah, dan keadaan itu akan semakin mempermudah proses peresapan oleh lapisan tanah. Sebaliknya, semakin kecil partikel tanah, maka pori-pori tanah akan semakin kecil pula sehingga proses peresapan akan semakin sulit terjadi.
5. Kemampuan pertukaran ion. Hal ini bergantung pada jumlah residu bermuatan dari bahan pencemar dan struktur lapisan lempung pada badan tanah.
6. Temperatur. Pada setiap peristiwa peresapan temperatur mempunyai pengaruh yang besar terhadap laju peresapan. Karena umumnya semakin tinggi temperatur maka daya serap tanah terhadap bahan pencemar akan semakin besar.

Umumnya peresapan memerlukan waktu yang relatif singkat untuk mencapai titik kesetimbangan. Sebaliknya, untuk peristiwa pelepasan (*desorption*) membutuhkan waktu yang lebih lama. Pelumeran (*leaching*) bahan-bahan pencemar banyak dipengaruhi oleh faktor kandungan air dalam lapisan tanah dan dalam bahan pencemar itu sendiri. Hal ini disebabkan besar kecilnya kandungan air sangat menentukan tingkat kestabilan bahan pencemar yang sekaligus menjadi penentu dari proses pelumeran. Karenanya dalam bahan pencemar padat yang kadar airnya relatif rendah, sangat sulit terjadi pelumeran. Karena itu

studi tentang pelumeran bahan-bahan pencemar cenderung mengarah pada bahan-bahan pencemar organik. Untuk bahan-bahan pencemar organik, proses pelumeran ini di samping pengaruh dari faktor air, juga ditentukan oleh kemampuan dari bahan-bahan tersebut berinteraksi dengan air tanah. Secara alami, dari interaksi yang terjadi itu akan terbentuk ion-ion. Ion-ion tersebut kemudian akan terangkut sesuai dengan aliran lumeran dalam badan tanah, dan sebagian dari padanya akan berpindah mengikuti aliran permukaan (*flow on*). Perpindahan lumeran pada umumnya akan memperkecil konsentrasi bahan pencemar di dalam badan tanah. Sebagai akibat dari perpindahan ini, akan terjadi gangguan berupa masukan bahan pencemar ke dalam badan perairan. Di samping itu, perpindahan lumeran juga akan mencemari tanah (*groundwater*). Sebagai contoh adalah, peristiwa pelumeran ion-ion dan bahan-bahan organik dari tempat pembuangan sampah. Secara umum bagian-bagian dari bahan kimia yang berikatan polar memiliki kecenderungan untuk lebih leluasa bergerak di tanah (Palar, 2005).

2.10 SUMBER LOGAM BERAT Cu, Cd, Hg

Sumber Logam Cu

Tembaga atau *copper* (Cu) umumnya berbentuk kristal dan memiliki warna kemerahan. Dalam tabel periodik unsur kimia, tembaga memiliki nomor atom 29 dan memiliki bobot atau berat atom 63,546. Keberadaan unsur tembaga di alam dapat ditemukan dalam bentuk logam bebas, akan tetapi lebih banyak ditemukan dalam bentuk persenyawaan atau sebagai senyawa padat dalam bentuk mineral (Palar, 2004). Tembaga (Cu) di perairan alami terdapat dalam bentuk partikulat, koloid dan terlarut. Fase terlarut merupakan Cu^{2+} bebas dan ikatan kompleks, baik dengan ligan inorganik, terutama (CuOH^+ , $\text{Cu}_2(\text{OH})_2^{2+}$) maupun organik. Ikatan Cu kompleks dengan ligan organik, terutama adalah oleh material humus. Ikatan kompleks Cu yang terjadi dalam sedimen laut adalah yang paling stabil, sementara yang

terbentuk dalam kolom air laut stabilitasnya paling rendah. Tembaga terdapat terutama sebagai sulfida, oksida atau karbonat, seperti bijih tembaga pirit, kalkopirit, kalkosit, kuprit dan malasit.

Sumber Logam Cd

Penggunaan kadmium yang paling besar (75 %) adalah dalam industri batu baterai (terutama baterai Ni-Cd). Selain itu, logam ini juga dapat digunakan campuran pigmen, *electroplating*, pembuatan *alloys* dengan titik lebur yang rendah, pengontrol pembelahan reaksi nuklir, dalam pigmen cat dengan membentuk beberapa garamnya seperti kadmium oksida (yang lebih dikenal sebagai kadmium merah), semikonduktor, stabilisator PVC, obat – obatan seperti sipilis dan malaria, dan penambangan timah hitam dan bijih seng. Selain itu juga banyak digunakan sebagai lapisan tahan korosi pada baja atau plastik Logam kadmium mempunyai penyebaran sangat luas di alam, hanya ada satu jenis mineral kadmium di alam yaitu *greenockite* (CdS) yang selalu ditemukan bersamaan dengan mineral *spalerite* (ZnS). Mineral *greenockite* ini sangat jarang ditemukan di alam, sehingga dalam eksploitasi logam Cd biasanya merupakan produksi sampingan dari peristiwa peleburan bijih-bijih seng (Zn). Biasanya pada konsentrat bijih Zn didapatkan 0,2 sampai 0,3 % logam Cd. Di tanah, Cd ditemukan dalam bentuk dan spesies, seperti misalnya (Fetter, 1999):

1. Spesies yang dapat dipertukarkan, seperti misalnya bila teradsorpsi karena gaya elektrostatis pada permukaan lempung atau *organic particulate*.
2. Fase yang dapat tereduksi (*reducible hydrous-oxide phase*), misalnya bila teradsorpsi atau kopresipitasi dengan oksida, hidroksida dari Fe dan Mn atau Al yang melapisi mineral lempung.
3. Spesies karbonat, bila mengalami presipitasi bersama karbonat atau bikarbonat dalam kondisi pH tinggi.

4. Spesies organik, bila terkompleksasi dengan zat organik.
5. *Lattice* fase, bila terfiksasi dalam struktur kristal mineral.
6. Spesies sulfida, bila bereaksi membentuk senyawa dengan sulfida, membentuk senyawa *insoluble* yang sangat stabil.

Sumber Logam Hg

Secara alamiah, pencemaran merkuri berasal dari kegiatan gunung api atau rembesan air tanah yang melewati deposit merkuri. Keberadaan merkuri dari alam dan masuk ke suatu tatanan lingkungan tidak akan menimbulkan efek. Namun, sejak era industrialisasi, merkuri menjadi bahan pencemar penggalan karena merkuri bisa dimanfaatkan semaksimal mungkin. Merkuri pada kerak bumi sebesar 0,08 mg/kg banyak tertimbun di daerah penambangan. Merkuri lebih banyak digunakan dalam bentuk logam murni dan organik daripada dalam bentuk anorganik. Di alam, merkuri ditemukan dalam bentuk unsur merkuri (Hg^0), merkuri monovalen (Hg^+), dan bivalen (Hg^{2+}). Apabila masuk ke perairan, merkuri mudah berikatan dengan klor yang ada dalam air laut dan membentuk ikatan HgCl . Dalam bentuk tersebut, merkuri mudah masuk ke dalam plankton dan bisa berpindah ke biota laut lain. Merkuri anorganik (HgCl) akan berubah menjadi merkuri organik (metil merkuri) oleh peran mikroorganisme yang terjadi pada sedimen di dasar perairan. Merkuri dapat pula bersenyawa dengan karbon membentuk senyawa organomerkuri. Senyawa organomerkuri yang paling umum adalah metil merkuri yang dihasilkan oleh mikroorganisme dalam air dan tanah. Mikroorganisme kemudian termakan oleh ikan sehingga konsentrasi merkuri dalam ikan meningkat. Sumber merkuri secara alami dari kerak bumi termasuk dari tanah, sungai, dan laut, diperkirakan sebesar 25.000-150.000 ton/tahun. Sementara itu, merkuri di atmosfer sebagian besar berasal dari sektor transportasi. Pada tahun 1976, sumber merkuri yang berasal dari aktivitas manusia tercatat sebesar 8.000-10.000 ton/tahun. Bahan bakar

mengandung merkuri sebanyak 1 ppm dan diperkirakan kurang lebih 5.000 ton/tahun emisi merkuri berasal dari pembakaran batubara, gas alam dan pemurnian bahan bakar minyak..

Beberapa bentuk merkuri yang masuk dalam lingkungan tanah meliputi :

1. Hg anorganik yang berasal dari air hujan atau aliran sungai dan bersifat stabil pada pH rendah.
2. Hg organik antara lain fenil merkuri (C_6H_5-Hg), metil merkuri (CH_3-Hg), alkoksil merkuri atau metoksi-etil merkuri ($CH_3O-C_2H_5-Hg$). Hg organik yang bisa berasal dari kegiatan pertanian yaitu pestisida.
3. Terikat dalam bentuk *suspended soil* sebagai Hg^{2+}
4. Logam Hg berasal dari kegiatan industri (Budiono, 2002)

Tersebar nya logam berat Hg di tanah, perairan, ataupun udara bisa melalui berbagai jalur, seperti pembuangan limbah industri secara langsung, baik limbah padat maupun limbah cair yang dibuang ke tanah, udara, dan air. Sebagian senyawa merkuri yang dilepas ke lingkungan akan mengalami proses metilasi dan menjadi metil merkuri (CH_3Hg) oleh mikroorganisme dalam air dan tanah. Metil merkuri memiliki kelarutan tinggi dalam tubuh hewan air sehingga merkuri terakumulasi melalui proses bioakumulasi dalam jaringan tubuh hewan air. Akumulasi Hg dalam tubuh hewan air disebabkan oleh pengambilan Hg oleh organisme air yang lebih cepat dibandingkan proses ekresi. Kadar Hg dalam ikan bisa mencapai 100.000 kali dari kadar air di sekitarnya. Industri yang memberikan efluen Hg adalah industri yang memproses klorin, reduksi caustic soda, industri pertambangan dan proses pengolahan bijih Hg, industri metalurgi dan electroplating, industri kimia, pabrik tinta, pabrik kertas, penyamakan kulit, pabrik tekstil, serta perusahaan farmasi (Widowati, W, 2008)

Berbagai produk yang mengandung merkuri, diantaranya adalah bola lampu, penambal gigi, dan termometer. Merkuri digunakan dalam kegiatan penambangan emas, produksi gas klor dan soda kaustik, serta dalam industri pulp, kertas dan baterai. Merkuri dengan klor, belerang atau oksigen akan membentuk garam yang digunakan dalam pembuatan krim pemutih dan krim antiseptik. Merkuri digunakan secara luas untuk mengekstrak emas (Au) dari bijihnya. Garam merkuri yang penting antarlain HgCl_2 yang bersifat sangat toksik. Hg_2Cl_2 digunakan dalam bidang kesehatan, $\text{Hg}(\text{ONC})_2$ digunakan sebagai bahan detonator yang eksplosif, sedangkan HgS digunakan sebagai pigmen cat berwarna merah terang dan bahan antiseptik.

2.11 SIFAT FISIK DAN KIMIA LOGAM BERAT Cu, Cd, Hg

Sifat Fisik dan Kimia Logam Cu

Tembaga membentuk senyawa dengan tingkat oksidasi +1 dan +2, namun hanya tembaga (II) yang stabil dan mendominasi dalam larutannya. Dalam air, hampir semua garam tembaga (II) berwarna biru oleh karena warna ion kompleks koordinasi enam. Suatu perkecualian yang terkenal adalah tembaga (II) klorida yang berwarna kehijauan oleh karena ion kompleks koordinasi empat. Tembaga (II) hidroksida tidak larut dalam basa encer, tetapi larut dalam hidroksida pekat membentuk larutan biru tua. Tembaga (II) hidroksida juga larut dalam larutan amonia memberikan larutan biru tua. Larutan tembaga (II) dengan berbagai ligan sangat stabil secara termodinamik, tetapi ligan pereduksi seperti iodida akan mereduksi tembaga (II) menjadi endapan tembaga (I).

Pada dasarnya, tembaga bukanlah logam reaktif, namun logam ini dapat diserang oleh asam-asam pekat. Secara khusus, tembaga bereaksi dengan asam hidroklorida pekat-mendidih dengan menghasilkan larutan tak berwarna dan gas hidrogen. Pada umumnya, senyawa tembaga (I) tidak berwarna atau putih, karena ion ini mempunyai konfigurasi

elektronik penuh. Dalam air, ion tembaga (I) terhidrat tidak stabil dan mengalami disproportionasi menjadi ion tembaga (II). (Sugiyarto K.H dan Suyanti, R.D, 2010).

Sifat Fisik dan Kimia Logam Cd

Kadmium adalah logam yang lunak dengan berat atom 112,40. Umumnya ditemukan dalam kondisi stabil pada valensi II, seperti misalnya CdS. Logam ini mampu membentuk ion dalam senyawa kompleks atau hidroksidanya. Kadmium mampu membentuk senyawa kompleks dengan organik amine, sulfur, dan membentuk senyawa kelat. Ion kadmium yang insoluble (tidak larut) dapat terjadi bila terhidrasi oleh karbonat, arsenat atau fosfat. Di tanah, kadmium ditemukan dalam bentuk dan spesies, seperti misalnya :

1. Spesies yang dapat dipertukarkan, seperti misalnya bila teradsorpsi karena gaya elektrostatis pada permukaan lempung atau *organic particulate*.
2. Fase yang dapat tereduksi (*reducible hydrous-oxide phase*), misalnya bila teradsorpsi atau kopresipitasi dengan oksida, hidroksida dari Fe dan Mn atau Al yang melapisi mineral lempung.
3. Spesies karbonat, bila mengalami presipitasi bersama karbonat atau bikarbonat dalam kondisi pH tinggi.
4. Spesies organik, bila terkompleksasi dengan zat organik
5. Lattice fase, bila terfiksasi dalam struktur kristal mineral.
6. Spesies sulfida, bila bereaksi membentuk senyawa dengan sulfida, membentuk senyawa *insoluble* yang sangat stabil.

Kadmium berada pada larutan tanah dalam bentuk ion ataupun dalam senyawa kompleks dengan zat organik. Kadmium merupakan logam yang sangat beracun bagi manusia. Selain diduga karsinogenik, logam ini dapat menyebabkan gangguan pada pencernaan, ginjal, dan kerusakan tulang. Di alam Cd bersenyawa dengan belerang (S)

sebagai *greenocckite* (CdS) yang ditemui bersamaan dengan senyawa *spalerite* (ZnS). Kadmium merupakan logam lunak (*ductile*) berwarna putih perak dan mudah teroksidasi oleh udara bebas dan gas amonia (NH₃) (Palar, 2004). Kadmium bervalensi dua (Cd²⁺) adalah bentuk terlarut stabil dalam lingkungan perairan laut pada pH dibawah 8,0. Kadar Cd di perairan alami berkisar antara 0,29-0,55 ppb dengan rata-rata 0,42 ppb.

Dalam lingkungan alami yang bersifat basa, kadmium mengalami hidrolisis, teradsorpsi oleh padatan tersuspensi dan membentuk ikatan kompleks dengan bahan organik. Di perairan alami, Cd membentuk ikatan kompleks dengan ligan baik organik maupun anorganik, yaitu Cd²⁺, Cd(OH)⁺, CdCl⁺, CdSO₄, CdCO₃ dan Cd organik (Sanusi, 2006). Kadmium karbonat dan kadmium hidroksida memiliki kelarutan yang terbatas. Garam-garam kadmium (klorida, nitrat, dan sulfat) dapat berupa senyawa kompleks organik dan anorganik, atau terserap ke dalam bahan-bahan tersuspensi dan sedimen dasar. Pada pH yang tinggi kadmium mengalami presipitasi atau pengendapan (Effendi 2003).

Sifat Fisik dan Kimia Logam Hg

Merkuri (Hg) adalah logam berat berbentuk cair, berwarna putih perak, serta mudah menguap pada suhu ruangan. Merkuri akan memadat pada tekanan 7.640 atm. Merkuri dapat larut dalam asam sulfat atau asam nitrit, tetapi tahan terhadap basa. Merkuri memiliki nomor atom 80, berat atom 200,59 g/mol, titik lebur -38,9 °C, dan titik didih 356,6 ° C. Merkuri jarang didapatkan dalam bentuk bebas di alam, tetapi berupa bijih cinnabar (HgS). Merkuri memiliki koefisien yang konstan, yaitu tidak terjadi perubahan volume pada suhu tinggi maupun rendah. Merkuri mudah membentuk alloy amalgama dengan logam lainnya, seperti emas (Au), perak (Ag), platinum (Pt), dan tin (Sn). Merkuri bersifat sangat toksik. (Widowati, W, 2008). Hg dapat pula ditemukan dalam bentuk senyawa kompleks dengan organik. Kegiatan manusia yang menyebabkan tersebarnya Hg di tanah adalah pertanian,

industri dan pertambangan. Dalam pertanian, Hg sering digunakan sebagai komponen dalam pestisida atau biosida. Selain itu, Hg juga dapat berasal dari udara akibat pembakaran bahan bakar fosil, produk elektrik, sebagai katalis dalam industri khlorine dan NaOH, pertambangan Hg dan pengecorannya, serta pertambangan emas. Air raksa bersifat racun, terutama menyerang susunan saraf pusat, penurunan daya ingat, penurunan kemampuan gerak, dan menyebabkan tremor.

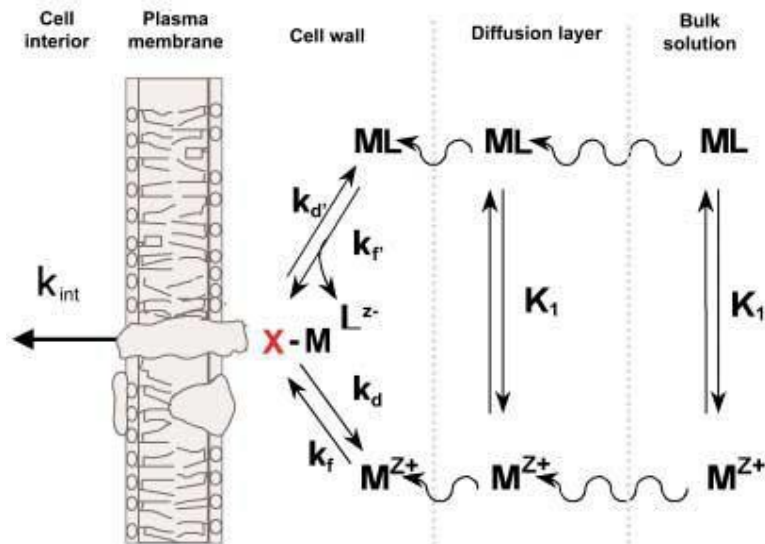
Logam berat ini juga bersifat volatil, tidak larut dalam air dan lemak. Merkuri mempunyai valensi 1 atau 2. Jumlah rata-rata merkuri pada kerak bumi adalah 0,09 ppm; pada tanah adalah 30 -160 ppm, di sungai adalah 0,07 ug/L dan pada air tanah adalah 0,5-1 ug/L. Merkuri terdapat bebas di alam dengan sumber utama dari batu batuan *cinnibar* (HgS). Bahan merkuri sering digunakan dalam proses amalgam, pelapisan kaca, uap lampu, cat, alat pengukur (termometer, barometer, manometer), farmasi, pestisida dan fungisida. Bentuk species dari merkuri yang umum ditemukan adalah Hg^{2+} , $Hg(OH)_2^0$, Hg_0 , dan senyawa kompleks yang stabil dengan ligan organik. Merkuri inorganik dapat ditransformasi menjadi methyl merkuri di dalam sedimen yang merupakan senyawa yang sangat toksik dan dapat terkonsentrasi melalui proses rantai makanan. Merkuri yang dibuang ke lingkungan baik melalui proses geologis maupun antropogenik akan masuk ke dalam media cair dan udara, diikuti dengan proses sedimentasi melalui air hujan ataupun lepasnya merkuri dari tanah dan sedimen. Merkuri yang dilepaskan akan diubah dari satu bentuk bahankimia ke bentuk yang lain secara fisika, kimia dan biologi. Proses transportasi di di tanah dan air akan terbatas dan kemungkinan deposisi dari merkuri tersebut akan terjadi dalam jarak dekat. Merkuri adalah unsur yang berwujud cair, berwarna perak pada suhu kamar, mudah bergerak, tidak berbau, tidak larut dalam air dan pelarut organik. Terdapatnya merkuri di alam disebabkan oleh kegiatan alam seperti proses pelapukan buatan dari letusan gunung berapi dan beberapa kegiatan manusia, terutama kegiatan yang menggunakan senyawa merkuri sebagai katalis

seperti pada pertambangan logam mulia dan lain-lain. Bila dilihat dari sifat racunnya, merkuri termasuk dalam kelompok sangat beracun, antara lain karena tekanan uap merkuri cukup tinggi sehingga pada suhu normal dapat menghasilkan konsentrasi uap yang dapat membahayakan, misalnya pada suhu 240 °C, udara yang jenuh uap merkuri akan mengandung 18 mg/m³ (360 kali lebih besar dari nilai ambang batas yang dikeluarkan oleh *The National Institutes of Safety and Health, USA* 0,05 mg/m³).

Merkuri (Hg) di tanah relatif tidak stabil. Secara alamiah Hg ditemukan di tanah dengan konsentrasi yang tidak tinggi sampai 0,15 mg/kg. Pada permukaan tanah, Hg teradsorpsi atau membentuk ikatan dengan lempung dan zat organik. Banyak senyawa Hg baik organik maupun anorganik akan terdekomposisi menjadi logam Hg, yang kemudian akan mengalami volatilisasi ke udara bebas, dikonversi menjadi HgS, atau membentuk senyawa kompleks dengan ligand anorganik. Dalam transformasi ini, proses biologis sangat berperan. Di tanah, ikatan chelat dengan organik tanah, seperti misalnya metilasi dan reaksi dengan humik material yang mengandung belerang (S) akan membuat Hg dalam bentuk yang terlarut. Sedangkan senyawa kompleks anorganik, seperti senyawa dengan khlorida dan hidroksida lainnya akan membuat Hg agak stabil. Potensial redoks, tekstur, dan keberadaan zat organik akan mempengaruhi stabilitas dan mobilitas Hg di tanah.

2.12 MEKANISME INTERAKSI LOGAM BERAT DENGAN ORGANISME

Interaksi antara proses lingkungan dan sifat fisiko-kimia pencemar menentukan penyebaran dan pengaruhnya terhadap makhluk hidup. Bioakumulasi diatur oleh sejumlah distribusi dan proses perubahan bentuk.



Gambar 2.1 Konseptual model interaksi logam dengan organisme
Sumber : Campbell, 2002

Pada model ligan biotik, merkuri dapat masuk kedalam biota melalui berbagai tahapan. Logam merkuri dalam bentuk ion bebas atau bentuk kompleks ligan mendekati permukaan sel dan melewati dinding sel. Makromolekul dalam dinding sel mengandung gugus fungsional sederhana yang berperan sebagai donor elektron. Pada pH netral kebanyakan gugus fungsional tersebut mengalami ionisasi dan bersifat hidrofilik dan bermuatan negatif sehingga ion logam dan kompleksnya dapat menembus membran plasma.

Difusi Pasif

Sebagian besar toksikan melewati membran sel secara difusi pasif sederhana. Laju difusi berhubungan dengan perbedaan kadar yang dibatasi oleh membran dan daya larut dalam lipid. Toksikan yang mudah mengion sulit menembus membran sel sebaliknya bentuk non ion mampu larut dalam lipid sehingga daya penetrasi membran sel nya tinggi. Merkuri dalam bentuk merkuri organik langsung menembus membran sel dengan cara difusi pasif.

Transpor Aktif

Peristiwa ini melibatkan pembentukan kompleks zat kimia dengan carrier makromolekul di satu sisi membran. Kompleks ini lalu berdifusi ke sisi lain, tempat zat kimia itu dilepaskan, *carrier* akan kembali ke permukaan semula untuk melakukan transpot selanjutnya. Struktur, konformasi, dan muatan mempengaruhi pengikatan dan afinitas zat kimia dengan situs *carrier*. Transpor aktif yang melibatkan carrier dapat memindahkan zat kimia melewati membran melawan perbedaan kadar atau jika molekul merupakan suatu ion maka melewati perbedaan muatan. Transpor aktif dengan *carrier* ini membutuhkan energi metabolisme.

Merkuri dalam bentuk Hg^{2+} masuk ke dalam membran sel melalui transpor aktif. Merkuri organik maupun anorganik akan berikatan dengan biotik pada sel dan mengalami internalisasi (Campbell, 2002). Interaksi ini dengan model ligan biotik yang mengasumsikan bahwa :

1. Pengangkutan logam dalam larutan ke membran terjadi reaksi pengompleksan subsekuen pada permukaan dan dihasilkan kesetimbangan antara logam dan larutan
2. Membran plasma ialah sisi utama bagi interaksi logam dengan organisme hidup dan interaksi ini terjadi melalui reaksi pertukaran ligan menghasilkan senyawa kompleks dengan gugus fungsional sel (M-X-cell)
3. Respon biologis dalam bentuk pengambilan logam, nutrisi atau toksik tergantung dari konsentrasi M-X-cell
4. Variasi M-X-cell sebagai fungsi M^{2+} dalam larutan mengikuti aturan *Langmuir-adsorption isotherm*.
5. Selama paparan logam sifat biologis permukaan tidak berubah dimana logam tidak menyebabkan perubahan sifat membran plasma.

Absorpsi

Pengambilan awal merkuri dapat berasal dari tiga proses utama, yaitu dari air melalui permukaan pernapasan, penyerapan dari air melalui permukaan tubuh, dan dari makanan. Kecepatan penyerapan dipengaruhi oleh suhu, pH, dan salinitas.

Pada umumnya absorpsi logam berat dapat dibagi dua yakni: Pertama *passive uptake* yaitu proses ini terjadi ketika ion logam berat terikat pada dinding sel biosorben. Mekanisme *passive uptake* dapat dilakukan dengan dua cara, pertama dengan cara pertukaran ion dimana ion pada dinding sel digantikan oleh ion-ion logam berat, dan kedua adalah pembentukan senyawa kompleks antara ion-ion logam berat dengan gugus fungsional seperti karbonil, amino, thiol, hidroksi, fosfat, dan hidroksi-karboksil secara bolak balik dan cepat. Kedua, aktif uptake merupakan mekanisme masuknya logam berat melewati membran sel sama dengan proses masuknya logam esensial melalui sistem transpor membran, hal ini disebabkan adanya kemiripan sifat antara logam berat dengan logam esensial dalam hal sifat fisika-kimia secara keseluruhan. Proses aktif *uptake* pada mikroorganisme dapat terjadi sejalan dengan konsumsi ion logam untuk pertumbuhan dan akumulasi intraselular ion logam.

Logam berat diabsorpsi dan diakumulasikan dalam jaringan hidup. Di dalam sel, merkuri berikatan dengan berbagai jenis sistem enzim, mitokondria, dan mikrosom yang menghasilkan nonspesifik sel (sel yang rusak) dan sel mati. Di dalam hati, metil merkuri bereaksi dengan sistin dan glutation membentuk kompleks yang larut, lalu disekresikan menuju empedu dan direabsorpsi dari taktus gastrointestinal.

Merkuri setelah diabsorpsi di jaringan mengalami oksidasi membentuk Hg divalen (Hg^{2+}) yang dibantu oleh enzim katalase. Inhalasi Hg bentuk uap akan diabsorpsi melalui sel darah merah, lalu ditransformasikan menjadi merkuri divalen (Hg^{2+}). Sebagian akan menuju otak. Plasenta kemudian mengalami transformasi menjadi Hg^{2+} , yang kemudian diakumulasikan di dalam jaringan. Absorpsi dalam alat gastrointestinal dari merkuri

anorganik asal makanan kurang dari 15% pada mencit dan 7% pada manusia, sedangkan absorpsi merkuri organik sebesar 90-95%. Konsentrasi Hg terbesar ditemukan pada ginjal dalam paparan merkuri anorganik dan merkuri uap, sedangkan merkuri organik memiliki afinitas yang besar terhadap otak, terutama korteks posterior. Ekskresi Hg dari tubuh melalui urin dan feses dipengaruhi oleh bentuk senyawa Hg, besar dosis Hg, serta waktu paparan. Ekskresi metil merkuri sebesar 90% terjadi melalui feses, baik paparan akut maupun kronis.

Alkil merkuri ataupun metil merkuri lebih toksik dibandingkan merkuri anorganik karena alkil merkuri bisa membentuk senyawa lipophilus yang mampu melintasi membran sel dan lebih mudah diabsorpsi serta berpenetrasi menuju sistem syaraf. Demikian juga metil merkuri mampu menembus *placental barrier* dan akan lebih lama tersimpan dalam tubuh. Metil merkuri memiliki afinitas yang tinggi terhadap sulfhidril serta mampu bergabung dengan membran dan intra seluler protein. Metil merkuri juga memiliki afinitas terhadap imin, amin, karbonil, dan kelompok hidroksil. Toksisitas merkuri organik sangat luas, yaitu mengakibatkan disfungsi *blood-brain barrier*, merusak permeabilitas membran, menghambat beberapa enzim, menghambat sintesis protein, dan menghambat penggunaan substrat protein. Namun demikian, alkil merkuri ataupun metil merkuri tidak mengakibatkan kerusakan membran mukosa sehingga gejala toksisitas merkuri organik lebih lambat dibandingkan merkuri anorganik.

Lebih dari 95% metil merkuri terabsorpsi dan ditransportasikan ke dalam sel darah merah, lalu diedarkan ke seluruh jaringan tubuh dan hanya sejumlah kecil yang terakumulasi dalam plasma protein. Metil merkuri pada umumnya terakumulasi dalam sistem syaraf pusat dan ditemukan paling banyak pada bagian kortek dan serebelum. Waktu paruh alkil merkuri adalah 70 hari dan akan diekskresikan sebesar 1 % dengan sisa 99 % yang terakumulasi pada berbagai organ (Widowati W, 2008). Pemberian merkuri organik yaitu alkil merkuri dan aril merkuri akan didistribusikan pada organ yang berbeda dengan merkuri anorganik

dikarenakan merkuri organik mampu menembus melalui membran *blood-brain barrier* sehingga sebagian besar senyawa merkuri organik diakumulasikan di jaringan otak.

2.13 STRATEGI PENGENDALIAN LOGAM BERAT DI TANAH

Strategi adalah tujuan jangka panjang, tindak lanjut serta pendayagunaan dan alokasi semua sumber daya untuk mencapai tujuan jangka panjang tersebut (Rangkuti, 2009). Dalam mencapai tujuan diperlukan suatu perencanaan strategi yaitu suatu proses analisis, perumusan dan evaluasi yang bertujuan untuk melihat kondisi-kondisi internal dan eksternal sehingga dapat mengantisipasi perubahan lingkungan eksternal. Dalam merumuskan strategi pengendalian logam berat di tanah diperlukan identifikasi berbagai faktor secara sistematis.



SEKOLAH PASCASARJANA