

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Logam Berat Kadmium (Cd)

2.1.1. Karakteristik Kadmium

Logam Kadmium ditemukan pada tahun 1817 oleh seorang berkebangsaan Jerman yang bernama Friedrich Stromeyer. Logam ini mempunyai massa atom relatif 112,41 g/mol, berat jenis 8,64 g/cm³, titik leleh 321°C, titik didih 767°C. Logam Kadmium mudah terbakar membentuk Kadmium oksida (Moore, 1990). Kadmium umumnya ditemukan dalam kondisi stabil pada valensi II, seperti misalnya CdS. Logam ini mampu membentuk ion dalam senyawa kompleks atau hidroksidanya, misalnya dengan ammonia (Cd(NH₃)₆₄), dan sianida (Cd(CN)₄₃). Kadmium juga mampu membentuk senyawa khelat. Ion Kadmium tidak larut bila terhidrasi oleh karbonat, arsenate atau posfat. Di alam Kadmium jarang sekali ditemukan dalam bentuk bebas, biasanya berada dalam bentuk Kadmium oksida, Kadmium klorida dan Kadmium sulfat. Mineral Kadmium dalam tanah antara lain CdO, CdCO₃, Cd(PO₄)₂, dan CdCl₂. Senyawa senyawa tersebut terikat pada senyawa organik atau oksida, namun yang dominan adalah KadmiumS.

Berdasarkan pada sifat fisiknya, Kadmium merupakan logam lunak, berwarna putih perak. Logam ini akan kehilangan kilapnya bila berada dalam udara yang lembab atau basah serta akan cepat mengalami kerusakan bila terkena uap amonia (NH₃) dan sulfur hidroksida (SO₂). Sifat kimia dari logam Kadmium antara lain di dalam persenyawaan yang dibentuk pada umumnya mempunyai bilangan valensi 2+, sangat sedikit bervalensi 1+. Bila dimasukkan ke dalam larutan yang mengandung ion OH⁻, ion Cd⁺² akan mengalami proses pengendapan dan endapannya berwarna putih (Palar,1994).

Produksi Kadmium di seluruh dunia berkisar 6000 metrik ton pertahun pada tahun 1950 sampai 15.000 metrik ton pertahun pada tahun 1980. Produksi Kadmium sekarang kurang lebih 19.000 metrik ton pertahun. Logam Kadmium utamanya digunakan pada pelapisan logam atau campuran untuk pencegahan korosi pada pabrik baterai, keramik, kaca, pupuk P, pupuk kandang kambing dan beberapa biosida. Kadmium juga seringkali digunakan dalam jumlah besar sebagai pewarna dalam cat dan juga pada pabrik plastik (Moore, 1990).

2.1.2. Reaksi kimia Kadmium

Menurut **Montazeri et al. (2010)**, **Kadmium dalam tanah** ditemukan dalam bentuk dan spesies, yaitu :

1. Spesies yang dapat dipertukarkan, seperti bila terabsorpsi karena gaya elektrostatis pada permukaan lempung atau partikel organik.
2. Fase yang dapat tereduksi, misalnya bila terabsorpsi 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 terabsorpsi zat organik.
5. *Lattice fase*, bila terfiksasi dalam struktur kristal mineral.

Kadmium memiliki sifat yang serupa dengan zink, kecuali cenderung membentuk kompleks. Kadmium sangat beracun, meskipun dalam konsentrasi rendah. Reaksi kimia Kadmium menurut Ernawati (2014) ialah :

1. Reaksi dengan udara

Kadmium dibakar untuk menghasilkan Kadmium (II) oksida.

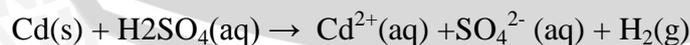


Reaksi dengan halogen Kadmium bereaksi dengan fluorin, bromine dan iodine untuk membentuk Kadmium (II) dihalida.



2. Reaksi dengan asam

Kadmium larut perlahan dalam asam sulfat encer untuk membentuk campuran yang mengandung ion Kadmium (II) dan gas hidrogen.



3. Reaksi dengan basa

Kadmium tidak akan larut dalam larutan alkali.

4. Persenyawaan

Kadmium sulfida (CdS) merupakan senyawa yang tidak larut dalam air dan dijumpai sebagai mineral grinolit. Kadmium oksida (CdO)

memiliki beberapa warna dari kuning kehijauan sampai coklat yang mendekati hitam tergantung dengan kondisi suhu pemanasan. Warna tersebut merupakan akibat dari beberapa jenis terputusnya kisi kristal. Kadmium seng telurida (CdZnTe) sangat beracun untuk manusia, tidak boleh tertelan, terhirup dan tidak boleh dipegang tanpa sarung tangan yang tepat. Kadmium hidroksida ($\text{Cd}(\text{OH})_2$) tidak larut dalam basa. Kadmium hidroksi dapat membentuk kompleks amina bila direaksikan dengan amonia kuat berlebih. $\text{Cd}(\text{OH})_2$ lebih bersifat asam daripada $\text{Zn}(\text{OH})_2$ yang bersifat amfoter.

Oksida Kadmium (CdO) dibentuk dengan pembakaran logamnya di udara atau dengan pirolisis karbonat atau nitratnya. Asam oksida dapat diperoleh dengan pembakaran alkil, asap Kadmium oksida luar biasa beracun. Oksida menyublim pada suhu yang sangat tinggi (Ernawati, 2014). Jika larutan garam Kadmium di tambah NaOH terbentuk hidroksida dengan rumus kimia di bawah ini :



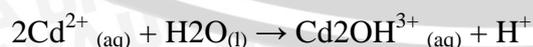
Hidroksida Kadmium mudah larut dalam amonia kuat berlebih membentuk kompleks samin, dengan rumus kimia di bawah ini :



Senyawa sulfida diperoleh dari interaksi langsung/pengendapan oleh H_2S dari larutan aqua, larutan asam untuk CdS , dengan rumus kimia di bawah ini (Ernawati, 2014) :



Larutan Kadmium halida mengandung semua spesies Cd^{2+} , CdX^{2+} , CdX^{2+} , dan CdX^{3-} dalam kesetimbangan. Garam dari okso seperti nitrat, sulfat, sulfit, perklorat, dan asetat larut dalam air. Ion aquo bersifat asam dan larutan garamnya terhidrolisis pada larutan Kadmium yang lebih pekat, spesies yang utama adalah $\text{Cd}_2\text{OH}^{3+}$, dengan rumus kimia di bawah ini (Ernawati, 2014) :



Anion pengompleks, misalnya halida, membentuk $\text{Cd}(\text{OH})\text{Cl}$ atau CdNO^{3+} . Garam iodida Kadmium dapat larut dalam KI. Jika larutan KI pekat ditambahkan pada larutan garam amoniakal terbentuk $\text{Cd}(\text{NH}_3)_4\text{I}_4$ yang berbentuk endapan putih. CdI_2 larut dalam alkohol dan digunakan dalam fotografi (Ernawati, 2014).

Secara alami tanah Kadmium dengan konsentrasi 0,24 ppm tergantung dari batuan induk, cara terbentuknya tanah, dan translokasi logam berat di tanah (Alloway, 1995). Penyerapan Kadmium oleh tanaman pangan perlu mendapatkan perhatian karena logam tersebut berpotensi untuk meracuni jika dikonsumsi. Faktor yang mengendalikan Kadmium di tanaman adalah konsentrasi dan jenis logam di larutan tanah, pergerakan logam dari tanah ke permukaan akar, transport logam dari permukaan akar ke dalam akar, dan translokasinya dari akar ke tajuk tanaman. Kadmium bersifat lebih mobil di dalam tanah dan karena itu lebih mudah diserap tanaman dibandingkan dengan Pb (Alloway, 1995).

2.1.2. Dampak pencemaran Kadmium

Kadmium tidak mempunyai peranan biologis dalam makhluk hidup. Kadmium adalah logam toksik yang dapat terakumulasi cukup besar pada organisme hidup karena mudah diabsorpsi dan mengganggu sistem pernapasan serta pencernaan. Jika terabsorpsi ke dalam sistem pencernaan dan sistem pernapasan, Kadmium akan membentuk senyawa kompleks dengan protein sehingga mudah diangkut dan menyebar ke hati serta ginjal bahkan sejumlah kecil Kadmium dapat sampai ke pankreas, usus, dan tulang. Selain itu, Kadmium juga akan mengganggu aktivitas enzim dan sel. Hal ini akan menimbulkan tetragenik, mutagenik, dan karsinogenik (Szymborski dan Zaleski, 2003).

Kadmium dapat menyebabkan mual dan muntah-muntah. Penyakit kronik yang dapat ditimbulkan oleh Kadmium adalah kerontokan rambut, anemia, migran, osteoporosis, penyakit lambung dan akhirnya dapat menyebabkan kardiovaskuler (Campbell, 2007). Pengaruh Kadmium (Kadmium) pada konsentrasi tertentu terhadap tanaman juga telah diamati oleh beberapa peneliti. Menurut Lamersdorf *et al.* (1991) dan Misra *et al.* (1994), Kadmium memberikan efek negatif berturut-turut terhadap pertumbuhan akar pohon cemara dan tanaman *Vicia faba*. Pertumbuhan biji dan daun *Betula pendula* juga dipengaruhi oleh Kadmium (Gussarsson, 1994). Ouzounidou *et al.* (1997) dan Garate *et al.* (1993) mengamati adanya pengaruh negatif terhadap pertumbuhan akar dan daun gandum (*Triticum aestivum*) dan pertumbuhan akar tomat serta salad (*Lactuca seriola L.*).

Pada umumnya Kadmium menunjukkan pengaruh terhadap pengambilan, pengangkutan, dan penggunaan beberapa unsur seperti Ca, Mg, P, K dan juga air pada tumbuh-tumbuhan. Kadmium juga mengurangi penyerapan nitrat dan pengangkutannya dari akar ke pucuk, juga menghambat aktivitas enzim nitrat reduktase di dalam pucuk-pucuk tanaman (Adi, 2003). Kadmium menurunkan aktivitas ATP-ase pada bagian membran plasma dari tanaman gandum dan bunga matahari. Rascio *et al.* (1993) menemukan pengurangan panjang akar dan pucuk sekitar 45 % dan 35 % pada tanaman jagung setelah 18 hari ditumbuhkan dalam nutrisi yang mengandung ion Cd(II) 28,1 ppm, sedangkan ion Cd(II) 11,2 ppm tidak mempunyai pengaruh terhadap pertumbuhan akar.

Pada tanah Typic Dystrudepts dan Typic Hapluderts pencemaran Kadmium dapat menurunkan bobot jerami dan hasil beras. Batas kritis atau konsentrasi maksimum Kadmium yang diperkenankan dalam beras untuk dikonsumsi adalah $0,2 \text{ mg kg}^{-1}$ (Harada, 2003 dalam Suganda *et al.*, 2006). Batas kritis konsentrasi Kadmium dalam larutan tanah Typic Dystrudepts dan Typic Hapluderts adalah masing-masing 6,9 dan $3,9 \text{ mg kg}^{-1}$ (Suganda *et al.*, 2006). Industri juga meningkatkan konsentrasi Kadmium pada sawah seluas 106 ha di Karawang dan Bekasi dengan pencemaran Kadmium sekitar 4% tercemar dan 17% agak tercemar. Konsentrasi Kadmium pada tanaman jagung yang ditanam pada lahan dekat industri sebesar 28,1 ppm, sedangkan pada bawang merah sebesar 0,135 - 0,285 ppm (Adi, 2003).

2.2. Tanaman Koro Benguk (*Mucuna pruriens*)

2.2.1. Morfologi Koro Benguk (*Mucuna pruriens*)

Batang koro benguk menjalar atau merambat dengan panjang 3 hingga 18 m. Daun terdiri dari 3 helaian besar, oval dan lebih pendek dibanding tangkai. Bunga tumbuh dalam 2 atau 3 rantai tandan, warna bervariasi dari putih hingga ungu gelap dengan panjang bunga 2,5 hingga 3,2 cm. Polong berambut, memiliki panjang dapat lebih dari 15 cm dan memiliki 3 hingga 6 biji per polong. Biji sering belang-belang, kadang berwarna homogen putih, coklat atau hitam. Panjang akar 7 hingga 10 m dengan bintil berlebih didekat permukaan tanah.

Biji koro benguk mempunyai kulit biji yang keras dan strukturnya terdiri dari lapisan sel-sel serupa palisade ber dinding tebal terutama di permukaan paling luar, dan bagian dalamnya mempunyai lapisan lilin dan bahan kutikula. Biji legum memiliki kulit biji yang berubah menjadi *impermeable* karena sel-sel mengkerut selama pengeringan sehingga pergerakan air terbatas yang mengakibatkan pengerasan. Biji legume mempunyai struktur hilum yang memudahkan air meninggalkan benih namun tidak dapat masuk kembali.

Tanaman koro benguk merupakan tanaman leguminosa. Tanaman leguminosa mempunyai 2 periode tumbuh yaitu periode vegetatif dan periode reproduktif (generatif) (Staff, 2002). Periode vegetatif ialah periode tumbuh mulai munculnya tanaman di permukaan tanah hingga terbentuknya bunga pertama (McWilliams *et al.*, 1999). Periode generatif dicirikan dengan mulai keluarnya bunga pertama hingga polong masak (Adisarwanto dan Riwanodja, 1998). Menurut Hidayat (1992), periode vegetatif dihitung sejak tanaman muncul dari dalam tanah. Setelah fase kotiledon, maka pendanaan fase vegetatif berdasarkan jumlah buku (Staff, 2002).

2.2.2. Budidaya Koro Benguk (*Mucuna pruriens*)

Teknologi budidaya koro benguk lebih sederhana daripada budidaya kacang-kacangan (Leguminosa) lainnya. Tanaman Koro Benguk mampu tumbuh baik dilahan kurang subur bahkan pada lahan yang sangat kritis. Oleh karena itu budidaya Koro Benguk potensial untuk digunakan sebagai tanaman revegetasi lahan bekas tambang (Pandiangan, 2008).

Budidaya tanaman koro benguk menurut Pandiangan (2008) adalah sebagai berikut :

1. Pengolahan Tanah

Pengolahan tanah bertujuan untuk menggemburkan tanah, memudahkan dalam penanaman serta meningkatkan kesuburan tanah. Pengolahan tanah dilakukan dengan membuang sisa-sisa tanaman maupun rumput liar yang dapat mengganggu pertumbuhan tanaman, membuat bedengan, dan mencangkul tanah. Dengan pengolahan tanah maka akar tanaman akan lebih leluasa menembus pori-pori tanah sehingga dapat

mencari unsur hara yang diperlukan. Sedangkan pada lahan miring sebaiknya tidak diolah dengan intensif karena jika hujan akan mempercepat erosi.

2. Benih dan Perkecambahan

Biji atau buah polong koro benguk yang digunakan sebagai benih berasal dari biji yang sudah tua (masak dipohon) dengan tanda-tanda yaitu biji yang sudah tua kulitnya licin dan agak mengkilap serta tidak keriput dan bentuknya normal, utuh jangan terlalu kecil dan jangan terlalu besar. Untuk mempercepat perkecambahan biji, sebelum ditanam sebaiknya biji koro benguk direndam terlebih dulu dalam air selama 24 jam kemudian ditiriskan.

3. Penanaman

Koro benguk dapat ditanam secara monokultur maupun tumpang sari baik dilahan pekarangan maupun lahan tegalan. Agar pertumbuhan tanaman optimal maka pemilihan varietas koro benguk perlu diperhatikan. Sebagai contoh bila akan ditanam secara tumpang sari maka varietas putih lebih cocok karena merupakan tanaman perdu, tumbuh tegak dan tidak menjalar sehingga tidak mengganggu tanaman pokoknya. Sebaliknya varietas blirik, putih, kusam dan hitam mempunyai sifat menjalar dan sangat cocok sebagai tanaman konservasi karena cepat menutup tanah dengan sempurna.

4. Waktu Tanam

Waktu tanam sebaiknya dilakukan pada awal musim penghujan sehingga pada saat curah hujan tinggi daunnya sudah menutup tanah dan perakarannya sudah kuat. Cara tanam dengan ditugal, kemudian diisi benih 2-3 biji/lubang. Dibuatkan ajir atau lanjaran dengan ketinggian 1.5 meter. Jarak tanam koro benguk tergantung dari pola tanamnya serta kondisi lahan, biasanya 20cm x 30cm.

5. Pemupukan

Tanaman koro benguk sebenarnya tidak membutuhkan pupuk, karena dapat tumbuh sangat baik pada lahan yang kurang subur serta responabilitinya terhadap pupuk juga rendah. Hanya bila ditanam pada

tanah yang sangat kritis, maka diperlukan pemupukan dengan pupuk SP36 sebanyak 32 kg ha⁻¹ dilakukan pada saat tanaman masih muda (kurang lebih umur 1 bulan).

6. Pemeliharaan

Penyulaman dilakukan secepatnya apabila pada awal tanam terlihat biji yang tidak tumbuh. Penyiangan dilakukan pada saat tanaman berumur (1-1.5 bulan). Penyiraman dilakukan setiap hari apabila dibudidayakan pada lahan kering.

2.3. Mikoriza

Mikoriza berasal dari kata miko/*mykes* yang berarti jamur, sedangkan riza yang berarti akar tanaman. Struktur yang terbentuk dari asosiasi ini tersusun secara beraturan dan memperlihatkan spektrum yang sangat luas baik dalam hal tanaman inang, jenis jamur maupun penyebarannya. Prinsip kerja dari mikoriza adalah menginfeksi sistem perakaran tanaman inang, memproduksi jalinan hifa secara intensif sehingga tanaman yang terinfeksi mikoriza tersebut akan mampu meningkatkan kapasitas dalam penyerapan unsur hara. Pada saat mikoriza mengangkut air dan unsur hara mineral dari tanah ke tanaman, mikoriza mengambil keuntungan dari senyawa karbon yang disediakan tumbuhan inang. Oleh karena itu mikoriza dan tanaman inang membentuk suatu hubungan yang saling menguntungkan. Secara umum mikoriza didaerah tropis tergolong dalam 2 tipe, yaitu:

1. Ektomikoriza

Ektomikoriza ditandai oleh satu sarung pelindung eksternal dari sel-sel fungal yang melingkupi akar, seringkali menembus antara sel-sel epidermis dan sel-sel awal korteks dan hifa menginfeksi akar (Turk, 2006). Ektomikoriza lebih umum ditemukan di pohon-pohon hutan seperti cemara dan eucalyptus. Ektomikoriza sebagian besar termasuk kelas Basidiomycetes (Sieverding, 1991).

2. Endomikoriza

Endomikoriza ditandai oleh pertumbuhan jamur antar dan intrasel di dalam korteks akar membentuk struktur jamur yang spesifik, dikenal

sebagai vesikular dan arbuskular. Struktur ini memberi endomikoriza nama lain, yaitu vesikular arbuskular mikoriza (VAM). VAM merupakan mikoriza yang paling banyak terdapat pada perakaran tumbuhan. Kira-kira 80% dari semua spesies tumbuhan darat membentuk simbiosis tipe ini (Smith dan Read, 1997).

Efisiensi penyerapan hara meningkat pada akar yang terinfeksi mikoriza daripada akar tanpa mikoriza disebabkan oleh pengambilan dan pengangkutan aktif hara oleh mikoriza (Quilambo, 2003). Perolehan hara yang efektif oleh VAM secara umum melekat pada pertumbuhan hifa yang luas diluar zona penipisan hara yang melingkupi akar. Turk (2006) menjelaskan bahwa pengaruh VAM dalam meningkatkan pengambilan nitrogen dan hara mikro bisa dihubungkan dengan dua situasi. Pertama, hifa mikoriza bertindak sebagai perluasan akar tanaman, peningkatan luas permukaan akar dan menjelajah volume tanah lebih besar, yang akan meningkatkan kesempatan dalam pengambilan hara mikro. Kedua, asosiasi mikoriza dengan akar tanaman juga meningkatkan translokasi antara akar dan tunas pada tanaman yang terinfeksi, karena itu pertumbuhan tanaman meningkat. Pada akar bermikoriza kerusakan jaringan korteks tidak akan bersifat permanen. Akar bermikoriza akan cepat pulih, karena hifanya masih mampu menyerap air pada pori tanah, dan penyebaran hifa yang luas akan dapat menyerap air lebih banyak (Querejeta *et al.* 2003). VAM dapat meningkatkan penyerapan beberapa hara, seperti : Fosfor, Nitrogen, Calsium, Magnesium, Zinc, Tembaga, Kalium, Besi, Kadmium, Nikel, dan Uranium (Quilambo, 2003).

Mikoriza juga dapat berfungsi sebagai pelindung biologi bagi terjadinya infeksi 8 patogen akar, perlindungan ini terjadi karena adanya lapisan hifa sebagai pelindung fisik dan antibiotika yang dikeluarkan oleh mikoriza dan menghasilkan beberapa zat pengatur tumbuh. Fungi mikoriza dapat menghasilkan hormon auksin, sitokinin, gibberelin, dan vitamin yang bermanfaat untuk inangnya (Allen *et al.*, 2003; Dell, 2002). Auksin dapat berfungsi untuk mencegah atau menghambat proses penuaan akar sehingga umur dan fungsi akar dapat diperpanjang. Manfaat lainnya ialah beberapa fungi ektomikoriza menghasilkan tubuh buah yang dapat dimakan/dikonsumsi oleh manusia, sehingga memberikan

hasil hutan non kayu yang bernilai ekonomi dan gizi tinggi (Hall *et al.*, 2003; Yamada *et al.*, 2001).

Menurut Atmaja (2001) *dalam* Sari (2012) mengatakan bahwa pertumbuhan mikoriza sangat dipengaruhi oleh faktor lingkungan seperti :

1. Suhu

Suhu yang relatif tinggi akan meningkatkan aktivitas cendawan. Untuk daerah tropika basah, hal ini menguntungkan. Proses perkecambahan membentuk MVA melalui tiga tahap yaitu perkecambahan spora di tanah, penetrasi hifa ke dalam sel akar, dan perkembangan hifa di dalam konteks akar. Suhu optimum untuk perkecambahan spora sangat beragam tergantung jenisnya. Beberapa *Gigaspora* yang diisolasi dari tanah Florida, di wilayah subtropika mengalami perkecambahan paling baik pada suhu 34°C, sedangkan untuk spesies *Glomus* yang berasal dari wilayah beriklim dingin, suhu optimal untuk perkecambahan adalah 20°C. Penetrasi dan perkecambahan hifa di akar peka pula terhadap suhu tanah. Pada umumnya infeksi oleh cendawan MVA meningkat dengan naiknya suhu. Schreder (1974) *dalam* Sari (2012) menemukan bahwa infeksi maksimum oleh spesies *Gigaspora* yang diisolasi dari tanah Florida terjadi pada suhu 30-33°C. Suhu yang tinggi pada siang hari (35°C) tidak menghambat perkembangan dan aktivitas fisiologis MVA. Peran mikoriza hanya menurun pada suhu di atas 40°C. Suhu bukan merupakan faktor pembatas utama dari aktifitas MVA. Suhu yang sangat tinggi berpengaruh terhadap pertumbuhan tanaman inang. MVA mungkin lebih mampu bertahan terhadap suhu tinggi pada tanah bertekstur berat dari pada di tanah berpasir.

2. Kadar air tanah

Untuk tanaman yang tumbuh di daerah kering, adanya MVA menguntungkan karena dapat meningkatkan kemampuan tanaman untuk tumbuh dan bertahan pada kondisi yang kurang air (Vesser *et al.*, 1984 *dalam* Sari, 2012). Adanya MVA dapat memperbaiki dan meningkatkan kapasitas serapan air tanaman inang. Ada beberapa dugaan mengapa tanaman bermikoriza lebih tahan terhadap kekeringan diantaranya adalah:

(1) adanya mikoriza resitensi akar terhadap gerakan air menurun sehingga transfer air ke akar meningkat; (2) tanaman kekurangan P lebih peka terhadap kekeringan, adanya MVA menyebabkan konsentrasi unsur P tanaman meningkat sehingga menyebabkan daya tahan terhadap kekeringan meningkat pula; (3) adanya hifa yang berada di luar akar menyebabkan tanaman ber-MVA lebih mampu mendapatkan air daripada yang tidak ber-MVA tetapi jika mekanisme ini yang terjadi berarti konsentrasi logam-logam lebih cepat menurun. Penemuan akhir-akhir ini yang menarik adanya hubungan antara potensial air tanah dan aktifitas mikoriza. Pada tanaman bermikoriza jumlah air yang dibutuhkan untuk memproduksi 1 gram bobot kering tanaman lebih sedikit daripada tanaman yang tidak bermikoriza; (4) tanaman mikoriza lebih tahan terhadap kekeringan karena pemakaian air yang lebih ekonomis; (5) pengaruh tidak langsung karena adanya miselin eksternal menyebabkan MVA efektif didalam mengagregasi butir-butir tanah sehingga kemampuan tanah menyimpan air meningkat.

3. pH tanah

Cendawan pada umumnya lebih tahan terhadap perubahan pH tanah. Meskipun demikian daya adaptasi masing-masing spesies cendawan MVA terhadap pH tanah berbeda-beda, karena pH tanah mempengaruhi perkecambahan, perkembangan dan peran mikoriza terhadap pertumbuhan tanaman. *Glomus fasciculatus* berkembang biak pada pH masam. Pengapuran menyebabkan perkembangan *G. fasciculatus* menurun (Mosse, 1981 dalam Atmaja, 2001). Demikian pula peran *G. fasciculatus* dalam meningkatkan pertumbuhan tanaman pada tanah masam menurun akibat pengapuran (Santoso, 1985 dalam Sari, 2012). Pada pH 5,1 dan 5,9 *G. fasciculatus* menampakkan pertumbuhan yang terbesar, *G. fasciculatus* memperlihatkan pengaruh yang lebih besar terhadap pertumbuhan tanaman jika pH 5,1. *G. Mosseae* memberikan pengaruh terbesar pada pH netral sampai alkalis (pH 6,0-8,1). Perubahan pH tanah melalui pengapuran biasanya berdampak merugikan bagi perkembangan MVA asli yang hidup pada tanah tersebut sehingga pembentukan mikoriza menurun

(Santosa, 1989 *dalam* Sari, 2012). Untuk itu kegiatan pengapuran bersamaan dengan tindakan inokulasi dengan cendawan MVA yang cocok agar pembentukan mikoriza terjamin.

4. Bahan organik tanah

Bahan organik merupakan salah satu komponen penyusun tanah yang penting disamping air dan udara. Jumlah spora MVA tampaknya berhubungan erat dengan konsentrasi bahan organik didalam tanah. Jumlah maksimum spora ditemukan pada tanah-tanah dengan bahan organik 1-2 % sedangkan pada tanah-tanah berbahan organik kurang dari 0,5 % konsentrasi spora sangat rendah (Pujiyanto, 2001 *dalam* Sari, 2012). Residu akar mempengaruhi ekologi cendawan MVA, karena serasah akar yang terinfeksi mikoriza merupakan sarana penting untuk mempertahankan generasi MVA dari satu tanaman ke tanaman berikutnya. Perasah akar tersebut terdapat hifa, vesikel, dan spora yang dapat menginfeksi MVA. Disamping itu juga berfungsi sebagai inokulasi untuk tanaman berikutnya.

5. Cahaya dan ketersediaan hara

Gardemann (1983) *dalam* Sari (2012) menyatakan bahwa dalam intensitas cahaya yang tinggi konsentrasi nitrogen atau fosfor rendah akan meningkatkan jumlah karbohidrat di dalam akar sehingga membuat tanaman lebih peka terhadap infeksi cendawan MVA. Derajat infeksi terbesar terjadi pada tanah-tanah yang mempunyai kesuburan yang rendah. Pertumbuhan perakaran yang sangat aktif jarang terinfeksi oleh MVA. Jika pertumbuhan dan perkembangan akar menurun infeksi MVA meningkat. Peran mikoriza erat dengan ketersediaan Pospor (P) bagi tanaman. Hal tersebut menunjukkan hubungan antara mikoriza dan status P tanah. Pada wilayah beriklim sedang konsentrasi P tanah yang tinggi menyebabkan menurunnya infeksi MVA yang disebabkan konsentrasi P internal yang tinggi dalam jaringan inang (Santosa, 1989). Hayman (1975) *dalam* Sari (2012) melaksanakan penelitian pemupukan N dan P terhadap MVA pada tanah di wilayah beriklim sedang. Pemupukkan N (188 kg N/ha) berpengaruh buruk terhadap populasi MVA. Petak yang tidak dipupuk

dengan jumlah spora 2 hingga 4 kali lebih banyak dan infeksi mikoriza 2 hingga 4 kali lebih tinggi dibandingkan petak yang menerima pemupukkan. Hayman (1975) dalam Sari (2012) mengamati bahwa pemupukkan N lebih berpengaruh daripada pemupukkan P, tetapi peneliti lain mendapatkan keduanya memiliki pengaruh yang sama.

6. Logam berat dan unsur lain

Pada percobaan dengan menggunakan tiga jenis tanah dari wilayah iklim sedang didapatkan bahwa pengaruh menguntungkan karena adanya MVA menurun dengan naiknya konsentrasi Aluminium dalam tanah. Aluminium diketahui menghambat muncul jika ke dalam larutan tanah ditambahkan kalsium (Ca). Jumlah Ca didalam larutan tanah rupa-rupanya mempengaruhi perkembangan MVA. Tanaman yang ditumbuhkan pada tanah yang memiliki derajat infeksi MVA yang rendah. Hal ini mungkin karena peran Ca^{2+} dalam memelihara integritas membran sel. Beberapa spesies MVA diketahui mampu beradaptasi dengan tanah yang tercemar Zink (Zn), tetapi sebagian besar spesies MVA peka terhadap konsentrasi Zn yang tinggi. Pada beberapa penelitian lain diketahui bahwa cendawan MVA tertentu toleran terhadap konsentrasi Mn, Al dan Na yang tinggi.

7. Fungisida

Fungisida merupakan racun kimia yang diracik untuk membunuh cendawan penyebab penyakit pada tanaman, akan tetapi selain membunuh cendawan penyebab penyakit fungisida juga dapat membunuh mikoriza, dimana pemakaian fungisida ini menurunkan pertumbuhan dan kolonisasi serta kemampuan mikoriza dalam menyerap P.

Salah satu jenis mikoriza yang dapat membantu proses fitoremediasi ialah mikoriza dengan genus *Glomus*. *Glomus mosseae* toleran terhadap Kadmium, bertanggungjawab untuk pengambilan, pengangkutan dan imobilisasi Kadmium. Menurut Liao (2003), *Glomus caledonium* memberi harapan jamur mikoriza untuk bioremediasi logam berat pada tanah yang terkontaminasi.

2.4. Fitoremediasi

Salah satu teknik dalam memperbaiki kualitas lingkungan yang tercemar adalah dengan teknik fitoremediasi. Menurut Priyanto dan Prayitno (2006), fitoremediasi berasal dari kata *phyto* (asal kata Yunani *phyton*) yang berarti tumbuhan/tanaman (*plant*) dan kata *remediation* (asal kata Latin *remediare* = *to remedy*) yaitu memperbaiki/menyembuhkan atau membersihkan sesuatu. Dengan demikian fitoremediasi dapat didefinisikan sebagai penggunaan tumbuhan untuk menghilangkan, memindahkan, menstabilkan, atau menghancurkan bahan pencemar baik itu senyawa organik maupun anorganik.

Menurut Mangkoedihardjo (2005), ITRC (2001) bahwa proses fitoremediasi secara umum dibedakan berdasarkan mekanisme fungsi dan struktur tumbuhan. Secara umum membuat klasifikasi proses sebagai berikut:

1. Fitostabilisasi (*phytostabilization*)

Akar tumbuhan melakukan imobilisasi polutan dengan cara mengakumulasi, mengabsorpsi pada permukaan akar dan mengendapkan presipitat polutan dalam zona akar. Proses ini secara tipikal digunakan untuk dekontaminasi zat-zat anorganik dengan minyak yaitu sulfur, nitrogen, dan beberapa logam berat (sekitar 2-50% konsentrasi minyak).

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

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

3. Rizofiltrasi (*rhizofiltration*)

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

4. Fitodegradasi/fitotransformasi (*phytodegradation*)

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

5. Rizodegradasi (*rhizodegradation/ phytostimulation*)

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

6. Fitovolatilisasi (*Phytovolatilization*)

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

Salah satu mekanisme tanaman dalam proses fitoremediasi adalah dengan menyerap logam dan mengakumulasi ke dalam biomas tanaman. Proses fitoremediasi dengan menyerap polutan disebut fitoekstraksi. Tanaman yang mempunyai mekanisme fitoekstraksi disebut sebagai akumulator. Untuk tanaman yang mempunyai kemampuan mengakumulasi lebih dari 1.000 mg/kg biomas (Ni, Cu, Co, Cr atau Pb) atau lebih dari 10.000 mg/kg biomas untuk logam Zn atau Mn disebut sebagai hiperakumulator (Bakot *et al.*, 1988).

Tumbuhan yang hidup pada lahan dengan akumulasi logam tinggi memiliki protein pengikat logam atau peptida yang diberi nama fitokelatin (PCs) yang mirip dengan metalothionin pada mamalia (Chaney *et al. dalam* Widyati, 2011). Penelitian akumulasi nikel pada *Thlaspi goesingense* dan *T. Arvense* menunjukkan bahwa kemampuan kedua tanaman tersebut dalam mengakumulasi Ni menjadi kompleks Ni-asam organik dibantu oleh senyawa sitrat yang terdapat dalam dinding sel, vakuola dan sitoplasma sel (Rathinasabapathi *et al.*, 2006). Sedangkan kemampuan akumulasi logam pada tumbuhan *Brassica juncea* ditentukan oleh ATP surfulilase. Tumbuhan ini mampu mengakumulasi As(III), As(V), Cd, Cu, Hg, dan Zn dalam biomasnya (Gratao *et al.*, 2005).

Mekanisme lain dikembangkan oleh tumbuhan *Astragalus bisulcatus* untuk mengakumulasi selenium (Se) tanpa meracuni dirinya sendiri adalah dengan menghasilkan protein *selenocysteine methyltransferase* (SMT) terutama *methylates selenocysteine* (SeCys) (Gratao *et al.*, 2005). Telah disebutkan di atas bahwa salah satu syarat yang harus dimiliki oleh hiperakumulator adalah toleran

pada konsentrasi logam berat yang tinggi. Namun demikian, ternyata antara toleran dan akumulasi merupakan sifat yang saling independen (Peer *et al.*, 2008). Sifat toleran ditentukan oleh konsentrasi glutathion (GSH), sistein (Cys), O-acetyl-L-serine (OAS) sedangkan kemampuan mengakumulasikan logam berat pada jaringan dipengaruhi oleh konsentrasi *serine acetyltransferase* (SAT) dan aktivitas glutathion reduktase (Peer *et al.*, 2008).

Untuk dapat masuk ke dalam jaringan tanpa meracuni tanaman, logam berat harus diubah menjadi bentuk yang kurang toksik melalui reaksi kimiawi atau pembentukan kompleks dengan metabolit sekunder yang dihasilkan oleh tanaman (Peer *et al.*, 2008). Tanaman umumnya mengeluarkan kelompok thiol sebagai pengkelat (*ligand*), tetapi banyak juga metabolit yang dikeluarkan sebagai *ligand* tergantung jenis logam yang akan dikelat (Tabel 1). Untuk dapat menyerap logam berat tumbuhan hiperakumulator membuat analog seolah-olah mereka menyerap unsur-unsur hara yang diperlukan dalam metabolismenya (Peer *et al.*, 2008). Sehingga mereka membuat jalur seperti ketika mereka menyerap unsur hara tersebut. Untuk membuat analog tersebut mereka memerlukan ligan-ligan organik. Tumbuhan hiperakumulator menganalogkan logam berat dan ligan yang diperlukan disajikan pada Tabel 1 berikut :

Tabel 1. Logam-logam Berat dan Ligan Organik yang Diperlukan untuk Membentuk Kompleks dalam Jaringan Tanaman (Peer *et al.*, 2008).

| Logam | Analog dengan | Ligan Organik |
|---------------|----------------|---|
| Arsen (As) | P | Phytochelatin, thiols, glutathione, asam askorbat |
| Kadmium (Cd) | Zn, Fe | Phytochelatin, thiols, glutathione, γ -glutamylcysteine |
| Krom (Cr) | Mn | Thiols |
| Tembaga (Cu) | Cu | Sitrat, metalotionin, phytochelatin 2, phytochelatin 3 |
| Merkuri (Hg) | Difusi positif | Thiols |
| Nikel (Ni) | Fe | Nicotianamine, histidin, thiols, sitrat |
| Timbal (Pb) | Zn | Fe Glutathione |
| Selenium (Se) | S | Sistein |
| Seng (Zn) | Zn | Phytochelatin, thiols, glutathione, γ -glutamylcysteine, sitrat, malat |

Suatu jenis tumbuhan dikategorikan sebagai spesies hiperakumulator ketika mereka memenuhi persyaratan sebagai berikut:

1. Toleran terhadap konsentrasi logam yang tinggi sehingga pertumbuhan akar dan pucuk tidak mengalami hambatan. Tanaman yang toleran tidak akan terganggu pertumbuhannya meskipun mereka tumbuh pada tanah dengan toksisitas yang tinggi. Toleransi ini diduga berasal dari kemampuan untuk menyimpan logam dalam vakuola sel atau mampu mengkelat logam-logam (Chaney *et al.*, 1997).
2. Mampu menyerap logam yang terdapat dalam larutan tanah dengan cepat. Kecepatan penyerapan logam ditentukan oleh jenis tumbuhan dan macam logam yang diserap. *Thlaspi caerulescens* mampu mengakumulasi Zn 10,000 mg kg⁻¹ biomas (Chaney *et al.*, 1997).
3. Mampu mentranslokasikan suatu unsur logam dari akar ke bagian pucuk tanaman dengan kecepatan tinggi. Beberapa tumbuhan hiperakumulator ditemukan mampu mentransfer Zn, Kadmium atau Ni 10 kali lebih cepat daripada non hiperakumulator, sehingga konsentrasi logam pada jaringan pucuk jauh lebih besar daripada yang terdapat pada jaringan akarnya (Chaney *et al.*, 1997).
4. Harus mampu menghasilkan biomas yang tinggi dalam waktu yang cepat (cepat tumbuh), mudah dibudidayakan dan mudah dipanen, lebih baik yang dapat dipanen berkali-kali dalam setahun (Peer *et al.*, 2008).

Contoh dari tanaman yang dapat menyerap Kadmium antara lain *Thlaspi caerulescens* kelompok famili Brassicaceae yang mampu mengakumulasi Kadmium sebesar 1.000 ppm tanpa menunjukkan gejala keracunan, *Bassica juncea*, *Thlaspi caerulescens*, *Pistia stratiotes*, sawi hijau (*Brassica juncea*), jukut pait (*Axonopus compressus*), kacang hijau (*Vigna radiata*) (Pence, 2000; Widyati, 2011). Tanaman kangkung darat (*Ipomoea reptans*) juga dapat menyerap logam Kadmium hingga 1340 ppm (Liong, 2012).