

REMEDIASI TANAH TERCEMAR LOGAM BERAT

Remediasi Tanah Tercemar Logam Berat



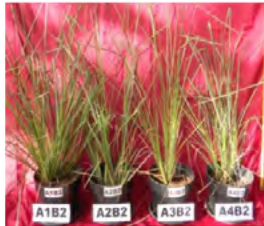
Office : Kampus Unitri
Jl. Telaga Warna, Tlogomas, Malang
Telp. (0341) 565500 Fax (0341) 565522
E-mail : uptpenerbitan@gmail.com



Dr. Ir. Amir Hamzah, MP.
Dr. Ir. Rossyda Priyadarshini, MP.

Activ
Go to !

REMEDIASI TANAH TERCEMAR LOGAM BERAT



Dr. Ir. Amir Hamzah, MP.

Dr. Ir. Rossyda Priyadarshini, MP.



Penerbit : UNITRI Press

Jalan Telagawarna Blok C Tlogomas Malang

Telp (0341) 565500 Fax (0341) 565522

Remediasi Tanah Tercemar Logam Berat

Penulis :

1. Dr. Ir. Amir Hamzah, MP.
2. Dr. Ir. Rossyda Priyadarshini, MP.

ISBN : 978-602-61153-7-9

Editor :

Ronasari Mahaji Putri, S.KM.,M.Kes

Tata Letak :

Galuh Widhi Gumilar, S.Kom

Ronasari Mahaji Putri, S.KM.,M.Kes

Grafis & Desain Sampul:

Galuh Widhi Gumilar, S.Kom

Remediasi Tanah Tercemar Logam Berat

Cetakan : I-Malang

2019

vii : 90 hlm : 15,5 x 23 cm

Hak Cipta dilindungi Undang-Undang

Dilarang mengutip, memperbanyak dan menterjemahkan sebagian atau seluruh isi buku ini tanpa ijin tertulis dari penerbit.

Cetakan pertama : September 2019

Penerbit : UNITRI Press

Anggota IKAPI



UNITRI Press

Jalan Telagawarna Blok C Tlogomas Malang

Telp (0341) 565500 Fax (0341) 565522

ISBN : 978-602-61153-7-9



Kata Pengantar Pakar

Pencemaran lingkungan khususnya di tanah pertanian saat ini menjadi perhatian serius, baik ditingkat nasional maupun global karena berkaitan dengan kesehatan pangan. Indonesia memiliki potensi sumberdaya lahan yang cukup luas, namun sebagian diantaranya telah mengalami pencemaran. Sumber pencemaran terbesar berasal dari antropogenik, seperti industri pertambangan dan penggunaan bahan agrokimia yang berlebihan.. Budidaya pertanian dengan menggunakan bahan agrokimia memberi dampak positif terhadap peningkatan produksi pertanian, namun disisi lain residu bahan agrokimia dapat memberikan dampak negatif terhadap kesehatan tanah. Sebagian produk pangan yang di konsumsi sehari-hari tidak tertutup kemungkinan telah terpapar logam berat yang bersumber dari bahan agrokimia. Langkah strategi yang dapat dilakukan untuk mengantisipasinya dengan cara pengendalian. Teknologi yang paling ideal dilakukan dengan memanfaatkan potensi sumberdaya lokal. Potensi sumberdaya lokal sebagai agen fitoremediasi cukup tersedia disekitar kita sehingga dapat digunakan untuk mengendalikan pencemaran tanah.

Penulisan buku ini berisi sumber pencemaran dan teknologi pengendalian dengan menggunakan tanaman indigenous. Buku ini merupakan hasil-hasil penelitian yang berkaitan dengan pengendalian pencemaran tanah atau remediasi baik yang dilakukan oleh kedua penulis maupun para peneliti yang lain. Hal yang diungkap sangat relevan dengan permasalahan yang dihadapi saat ini. Teknologi remediasi merupakan salah satu teknologi pengendalian tanah tercemar yang mudah dan murah karena memanfaatkan jasa tanaman. Teknknologi ini menjadi salah satu langkah strategi dibidang pertanian untruk memulihkan lingkungan agar tetap berkelanjutan.

Penerbitan buku ini tentunya dapat menjadi rujukan bagi para pemerhati lingkungan terutama pengendalian pencemaran tanah. Pengungkapannya secara spesifik tentang remediasi tanah tercemar dengan bahasa yang mudah difahami, sehingga dapat digunakan sebagai salah satu referensi bagi mahasiswa, dosen maupun praktisi yang peduli terhadap pengendalian pencemaran tanah. Semoga buku ini dapat berkontribusi bagi terwujudnya pangan yang sehat, karena tanah yang sehat akan menghasilkan pangan yang sehat.

Malang, 15 September 2019

Prof. Dr. Ir. Bambang Guritno



Isu pencemaran tanah dan tanaman saat ini menyedot perhatian banyak pihak. Hal ini berkaitan dengan produktivitas lahan dan kesehatan tanaman. Faktor penyebabnya cukup beragam, diantaranya penggunaan bahan agrokimia berupa pupuk dan pestisida yang melampaui batas, serta sumber pencemaran lain. Kondisi ini jika tidak diatasi, akan berdampak buruk pada kesehatan manusia dan generasi berikutnya. Aktivitas penambangan emas yang membuang tailing disekitar lahan serta penggunaan pupuk dan pestisida yang melampaui batas ikut memicu akumulasi logam berat di dalam tanah dan merusak lingkungan. Upaya mitigasi terus dilakukan, namun belum mampu memberikan dampak yang signifikan. Penyelesaian yang masih bersifat parsial merupakan penyebabnya, sehingga diperlukan penyelesaian secara holistik.

Buku ini mencoba mengungkap beberapa hasil penelitian yang dilakukan untuk memberikan kontribusi dalam meremediasi logam berat pada tanah pencemaran. Remediasi tanah tercemar yang efektif adalah dengan memanfaatkan potensi sumberdaya lokal. Indonesia memiliki sumberdaya lokal yang potensial untuk dikembangkan sebagai agen fitoremediasi. Kemampuan tanaman jika dikombinasi dengan biochar juga mampu memberikan kontribusi besar dalam meremediasi logam berat. Kontribusi ini diharapkan akan menjadi langka maju untuk menyelamatkan lingkungan secara berkelanjutan.

Penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada semua pihak yang berkontribusi dalam penerbitan buku ini. Kepada Direktur Riset dan Pengabdian kepada Masyarakat (DRPM) Kemenristekdikti yang telah membiayai penelitian yang kami ajukan. Sebagian besar data yang kami ungkap dalam buku ini adalah hasil penelitian. Semoga buku ini bermanfaat bagi mahasiswa dan pembaca yang memerlukan.

Malang, 15 September 2019

Penulis



Kata Pengantar Pakar.....	iii
Kata Pengantar	iv
Daftar Isi.....	v
Daftar Gambar	vii
Daftar Tabel	ix
Bab 1 Pendahuluan.....	1
A. Pengertian Pencemaran	1
B. Pencemaran Tanah.....	2
C. Pencemaran Air.....	3
Bab 2 Sumber-sumber Pencemaran	6
A. Pencemaran Lahan Pertanian	7
B. Logam Berat dan Dampaknya	10
C. Karakteristik Logam Berat Merkuri (Hg) dan Timbal (Pb).....	12
Bab 3 Remediasi Tanah Tercemar	15
A. Fitoremediasi	16
B. Prospek Fitoremediasi.....	20
Bab 4 Detoksifikasi Logam Berat.....	22
A. Peran Tanaman Dalam Detoksifikasi Logam Berat	22
B. Penggunaan Biochar dan Tanaman untuk Detoksifikasi Logam Berat.....	23
C. Pengendalian Pencemaran Tanah dengan Tanaman <i>Indigenous</i>	25
Bab 5 Mekanisme Penyerapan Logam Berat	26
A. Mekanisme Penyerapan Logam Berat oleh Tanaman	26
B. Pelarutan Logam dari Matriks Tanah.....	27
C. Tumbuhan dan Remediasi Tanah Tercemar	29

Bab 6 Studi Kasus 1	31
Penggunaan Tanaman <i>Chromolaena odorata L.</i> , dan <i>Vetiveria zizanioides L.</i> , serta Bahan Organik untuk Meningkatkan Penyerapan Logam Berat	
A. Pendahuluan	31
B. Metode.....	32
C. Hasil.....	34
D. Konsentrasi Hg, Pb di Tanah, Serapan Hg, Pb dan Pertumbuhan Tanaman Remediator	45
E. Mekanisme dan Translokasi Hg, Pb pada Tanaman Remediator	47
Bab 7 Studi Kasus 2	51
Fitostabilisasi Lahan Pertanian Pasca Erupsi Gunung Kelud Dengan Tanaman <i>Indigenous</i>	
A. Latar Belakang.....	51
B. Permasalahan	52
C. Metode.....	53
D. Hasil.....	55
Bab 8 Studi Kasus 3	68
Fitoteknoremiasi dengan Tanaman <i>Indigenous</i> dan Biochar pada Sentra Hortikultura	
A. Latar Belakang.....	68
B. Permasalahan	69
C. Pencemaran Tanah oleh Logam Berat	70
D. Fitoremediasi Tanah Tercemar	71
E. Penggunaan Biochar dan Tanaman untuk Detoksifikasi Logam Berat.....	72
F. Metode	73
G. Pelaksanaan Penelitian	73
H. Hasil Penelitian.....	74
Daftar Pustaka	84
Biografi Penulis	90



Daftar Gambar

Gambar 2.1 Lahan pertanian tercemar	8
Gambar 2.2 Pencemaran air.....	9
Gambar 2.3 Gambar skema pencemaran lingkungan terhadap kesehatan manusia.....	10
Gambar 3.1 Fitoekstraksi.....	18
Gambar 3.2 Bioremediasi.....	19
Gambar 5.1 Mekanisme tanaman dalam proses akumulasi logam.....	26
Gambar 6.1 Konsentrasi Hg dan Pb Total dalam Tanah Sesudah Fitoremediasi dengan <i>C. odorata</i>	34
Gambar 6.2 Konsentrasi Hg dan Pb Tersedia dalam Tanah Sesudah Fitoremediasi dengan <i>Chromolaena odorata</i>	35
Gambar 6.3 Tanaman remediator yang mati pada perlakuan tanpa bahan amandemen.....	36
Gambar 6.4 Pertumbuhan Tanaman Remediator <i>Chromolaena odorata</i> Selama 12 Minggu Penanaman	37
Gambar 6.5 Tinggi Tanaman, Jumlah Daun dan Biomassa <i>Chromolaena odorata</i> pada Tanah Terkontaminasi Tailing yang diberikan Berbagai Bahan Amandemen	38
Gambar 6.6 Distribusi panjang akar <i>Chromolaena odorata</i> pada Berbagai Penambahan Macam Bahan Amandemen.....	39
Gambar 6.7 Serapan Merkuri (Hg) dan Timbal (Pb) pada bagian Tanaman <i>Chromolaena odorata</i>	40
Gambar 6.8 Konsentrasi Total Hg dan Pb di Tanah Terkontaminasi Tailing yang Diremediasi Menggunakan <i>Vetiveria zizanioides</i>	41
Gambar 6.9 Konsentrasi Hg dan Pb Tersedia di Tanah Terkontaminasi Tailing yang Diremediasi Menggunakan <i>Vetiveria zizanioides</i>	42
Gambar 6.10 Parameter Pertumbuhan (Jumlah anakan, Panjang akar, Tinggi Tanaman dan Biomassa) Tanaman Remediator <i>Vetiveria zizainoides</i> pada Berbagai Amandemen.	43
Gambar 6.11 Serapan Merkuri (Hg) dan Timbal (Pb) pada Bagian-bagian Tanaman <i>Vetiveria zizanioides</i>	45
Gambar 6.12 Hubungan antara Konsentrasi Total Hg, Pb di Tanah dengan Konsentrasi Serapan Hg, Pb di Tanaman.....	46

Gambar 7.1 Pertumbuhan tinggi tanaman dan jumlah daun yang ditanam pada tanah tercemar.....	62
Gambar 7.2 %Reduksi logam berat Hg dan Cd oleh tanaman remediator di KB.....	66
Gambar 7.3 % Reduksi logam berat Hg dan Cd oleh tanaman di KM.....	66
Gambar 8.1 Performa kedua jenis tanaman remediator yang ditanam pada lahan tercemar.....	76
Gambar 8.2 Tinggi dan Jumlah daun tanaman remediator yang ditanam pada lahan tercemar	76
Gambar 8.3 Irisan melintang tanaman (a) <i>Eleusine indica</i> (b) <i>Euphorbia hirta</i>	78
Gambar 8.4 Pemberian biochar terhadap penyerapan logam berat Pb dan Cd.....	81



Daftar Tabel

Tabel 2.1 Kandungan logam berat dalam tanah secara alamiah (mg kg^{-1})	13
Tabel 2.2 Nilai ambang batas kandungan logam berat	14
Tabel 6.1 Total serapan Hg dan Pb pada tanaman remediator <i>Chromolaena odorata</i> (mg kg^{-1})	39
Tabel 6.2 Total serapan Hg dan Pb pada tanaman remediator <i>Vetiveria zizainoides</i> (mg kg^{-1})	44
Tabel 6.3 Biomassa akar, bagian atas tanaman, Faktor Translokasi (FT) dan Faktor Bioakumulasi (BCF) pada masing-masing tanaman remediator	49
Tabel 7.1 Jenis fungisida dan insektisida yang digunakan beserta bahan aktif	56
Tabel 7.2 Hasil Analisa Tanah Tercemar	57
Tabel 7.3 Hasil analisis kimia abu gunung Kelud	58
Tabel 7.4 Hasil identifikasi dan nilai Indeks nilai Penting (INP)	61
Tabel 7.5 Biomassa akar, bagian atas tanaman, faktor transfer (FT) dan faktor biokonsentrasi (BCF) logam berat Cd pada masing-masing tanaman	64
Tabel 7.6. Biomassa akar, bagian atas tanaman, faktor transfer (FT) dan faktoriokonsentrasi (BCF) logam berat Hg pada masing-masing tanaman	65
Tabel 8.1 Hasil analisis tanah pasca remediasi	74

A. Pengertian Pencemaran

Kekayaan sumberdaya alam di Indonesia tidak perlu kita ragukan, namun tingkat eksploitasi dan eksplorasi juga cukup tinggi. Keadaan yang demikian turut memicu tingginya tingkat kerusakan terutama pada tanah dan air. Saat ini, kita selalu disuguhi dengan berbagai persoalan lingkungan yang menuntut segera diatasi. Sadar atau tidak hanya sebagian saja yang berupaya untuk mencari solusinya, sementara yang lain sibuk pula untuk meningkatkan pencemaran. Masalah pencemaran bukan persoalan baru yang kita hadapi, tetapi terjadi sejak dulu. Upaya pengendalianpun semakin kompleks, namun selalu kalah dengan tingkat kerusakan. Teknologi pencegahan dan pengendalian semakin kompleks dilakukan tetapi selalu kalah. Hal ini diakibatkan karena kebutuhan ekonomi lebih dominan dibandingkan dengan tingkat pengendalian. Pencemaran tanah akan berdampak pada kesehatan tanah. Kesehatan tanah terganggu akan berdampak pada kesehatan tanaman, Tanah menempati posisi yang sangat penting dalam hidup dan kehidupan manusia. Tanah memiliki fungsi penting sebagai ruang dan tempat berkembang biak mahluk hidup. Tanah juga memiliki fungsi produksi sebagai penghasil biomassa, dan juga sebagai konservasi sumberdaya air. Pemanfaatan tanah seharusnya dilakukan sesuai dengan kemampuannya, karena berkaitan dengan kepentingan generasi yang akan datang. Pemanfaatan keberlanjutan tanah dapat dilakukan apabila kegiatan pengendalian perusakan tanah sudah sesuai dengan baku mutu yang diinginkan.

Ditinjau dari penyebabnya, pencemaran tanah, dapat di bagi menjadi dua yaitu, terjadi dengan sendirinya yang disebabkan alam dan antropogenik atau ulah manusia. Pencemaran tanah adalah keadaan di mana polutan atau bahan kimia buatan masuk atau dimasukkannya polutan tersebut sehingga merubah lingkungan tanah alami. Pada lahan pertanian, pencemar tanah merupakan masalah yang perlu disikapi. Tanah tercemar biasanya mengandung sejumlah logam berat terutama Hg, Pb, Cd, Ni, Cn, dan As. Cemar logam berat akan mempengaruhi pertumbuhan tanaman, selanjutnya akan berdampak pada keamanan pangan dan kesehatan manusia. Teknologi remediasi sedapat mungkin dilakukan dengan biaya yang murah, karena selama ini teknik remediasi yang dilakukan memerlukan biaya yang mahal. McMahan *et al.* (2000) memperkirakan, untuk pembersihan dan perbaikan satu tailing spill misalnya pada pertambangan skala besar

memerlukan biaya sekitar US \$ 100 juta, sementara apabila menggunakan tanaman biayanya menjadi lebih murah. Penelitian penggunaan tanaman untuk fitoremediasi tanah yang pernah dilakukan hanya menghabiskan biaya antara \$ 2.500 – \$ 15.000 per hektar. Artinya bahwa penggunaan tanaman untuk merehabilitasi tanah jauh lebih murah dibandingkan dengan teknologi remediasi lainnya.

Perbaikan karakteristik tanah terutama tanah yang tercemar dengan kandungan hara rendah akan mempengaruhi pertumbuhan tanaman. Pertumbuhan tanaman yang baik akan mendorong peningkatan penyerapan logam berat. Kemampuan tanaman dalam menyerap logam berat selain dipengaruhi oleh tingkat kesuburan tanah, sistem penanaman dan *performance* tanaman, yang berhubungan dengan anatomis-morphologis tanaman. Tanaman yang digunakan sebagai remediator harus mampu menyerap logam berat dalam jumlah besar (EPA, 2001). Sejumlah peneliti telah menggunakan tanaman akumulator untuk menyerap logam berat (Reves, 2006 ; Robinson *et al.*, 2009). Beberapa diantara jenis tanaman tersebut bersifat hiperakumulator dan berada di wilayah beriklim sedang. Jenis-jenis tersebut perlu dieksplorasi terutama yang memiliki sifat adaptasi tinggi sesuai dengan iklim Indonesia dan dijadikan sebagai tanaman remediator.

B. Pencemaran Tanah

Pencemaran tanah adalah masuknya bahan tercemar berupa zat, energy atau komponen lingkungan hidup lain yang dilakukan oleh manusia maupun secara alami ke dalam tanah, akibatnya kualitas tanah menjadi menurun serta tidak sesuai lagi dengan peruntukannya. Permasalahan pencemaran tanah saat ini menjadi salah satu isu yang sering diperbincangkan oleh para pakar dibidang pertanian. Isu ini menjadi sangat strategis karena berkaitan dengan produktivitas dan kualitas tanah dan tanaman. Penyebab utama pencemaran selain erosi dan sedimentasi juga dipengaruhi oleh intensitas penggunaan bahan agrokimia berupa pupuk dan pestisida yang melampaui batas. Pencemaran tanah yang sangat krusial saat ini adalah adanya akumulasi logam berat di tanah seperti merkuri (Hg), timbal (Pb), kadmium (Cd), sianida (Cn), tembaga (Cu), dan seng (Zn). Jenis logam berat di atas terutama merkuri yang mencemari tanah sangat sulit untuk didegradasi, selanjutnya akan berdampak pada keamanan pangan.

Penggunaan bahan agrokimia diakui memberi kontribusi besar terhadap peningkatan produksi pangan nasional. Penggunaannya yang tidak terkontrol dan melampaui batas akan berdampak buruk terhadap kesehatan tanah. Pencemaran lahan pertanian di Indonesia terutama Pb, Cd, Cu, dan Zn pada lahan yang dikelola secara intensif dilaporkan telah melampaui nilai ambang batas. Kadar logam berat di beberapa sentra hortikultura juga telah melewati ambang batas. Kadar Pb pada bawang merah di sentra produksi bawang seperti Tegal dan Bekasi dilaporkan sekitar 3,67 mg kg⁻¹,

sementara ambang batas Pb dalam sayuran yang ditetapkan sebesar 2,0 mg kg⁻¹ (Adi, 2003). Begitu pula kadar Cd yang diperoleh sekitar 0,29 mg kg⁻¹, padahal ambang batasnya adalah 0,1 mg kg⁻¹. Subowo *et al*, (2004), telah terjadi pencemaran Pb sebesar 206-449 mg kg⁻¹ pada tanah sawah di kawasan industri Tangerang Jawa Barat. Di Batu Cd yang dilaporkan juga berkisar antara 1,96 – 2,26 mg kg⁻¹ (Hamzah, 2017)

Kegagalan mitigasi logam berat yang terkonsentrasi di tanah mengakibatkan mobilisasi logam berat ke dalam tanah, kemudian ditranslokasikan ke tanaman, Dampak berikutnya pada kesehatan manusia. Penggunaan bahan agrokimia pada beberapa sentra hortikultura berasal dari penggunaan pupuk maupun pestisida yang melampaui batas. Residu bahan agrokimia yang terakumulasi di tanah, selanjutnya diserap oleh tanaman dan menimbulkan bioakumulasi pada manusia yang mengonsumsinya. Logam berat dibagi menjadi dua yaitu logam berat esensial dan non esensial. Logam berat esensial adalah logam berat yang dibutuhkan oleh makhluk hidup dalam jumlah yang sedikit untuk mendukung fungsi fisiologi dan biokimia diantaranya Mn, Cu, Zn, Fe dan Ni. Sedangkan logam berat non esensial adalah logam berat yang tidak dibutuhkan oleh makhluk hidup dalam proses fisiologi antara lain Hg, Pb, Cd, Cr, dan As. Akumulasi logam berat ini sangat berbahaya terhadap kesehatan manusia. Pencemaran logam berat dan pengaruhnya terhadap kesehatan manusia melalui beberapa proses :

- (a) Kontak langsung dengan tanah yang tercemar,
- (b) Melalui rantai makanan (tanah-tanaman-manusia, atau tanah-tanaman-ternak-manusia),
- (c) Mengonsumsi air yang tercemar dll.

C. Pencemaran Air

Air merupakan kebutuhan hidup manusia yang paling utama, baik ditinjau dari kualitas maupun kuantitas. Permasalahan yang muncul saat ini di beberapa wilayah telah mengalami pencemaran, sehingga menjadi barang langka dan mahal. Sumber penyebab pencemaran terutama dari limbah industri dan limbah dari berbagai aktivitas manusia yang langsung dibuang ke air. Peraturan Pemerintah Nomor 20 tahun 1990, "Pencemaran air adalah masuk atau dimasukkannya makhluk hidup, zat, energy dan atau komponen lain ke dalam air oleh kegiatan manusia sehingga kualitas air turun sampai ke tingkat tertentu yang menyebabkan air tidak berfungsi lagi sesuai dengan peruntukannya. Indikator pencemaran air yang dapat diketahui adalah adanya perubahan yang dapat diamati diantaranya :

- (a) Secara fisik dapat dilihat dari tingkat kekeruhan, suhu, warna serta, bau dan rasa,
- (b) Secara kimiawi, diamati berdasarkan kelarutan zat kimia serta perubahan pH, dan
- (c) Secara biologis, dapat diamati dari ada atau tidaknya mikroorganisme dan bakteri pathogen.

Indikator umum yang sering dipakai untuk pemeriksaan pencemaran air antara lain pH, oksigen terlarut (Dissolved Oxygen, DO), kebutuhan oksigen biokimia (Biochemiycal Oxygen Demand, BOD) serta kebutuhan oksigen kimiawi (Chemical Oxygen Demand, COD). Kadar logam berat seperti merkuri (Hg), timbal (Pb), kadmium (Cd), seng (Zn), Sianida (Cn), di beberapa wilayah dilaporkan juga telah melewati ambang batas. Kondisi ini sangat berbahaya, karena logam berat masuk ke tubuh manusia melalui rantai makanan. Sumber pencemaran di air sebagian besar disebabkan oleh residu bahan agrokimia yang terbawa serta erosi masuk kedalam air serta akumulasi sisa pakan ikan. Beberapa waduk di Indonesia yang dilaporkan sebagian sudah mulai tercemar logam berat, termasuk kadar H₂SO₄ yang tinggi (Budiman, 2012). Pencemaran air sangat mempengaruhi ekonomi masyarakat terutama petani ikan yang menggantungkan hidup pada air, bahkan terancam bangkrut karena produksi ikan terus menurun. Salah satu faktor yang berpengaruh adalah pH air yang selalu berubah. pH air normal untuk produksi ikan berkisar 6,5 – 7,5, jika tidak sesuai akan mempengaruhi proses biokimia perairan dan akan berdampak pada produksi ikan.

Limbah industri yang sering dibuang ke sungai mempengaruhi pH air dan mengganggu kehidupan biota akuatik. Biota air sangat sensitif terhadap perubahan pH. pH yang dikehendaki berkisar antara 7 – 8,5, karena mempengaruhi proses biokimiawi, seperti proses nitrifikasi. pH air dibawah 4, sebagian besar tumbuhan air akan mati karena tidak toleran terhadap pH rendah, namun ada beberapa jenis algae seperti Chlamydomonas acidophila dan Euglena dapat hidup pada pH 1 – 1,6. Air yang normal dan memenuhi persyaratan untuk kehidupan mempunyai pH antar 6,5 – 7,5. Selain kisaran pH tersebut, pH air akan bersifat asam jika pH kurang dari 6,5, dan bersifat basa bila pH lebih dari 7,5.

Tabel 1.1 Pengaruh pH Terhadap Komunitas Biologi Perairan

Nilai pH	Pengaruh Umum
4,5 – 5,0	<ul style="list-style-type: none"> • Penurunan keanekaragaman dan komposisi jenis plankton, perifilton dan bentos semakin besar. • Penurunan kelimpahan total dan biomassa zooplankton dan bentos. • Algae hijau berfilamen semakin banyak • Proses nitrifikasi terhambat.
5,0 – 5,5	<ul style="list-style-type: none"> • Penurunan keanekaragaman dan komposisi jenis plankton, perifilton dan bentos semakin besar. • Terjadi penurunan kelimpahan total dan biomassa zooplankton dan bentos. • Algae hijau berfilamen semakin banyak. • Proses nitrifikasi terhambat.

5,5 – 6,0	<ul style="list-style-type: none"> • Penurunan nilai keanekaragaman plankton dan bentos semakin tampak. • Kelimpahan total, biomassa, dan produktivitas masih belum mengalami perubahan yang berarti. • Algae hijau berfilamen mulai tampak pada zona litoral.
6,0 – 6,5	<ul style="list-style-type: none"> • Keanekaragaman plankton dan bentos sedikit menurun . • Kelimpahan total, biomassa, dan produktivitas tidak mengalami perubahan.

Sumber : Modifikasi Baker *et al.*, Efendi, 2003

Indikator pencemaran air dapat dilihat dari seberapa besar kadar kebutuhan oksigen biokimia (BOD), dan kebutuhan oksigen kimia (COD) yang berada di air. Komponen ini dapat diukur untuk menentukan kualitas air perairan. Semakin besar kadar BOD, maka mengindikasikan perairan tersebut telah tercemar. Nilai BOD untuk air minum dan menopang organisme air antara 3,0 – 6,0 mg/liter. Nilai kadar COD < 20 mg/l dianggap tidak tercemar, tetapi jika kadar COD > 200 mg/l dikategorikan tercemar (UNESCO,WHO/UNEP, 1992).

Bab 2 Sumber-sumber Pencemaran



Rendahnya produktivitas lahan pertanian saat ini tidak hanya disebabkan oleh penggunaan bahan agrokimia (pupuk dan pestisida) yang tinggi tetapi juga disebabkan faktor lain. Salah satu faktor yang ikut mempengaruhi produktivitas lahan adalah debu dari erupsi gunung berapi. Di Jawa Timur sendiri total kerusakan lahan pertanian akibat erupsi gunung Kelud yang terjadi tahun 2014 dilaporkan seluas 4781 ha, dengan kerugian mencapai 377,54 miliar (Kementan, 2014). Permasalahan pencemaran lahan pertanian terutama logam berat seperti Pb tidak hanya berasal dari residu pupuk dan pestisida saja, tetapi juga sumbangan dari batuan saat abu erupsi gunung Kelud yang mengalami oksidasi. Permasalahan ini menjadi kompleks sehingga diperlukan penyelesaian yang lebih komprehensif.

Lahan pertanian yang terkena dampak erupsi gunung Kelud sebelumnya merupakan lahan pertanian tanaman hortikultura yang intensif. Beberapa unsur lain sebagai bahan ikutan berasal dari abu vulkanik seperti Si, Al, Mg dan Fe cukup tinggi. Tingginya Si akan berdampak baik dalam jangka panjang, namun keberadaan Al dan Fe akan segera menurunkan pH tanah sehingga tanah menjadi masam. Tingginya Al dan Fe juga akan memfiksasi P sehingga tidak tersedia bagi tanaman. Kondisi inilah yang perlu diupayakan untuk meningkatkan produktivitas tanah. Perbaikan produktivitas tanah telah banyak dilakukan, namun penggunaan tanaman untuk fitostabilisasi belum banyak dilakukan. Beberapa peneliti melaporkan, ada terdapat sekitar 400 spesies tumbuhan yang bisa digunakan untuk menyerap logam berat dan memperbaiki produktivitas tanah (Reves, 2006 ; Robinson *et al*, 2009). Beberapa diantaranya adalah *Vetiveria zizanioides*, *Alyssum bertolonii*, *Brassica juncea* dan beberapa jenis tanaman lain yang dapat digunakan untuk meremediasi tanah yang tercemar (Sheoran *et al.*, 2009). Selain itu tanaman *Equisetum hyemale* yang digunakan mampu menghilangkan Pb dan Cr (82,2% dan 61,2%) pada air lindih (Kurniati, *et al*, 2014). Hamzah *et al* (2012), menggunakan tanaman *Chomolaena odorata* untuk meremediasi tanah tercemar tailing tambang emas rakyat. Tanaman tersebut selain digunakan untuk memperbaiki kesuburan tanah, juga mampu menyerap logam berat Pb sampai sebesar 55,56 %.

Potensi ini sebenarnya bisa digunakan untuk merehabilitasi lahan pertanian yang tercemar logam berat. Sebagian besar tanaman tersebut merupakan tanaman indigenus yang berpotensi sebagai tanaman remediator. Namun demikian, informasi tentang tanaman indigenus yang digunakan sebagai fitostabilisasi masih sedikit yang diungkap, sehingga diperlukan penelitian lebih lanjut untuk merehabilitasi lahan yang terdegradasi

A. Pencemaran Lahan Pertanian

Pencemaran lahan pertanian saat ini terjadi hampir di seluruh wilayah di Indonesia, terutama di pulau Jawa yang intensitas penggunaannya cukup tinggi. Kondisi ini dipicu oleh berbagai hal, penggunaan pupuk dan pestisida yang tinggi. Tahun 2002 saja luas lahan pertanian intensif di Jawa, dilaporkan telah tercemar cukup tinggi terutama Pb, Cd, Cu, dan Zn yang berasal dari penggunaan pupuk dan pestisida. Di wilayah Brebes dan Tegal, kandungan Pb dalam tanah telah mencapai konsentrasi di atas ambang batas ($12,75 \text{ mg kg}^{-1}$), demikian halnya dengan kandungan Pb pada umbi bawang merah telah lebih 2 mg kg^{-1} . Selain itu lahan sawah di daerah Karawang dan Bekasi juga dilaporkan telah tercemar seluas 106.000 ha (Adi, 2003). Contoh lain di sentra bawang merah Nganjuk misalnya yang pernah diteliti tahun 2005 lebih dari 20% dari total lahan terindikasi tercemar. Penyebabnya juga berasal dari juga intensitas penggunaan pestisida yang tinggi. Tingginya kandungan logam berat dalam tanah akan ikut mempengaruhi proses biologi dalam tanah. Proses tersebut berkenaan dengan kesuburan tanah yang tidak terlepas dari interaksi yang terjadi diantara biota tanah, seperti proses dekomposisi bahan organik dan hara (Saraswati, 2004). Menurunnya keragaman dan kelimpahan biota tanah, khususnya mikrobia yang mempunyai peran dalam fungsi ekologis tanah, mengakibatkan tingkat produktivitas tanah menjadi rendah. Dampak lanjutan dari degradasi biologi tanah adalah terganggu proses pelapukan hara N, P, S dan C serta unsur hara lainnya, sehingga tidak tersedia bagi tanaman. Keadaan ini menyebabkan pertumbuhan tanaman terganggu serta kualitas hasilnya tidak memenuhi standart produk sehat.

Salah satu sentra hortikultura di Jawa Timur juga dilaporkan berada pada kondisi tercemar akibat penggunaan pupuk dan pestisida yang tinggi. Sejak tahun 2012 disinyalir sekitar 30 % lahan pertanian yang digunakan saat ini sebagai sentra hortikultura telah terdegradasi dan tercemar. Potensi kerusakan semakin besar akibat intensitas penggunaan lahan yang tinggi terutama ditanami sayuran dan buah. Kondisi kerusakan yang seperti ini tidak hanya diakibatkan penggunaan pupuk maupun pestisida saja, tetapi ditambah pula dengan material ikutan dari gunung Kelud yang meletus tahun 2014. Erupsi gunung Kelud dapat menyediakan beberapa unsur penting untuk produktivitas lahan, namun terdapat beberapa unsur ikutan yang melebihi kapasitas. Memang diakui bahwa dalam jangka waktu yang pendek dapat mengganggu produktivitas tanah, tetapi dalam jangka waktu

yang lama dapat meningkatkan produktivitas tanah. Beberapa peneliti melaporkan terdapat empat bahan mineral utama yang terkandung dalam abu vulkanik masing-masing Al (1,8 -15,9 %), Mg (0,1 – 2,4 %), Si (2,6 – 28 %), dan Fe (1,4 – 9,3 %) (Sudaryo dan Sutjipto, 2009). Hasil analisis pH tanah yang pernah dilakukan oleh Suridikarta *et al*, (2010) pada abu letusan gunung Merapi memiliki pH tanah sangat rendah yaitu 4 – 5, sedangkan Wahyuni *et al* (2012) mendapatkan beberapa unsur seperti As, Cr, Cu, Pb, Ni, dan S yang berpotensi sebagai bahan pencemar. Namun demikian unsur P yang ditemukan cukup tinggi, tetapi karena pH tanahnya rendah sehingga mengakibatkan terjadinya fiksasi P sehingga tidak tersedia bagi tanaman. Potensi tanah tercemar dapat dilihat pada Gambar 2.1.



Gambar 2.1 Lahan pertanian tercemar

Selain pencemaran pada lahan pertanian, pencemaran air juga perlu mendapat perhatian khusus. Pencemaran air juga memiliki mekanisme yang hampir sama dan berdampak juga pada kesehatan manusia. Pengertian pencemaran air sesuai dengan Peraturan Pemerintah Nomor 82 tahun 2001 tentang Pengelolaan Kualitas Air dan Pengendalian Pencemaran Air memberi batasan tentang pencemaran, yaitu masuk atau dimasukkannya makhluk hidup, zat, energi, dan atau komponen lain ke dalam air oleh kegiatan manusia, sehingga kualitas air turun sampai ke tingkat tertentu yang menyebabkan air tidak dapat berfungsi sesuai peruntukannya. PP tersebut mengisyaratkan bahwa air dikatakan tercemar jika kualitas air turun sampai pada tingkat tertentu karena kadar zat atau energy yang berada di dalam air telah melebihi baku mutu yang ditetapkan,

Pencemaran air dapat berasal dari dua sumber, yaitu yang dapat diketahui (*point source*) dan tidak dapat diketahui (*non point source*). Davis dan Comwell (1991), sumber yang diketahui berasal dari sumber yang diketahui secara pasti antara lain berasal dari kegiatan industri yang membuang limbahnya ke sungai, sedangkan sumber yang tidak dapat diketahui berasal dari buangan kegiatan pertanian yang mengandung bahan agrokimia seperti pupuk dan pestisida serta limbah cair berupa kegiatan domestik lainnya (Gambar 2.2).



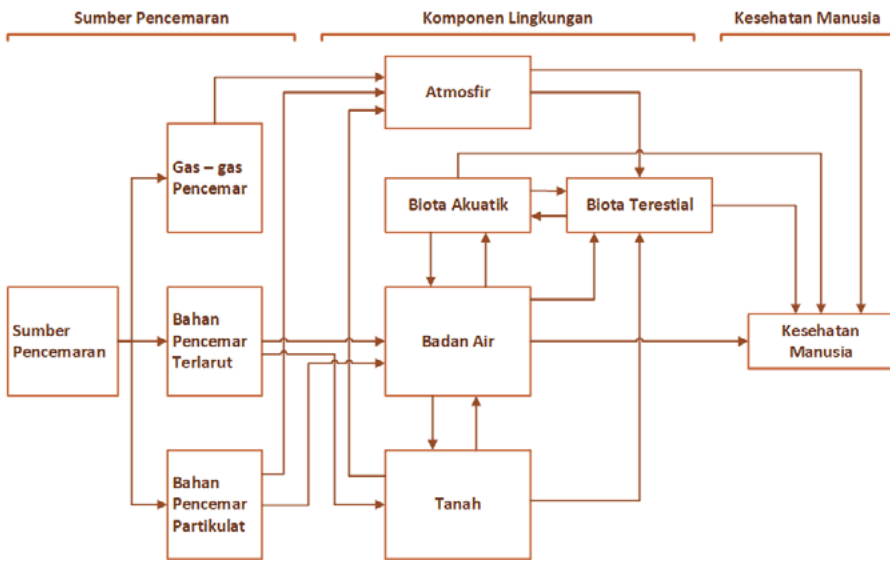
Gambar 2.2 Pencemaran air

Pencemaran air biasanya berasal dari pencemaran organik maupun anorganik. Pencemaran yang berasal dari organik dapat meningkatkan BOD (Biological Oxygen Demand) dalam air. Ini menandakan bahwa kondisi air telah mengalami penurunan kualitas. Tingginya kandungan BOD selalu berkorelasi dengan tingginya aktivitas manusia baik dibagian hulu maupun hilir. Pencemar organik sebagian besar berasal dari kegiatan pertanian dan limbah domestik. Sedangkan pencemar anorganik sebagian besar didominasi kegiatan industri. Sumber pencemar dapat berasal dari pencemar alamiah (dari alam) dan pencemar antropogenik (kegiatan manusia). Pencemar antropogenik adalah polutan yang dihasilkan dari aktivitas manusia, Limbah domestik seperti buangan rumah tangga dan industri masih bisa dikendalikan dengan cara mengontrol aktivitas yang menyebabkan pencemaran (Yuliasuti, 2011).

Pencemaran di sungai dapat dideteksi dari beberapa indikator antara lain :

- (a) Adanya perubahan suhu air,
- (b) Perubahan pH,
- (c) Perubahan warna, bau dan rasa,
- (d) Timbulnya endapan, koloid dan bahan pelarut,
- (e) Adanya mikroorganisme, serta
- (f) Meningkatnya radioaktif.

Secara umum pencemaran tanah selalu berbanding lurus dengan pencemaran air. Tanah dan air yang tercemar selanjutnya digunakan untuk kegiatan pertanian akan berdampak pada kesehatan manusia. Pengaruh bahan pencemar dalam bentuk gas, bahan terlarut, dan partikulat dapat mempengaruhi lingkungan perairan selanjutnya berdampak pada kesehatan manusia. Secara skematik dampak pencemaran terhadap kesehatan manusia dapat dilihat pada Gambar 2.3.



Gambar 2.3 Gambar skema pencemaran lingkungan terhadap kesehatan manusia

B. Logam Berat dan Dampaknya

Logam berat merupakan residu kimia yang keberadaannya perlu diwaspadai. Logam berat yang tinggi saat ini banyak dijumpai pada kegiatan penambangan, terutama tailing dari hasil proses amalgamasi atau proses pemisahan biji emas. Tailing merupakan bahan sisa atau endapan berupa pasir atau tanah dari amalgamasi. Bentuknya berupa batuan yang telah digerus dan telah diambil mineral seperti emas, tembaga dan unsur lain. Secara fisik bahan tailing memiliki tekstur yang relatif kasar, berbutir tunggal dan membentuk agegat seperti tanah, serta memiliki daya pegang air rendah. Secara kimia tailing juga tidak mengandung koloid sama sekali, akibatnya kapasitas pertukaran kation (KTK) rendah, hara rendah, serta daya sangga hara juga rendah. Disamping itu unsur hara logam mikro sangat tinggi karena merupakan bahan sisa tambang yang kemungkinan dapat meracuni tanaman, hewan maupun manusia sangat besar (Suryanto, dan Wisnu, 1997). Herman (2006), mengemukakan bahwa tailing terdiri atas berbagai mineral seperti silika, silikat besi, magnesium, natrium, kalium, dan sulfida. Sulfida memiliki sifat kimia yang relatif aktif sehingga jika bersentuhan dengan udara akan mengalami oksidasi. Hasil oksidasi ini akan membentuk garam-garam bersifat asam dan cairan asam. Reaksi cairan asam tersebut akan mengandung sejumlah logam beracun seperti As, Hg, Pb, dan Cd yang dapat mencemari lingkungan. Logam berat logam yang mempunyai berat jenis lebih dari 5 g/cm³, sedangkan kurang dari 5 g/cm³ dikenal sebagai logam ringan. Biasanya berasal dari dua sumber yang berbeda yaitu dari alam seperti gunung berapi, sungai, dekomposisi organik, retakan dan dari aktivitas antropogenik seperti industri dan limbah domestik (Lasat 2001).

Tanah yang tercemar logam berat dapat mempengaruhi pertumbuhan, produktivitas, serta menyebabkan kematian pada tumbuhan. Logam berat dikelompokkan dalam 3 kelompok biokimia, yaitu

- (a) logam-logam yang mudah bereaksi jika bersentuhan dengan oksigen,
- (b) logam-logam yang mudah bereaksi bila bersentuhan dengan nitrogen dan atau sulfur,
- (c) logam antara atau logam transisi yang memiliki sifat khusus sebagai logam pengganti.

Logam berat dapat menimbulkan dampak pada makhluk hidup, karena merupakan bahan toksik bagi lingkungan dan ekosistemnya (Rosiana, 2009). Keberadaan logam berat berasal dari dua sumber, yaitu

- (a) terjadi secara alamiah seperti pelapukan, reaksi geokimiaawi serta dari tumbuhan dan hewan yang melapuk.
- (b) aktivitas manusia seperti kegiatan tambang dan industri.

Secara umum, pencemaran terbesar berasal dari aktivitas manusia seperti kegiatan industri, dibandingkan dengan yang terjadi secara alami.

Logam berat yang mencemari lingkungan dipastikan akan berdampak pada manusia, namun tergantung pada bagian mana logam berat tersebut terikat di dalam tubuh. Tingginya daya toksik akan bekerja sebagai penghalang kerja enzim, mengakibatkan metabolisme tubuh akan terganggu. Proses selanjutnya akan menyebabkan alergi, mutagen, dan karsinogen. Mekanismenya masuk melalui kulit, napas dan juga melalui pencernaan. Merkuri merupakan satu dari sekian jenis logam berat sangat berpengaruh terhadap ekosistem. Merkuri yang terakumulasi dalam tubuh mikro-organisme terutama mikroba-mikroba yang hidup di perairan seperti di danau dan sungai juga melalui proses metabolisme. Merkuri yang terpapar di sungai dan laut selanjutnya akan berubah menjadi methyl-merkuri dan dimakan oleh mikroorganisme. Polusi logam berat, khususnya merkuri (Hg) merupakan salah satu masalah yang ikut menghinggapi masalah lingkungan global, yang saat ini konsentrasinya semakin meningkat. Aktivitas manusia seperti penambangan emas, perak, merkuri (Hg), penambangan dan peleburan Cu dan Zn atau pembakaran batubara mengakibatkan konsentrasi logam berat semakin tinggi. Polusi tanah yang disebabkan oleh logam berat merkuri menyebabkan toksisitas pada tanaman dan akan berefek jangka panjang terhadap kesuburan tanah (Wang dan Geger, 2004). Efek kontaminasi merkuri (Hg) bisa menyebabkan penghambatan pertumbuhan tanaman, gangguan pada serapan air dan hara, fotosintesis, tekanan oksidatif dan aktivitas-aktivitas enzimatis (Patra dan Sharma, 2000 ; Ortega-Villasante *et al.*, 2005).

Akumulasi merkuri dalam tanaman telah dipelajari pada beberapa jenis tanaman, seperti kacang dan spearmint, gandum musim semi, bit gula, minyak biji lobak, semanggi putih dan willow (Geger *et al.* 2005), padi (Du *et al.* 2005), tomat dan alfalfa (Ortega-Villasante *et al.* 2005). Distribusi Hg pada spesies tanaman liar juga telah dipelajari (Moreno-Jiménez *et al.*, 2006). Tanaman memiliki kemampuan untuk mengambil Hg dari larutan tanah atau hara tetapi, umumnya Hg yang terserap sedikit ditranslokasikan ke cabang muda. Namun demikian, parameter-parameter kinetika serapan Hg²⁺ pada tumbuhan tingkat tinggi belum dilaporkan, walaupun beberapa studi dengan cyanobacterium *Nostoc calcicola* Bréb, telah dilakukan. Frero *et al.* (2006), mengemukakan bahwa tailing umumnya memiliki kandungan hara dan bahan organik rendah sehingga diperlukan tanaman pengikat nitrogen untuk menstabilkan tanah secara alami guna meningkatkan kadar nitrogen dalam tanah, dan mengembangkan pemeliharaan pelindung tanaman.

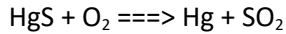
Selain merkuri, timbal juga termasuk logam berat yang dapat mengganggu kesehatan. Paparan timbal pada manusia dapat masuk ke dalam tubuh mengalir mengikuti aliran darah. Otak dan ginjal akan menyerap kembali dan disimpan pada tulang dan gigi. Hindari anak-anak dari bahaya timbal walaupun dalam jumlah kecil. Gangguan yang ditimbulkan pada fase awal dapat mempengaruhi pertumbuhan fisik, mental dan kecerdasan. Timbal dalam tubuh manusia dapat menghalangi pembentukan reaksi hemoglobin dengan O₂, yang berdampak pada penyakit anemia dan keracunan kronis.

C. Karakteristik Logam Berat Merkuri (Hg) dan Timbal (Pb)

Pada dasarnya, merkuri (Hg) memiliki nomor atom 80 serta massa molekul adalah 200,59. Merkuri kebanyakan ditemukan dialam dan bergabung dengan elemen lain. Jarang ditemukan dalam bentuk elemen secara terpisah. Komponen merkuri kebanyakan terdapat pada batu karang, tanah, udara, air serta organism hidup lain melalui proses fisik, kimia dan biologi secara kompleks (Alfian, 2006). Fardias (1992), Beberapa sifat merkuri yang diketahui antara lain:

- a. Berbentuk cair pada suhu 25^o C, dan titik beku sangat rendah (-39^o C) dari semua logam,
- b. Mempunyai sifat volatilitas yang tinggi dari semua logam,
- c. Memiliki ketahanan listrik yang sangat rendah sehingga dapat berfungsi sebagai konduktor yang baik,
- d. Dapat melarutkan logam untuk membentuk komponen lain yang sering disebut sebagai amalgam (alloy),
- e. Dapat meracuni mahluk hidup. Hampir semua merkuri diproduksi dengan cara pembakaran merkuri sulfida (HgS) di udara.

Reaksi yang ditimbulkan sebagai berikut :



Di alam, merkuri dapat ditemui dalam berbagai bentuk antara lain :

- a. Merkuri anorganik, termasuk logam merkuri (HgCl_2) dan merkuri oksida.
- b. Merkuri organik kompleks, terdiri atas :
 - aril merkuri, seperti fenil merkuri asetat yang mengandung hidrokarbon aromatic,
 - alkoksi alkil merkuri (R-O Hg), dan
 - alkil merkuri, mengandung hidrokarbon alifatik dan merupakan paling beracun, misalnya metal merkuri dan etil merkuri.

Widiyatna (2005), mengemukakan bahwa merkuri perlu di waspadai jika terakumulasi dalam jumlah yang signifikan karena bersifat racun dan mematikan. Senyawa metil-merkuri yang berasal dari proses metilasi dalam air dengan pH rendah dapat berlangsung secara terus menerus. Terbentuknya senyawa ini karena terlarutnya Hg^{2+} dari sedimen melalui pertukaran ion pada lingkungan air. Keracunan merkuri nonorganik dapat mengakibatkan terganggunya fungsi ginjal dan hati. Disamping itu akan mengganggu sistem enzim dan mekanisma sintetis. Merkuri (Hg) organik dari jenis metil-merkuri dapat memasuki placenta dan merusak janin pada wanita hamil.

Seiring dengan merkuri, timbal (Pb) juga termasuk logam berat yang sangat berbahaya. Pb dalam batuan berada pada struktur silikat yang menggantikan unsur posisi Ca, dan diserap oleh tumbuhan ketika Pb dalam mineral utama terpisah oleh proses penguraian. Pb di tanah cenderung terikat oleh bahan organik, terkonsentrasi pada topsoil karena menyatu dengan tumbuhan. Darmono (1995), Kandungan logam berat di dalam tanah sangat bervariasi antar jenis logam berat (Tabel 2.1).

Tabel 2.1 Kandungan logam berat dalam tanah secara alamiah (mg kg^{-1})

Jenis Logam	Kandungan (Rata-rata)
As	100
Co	8
Cu	20
Pb	10
Zn	50
Cd	0,06
Hg	0,03

Sumber: Darmono (1995)

Di bumi terkandung sekitar 13 mg kg⁻¹ Pb, dalam tanah 2,6 – 25 mg kg⁻¹, diperairan sekitar 3 µg/L dan dalam air tanah jumlahnya kurang dari 0,1 mg kg⁻¹. Diperkirakan 95% sedimen yang terbawa air sungai mengandung Pb menuju samudera. Pada pH < 5 Pb dapat larut air bersentuhan dengan timah hitam dalam dapat mengandung > 1 µg Pb/dm³; sedangkan batas kandungan dalam air minum adalah 50 µg Pb/dm³ (Herman, 2006).

Penyebaran unsur Pb di alam tidak hanya berasal dari limbah kendaraan bermotor dan industri lainnya, tetapi dispersi unsur Pb juga terjadi akibat pembersihan tailing dari usaha pertambangan logam. Dampak lebih jauh dari keracunan Pb adalah hipertensi dan memicu penyakit hati. Akibat lain toksisitas logam berat pada manusia menyebabkan timbulnya kerusakan jaringan, terutama jaringan detoksifikasi dan ekskresi (hati dan ginjal), serta beberapa diantaranya mempunyai sifat karsinogenik (pembentuk kanker) maupun teratogenik (salah bentuk organ). Hal ini terjadi karena logam berat yang terpapar pada tubuh manusia telah melewati nilai ambang yang dipersyaratkan. Notohadiprawiro (2006), mengemukakan bahwa nilai ambang batas kandungan logam berat berbeda pada setiap makhluk hidup (Tabel 2.2) hal ini dipengaruhi oleh daya tahan tubuh terhadap unsur beracun yang masuk ke bagian tubuh.

Tabel 2.2 Nilai ambang batas kandungan logam berat.

Logam berat	Kadar gawat (µg g ⁻¹ bahan kering) dalam			
	Tanaman	Tanah	Ternak	Manusia
Hg	2-5	0.01-0.3	1-10	1-30
Cd	5-10	0.1-7	0.5-1	0.5-3
Pb	10-20	20-30	10-30	1-10
Cu	15-20	2-100	30-100	100
Ni	20-30	10-1.000	50-60	50-100
Zn	150-200	10-300	500	500-700

Sumber : Notohadiprawiro, 2006.



Bab 3 Remediasi Tanah Tercemar

Remediasi adalah istilah yang digunakan untuk membersihkan lahan atau media yang tercemar. Remediasi berasal dari kata “Remedial” yang artinya pembersih atau membersihkan permukaan tanah maupun air yang tercemar. Remediasi tanah terdiri dari dua jenis yaitu remediasi secara *in-situ* dan *ex-situ*. Pembersihan *in-situ* merupakan pembersihan tanah atau lokasi setempat, sedangkan pembersihan *ex-situ* yaitu pembersihan dengan cara tanah atau media yang terkontaminasi dibawa ke tempat lain dan aman untuk dibersihkan. Bagian tanah atau air yang tercemar diambil dan dibawa ke daerah atau tempat yang aman untuk dibersihkan. Pembersihan secara *ex-situ* membutuhkan biaya yang cukup besar dan pelaksanaannya agar rumit.

Remediasi terbagi ke dalam dua golongan yaitu fitoremediasi dan bioremediasi. Fitoremediasi adalah teknik pembersihan lahan dengan menggunakan jasa tanaman, sedangkan bioremediasi adalah teknik pembersihan lahan dengan menggunakan mikroba. Remediasi tanah yang tercemar bertujuan untuk mendegradasi polutan sampai bersih atau tidak beracun. Remediasi logam berat dapat dilakukan secara fisik, kimia, maupun biologi. Salah satu teknik yang relatif murah adalah secara biologi, yang dikenal dengan fitoremediasi. Fitoremediasi merupakan salah satu teknologi pemanfaatan jasa tumbuhan untuk mengurangi polutan, baik pada air, tanah, maupun udara, baik yang disebabkan oleh polutan metal maupun organik. Tanaman yang dimanfaatkan adalah yang tergolong hiperakumulator. Oleh karena itu perlu dieksplorasi jenis tumbuhan yang dijumpai di daerah penelitian, dan berpotensi sebagai tanaman remediator. Kemampuan tanaman dalam menyerap logam berat sangat ditentukan oleh performa tanaman itu sendiri.

A. Fitoremediasi

Fitoremediasi merupakan salah satu teknologi konvensional yang bertujuan membersihkan atau menyaring bahan beracun (polutan) dengan menggunakan tanaman. Fitoremediasi berasal dari gabungan bahasa Yunani dan latin, yaitu “*phyto*” artinya tanaman, dan “*remidium*” artinya memperbaiki. Pengertian diatas menggambarkan suatu sistem di mana beberapa tanaman bekerja bersama-sama dengan mikroorganisme tanah, merubah polutan menjadi tak berbahaya (EPA, 2000). Fitoremediasi merupakan sebuah teknologi yang muncul dengan menggunakan variasi tanaman untuk mendegradasi, mengekstrak, atau mengimobilisasi polutan dari tanah dan air yang tercemar.

Teknologi ini telah diterapkan beberapa tahun lalu untuk memindahkan logam berat yang mencemari tanah dan air. Keuntungan dari fitoremediasi adalah dapat bekerja pada senyawa organik dan anorganik, prosesnya dapat dilakukan secara *in-situ* dan *ex-situ*, mudah diterapkan dan biayanya murah. Teknologi ramah lingkungan seperti ini juga bersifat mampu menghadirkan nilai estetik bagi lingkungan. Selanjutnya mampu mereduksi kontaminan dalam jumlah yang besar (Zynda, 2001). Keuntungan lain dari teknologi ini dibandingkan dengan teknologi remediasi yang lain adalah kemampuan penyerapan pada rizosfer untuk mencegah pelepasan polutan (Schroder *et al.* 2002).

Polutan yang telah berhasil diremediasi oleh tanaman termasuk petroleum hidrokarbon, pelarut klorinat, logam, radio nukleides dan unsur hara seperti nitrogen dan fosfor (EPA, 2000 ; Schroder *et al.* 2002). Mekanisme pengambilan polutan sama dengan proses pemanfaatan unsur hara yaitu menyerap air dan unsur hara melalui akar, transpirasi air melalui daun, dan memetabolisme bahan organik. Peristiwa ini dapat merubah bahan berbahaya menjadi tidak berbahaya (Schnoor, 2002). Evapotranspirasi selama proses pertumbuhan juga dapat memindahkan dan mengeliminir polutan dalam air tanah karena tanaman mengambil polutan selain diambil dalam bentuk biomasa tanaman juga dimetabolisme dalam bentuk volatil dan ditranspirasi (EPA, 2001). Dalam fitoremediasi dikenal beberapa mekanisme sebagaimana diungkapkan oleh Schnoor (2002) antara lain : rizodegradasi, fitodegradasi, rizofiltrasi, fitoekstraksi, fitostabilisasi, dan fitovolatilisasi.

- **Rizodegradasi** : proses pembongkaran polutan organik dalam tanah melalui aktifitas mikroorganisme yang meningkat dalam zone perakaran.
- **Fitodegradasi** : proses pembongkaran polutan oleh tanaman kemudian di serap dan dimetabolisme dalam tanaman, atau pembongkaran polutan diluar tanaman melalui enzim yang diproduksi. Fitodegradasi juga disebut sebagai fitotransformasi.

- **Rizofiltrasi** : (1) memindahkan polutan dari air yang tercemar untuk diakumulasikan dalam biomas tanaman; (2) penyerapan atau pengendapan dalam akar tanaman, atau adsorpsi (pelekatan) polutan oleh akar di sekitar zone perakaran.
- **Fitoekestaksi** : penyerapan polutan oleh akar dan ditranslokasi bagian jaringan tanaman. Teknologi ini umum digunakan untuk pengelolaan tanah, sedimen, lumpur dan air yang tercemar dan banyak diaplikasikan pada tanah yang tercemar logam. Karakteristik tanaman yang digunakan dalam fitoekestaksi (Miller, 1996) adalah: (1) Mampu mengakumulasi dan toleran pada konsentrasi logam yang tinggi dalam jaringan tanaman; (2) pertumbuhannya cepat; (3) biomasnya tinggi.
- **Fitostabilisasi** : digunakan untuk (1) immobilisasi polutan dalam tanah melalui absorpsi, akumulasi oleh akar atau diendapkan pada zone perakaran untuk mencegah migasi polutan lewat erosi angin dan air, pencucian, dan dispersi tanah; (2) mengurangi tersedianya logam dalam tanah melalui absorpsi, dan pengendapan. Proses ini membantu memantapkan matrik tanah untuk meminimalisasi erosi dan migasi sedimen. Dalam beberapa kasus akar tanaman dapat juga mengeluarkan enzim yang menyumbang dalam penurunan polutan dalam tanah.
- **Fitovolatilisasi** : proses penyerapan zat polutan oleh tumbuhan dalam bentuk larutan dan merubah bahan tersebut sampai tidak berbahaya, dan selanjutnya di uapkan ke atmosfer.

Tanaman yang digunakan untuk meremediasi tanah tercemar logam berat harus memiliki karakteristik sebagai berikut :

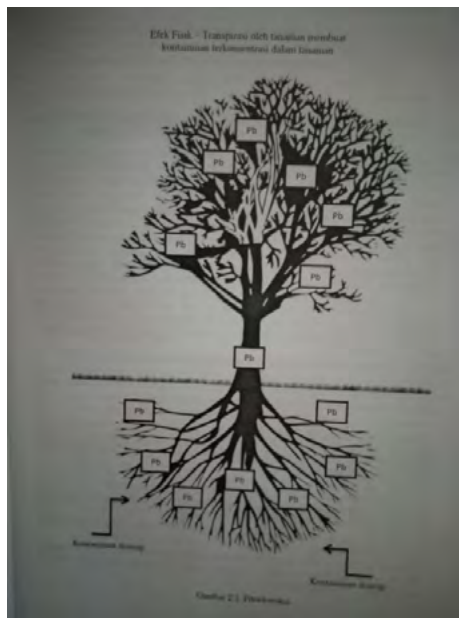
- (a) bersifat hipertoleran agar dapat mengakumulasi logam berat dalam jumlah besar,
- (b) memiliki laju kemampuan penyerapan logam berat yang tinggi, serta
- (c) mempunyai kemampuan untuk ditranslokasi logam berat tersebut ke jaringan tanaman terutama batang dan daun.

Terdapat beberapa jenis tumbuhan yang bersifat hiperakumulator karena mampu menyerap polutan dalam jumlah besar, namun pada kondisi tanah dengan berkadar logam tinggi pertumbuhannya terganggu.

Fitoremediasi merupakan teknologi pembersih polutan secara konvensional yang sangat efektif. McMohan (200), biaya fitoremediasi pada tanah dengan kedalaman 15 cm yang tercemar diperkirakan 2500 - 15.000 dolar ha⁻¹, sedangkan remediasi dengan mikroorganisme yaitu antar 7500 - 20.000 dolar ha⁻¹. Secara ekonomis remediasi tanah dengan menggunakan tanaman jauh lebih hemat dibandingkan dengan menggunakan mikroorganisme. Teknologi ini merupakan teknologi pembersihan tanah dan air yang paling murah dibandingkan dengan teknologi pembersihan secara fisik maupun kimia (McMohan, 2000). Penelitian penggunaan

tanaman dalam proses fitoremediasi telah diterapkan hampir pada semua jenis polutan (logam, radionuklida, dan zat-zat organik) maupun pada tanah dan air. Hal ini sudah dibuktikan oleh Reves, 2006 ; Robinson *et al.*,2009, bahkan tanaman tersebut untuk menambang kembali logam-logam berat pasca tambang yang kita sebut sebagai *fitomining*. Yanxu and Hiroshi (2009), juga menggunakan tanaman semanggi putih (*Trifolium repens L.*) untuk mendetoksifikasi tanah yang tercemar *dibenzofuran* (DBF). Tanaman tersebut juga memiliki kemampuannya dalam menyerap polutan.

Pada aspek lain, teknologi fitoremediasi dapat bekerja pada senyawa organik dan anorganik, dapat dilakukan baik secara *in-situ* maupun *ex-situ*, dengan biaya yang relatif murah. Teknologi ini termasuk teknologi ramah lingkungan dan bersifat estetik, serta mampu mereduksi logam berat dalam jumlah yang besar (Kimenyu *et al*, 2009 ; Hamzah *et al*, 2012 ; 2017). Keuntungan lain dari teknologi ini dibandingkan dengan teknologi remediasi yang lain adalah kemampuan penyerapan pada rizosfer untuk mencegah pelepasan polutan (Aremu *et al*, 2013). Mekanisme pengambilan polutan sama dengan proses pemanfaatan unsur hara yakni menyerap air dan unsur hara melalui akar, transpirasi melalui daun, dan dimetabolisme. Teknologi ini umum digunakan untuk pengelolaan tanah, sedimen, lumpur dan air yang tercemar dan banyak diaplikasikan pada tanah yang tercemar logam. Tanaman yang mengekstraksi logam berat dari tanah dan didistribusikan ke tanaman diilustrasikan seperti pada Gambar 3.1.



Gambar 3.1 Fitoekstraksi

1. Bioremediasi

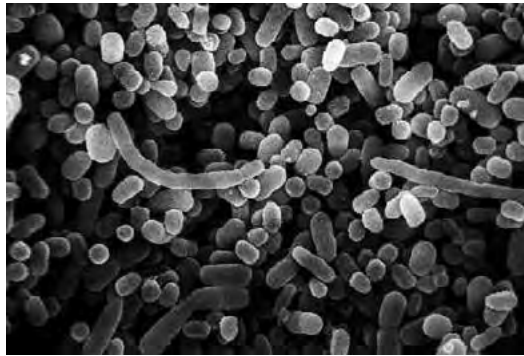
Bioremediasi adalah proses detoksifikasi logam berat di dalam tanah dengan menggunakan mikroorganisme, tanaman, atau enzim mikroba atau enzim tanaman. Konsep bioremediasi meliputi 3 hal yaitu

- (1) *Biodegradasi*, yaitu atau detoksifikasi kontaminan oleh organisme,
- (2) *Mineralisasi*, yaitu konversi lengkap suatu kontaminan organik menjadi anorganik oleh spesies mikroorganisme baik secara tunggal maupun kelompok, dan

(3) *Kometabolisme*, transformasi suatu polutan tanpa karbon atau energi untuk mikroorganisme pendegradasi (Handayanto dan Hairiah, 2009).

Bioremediasi tidak hanya diterapkan pada tanah yang tercemar saja, tetapi juga dapat diterapkan pada air yang tercemar. Teknologi bioremediasi akhir-akhir ini telah dikembangkan pada pengolahan air limbah yang mengandung senyawa-senyawa kimia yang sulit untuk terdegradasi. Beberapa senyawa kimia yang dapat diremediasi berasal dari industri, antara lain logam-logam berat yang berasal dari pestisida dan herbisida, petroleum hidrokarbon, dan beberapa senyawa kimia lain (Tortora, 2010).

Metode yang digunakan dalam bioremediasi adalah dengan menggunakan bakteri untuk mengumpulkan dan mendegradasi bahan pencemar. Metode ini dikembangkan untuk melengkapi metode konvensional yang sudah ada saat ini. Tujuannya adalah menghancurkan bahan pencemar dan mentransformasikannya kedalam substansinya agar tidak berbahaya. Teknik ini secara umum relatif murah karena teknologinya sederhana dan dapat diterima. Bioremediasi merupakan salah satu metode alternatif yang efektif dalam membersihkan bahan pencemar. Di Amerika dan Eropa penggunaan metode ini berkembang cukup pesat.



Gambar 3.2 Bioremediasi

Teknik bioremediasi didasarkan pada kemampuan beberapa mikroorganisme untuk mengkatabolisme bahan-bahan kimia berbahaya. Salah satu bakteri yang populer dalam mengubah senyawa berbahaya menjadi tidak berbahaya adalah *pseudomonas sp.* Berkembangnya teknologi rekayasa genetika memungkinkan untuk menghasilkan beberapa bakteri yang spesifik untuk menangani limbah kimia tertentu sehingga tidak berdampak terhadap lingkungan. Dalam proses bioremediasi berlangsung mikroorganisme akan memproduksi beberapa enzim dan memodifikasi struktur polutannya agar tidak berbahaya. Prinsip bioremediasi adalah pengolahan secara biologi dalam pengendalian pencemaran dengan

memanfaatkan bakteri. Hal ini bukan lagi sesuatu yang baru namun telah memainkan peran sentral dalam pengolahan limbah konvensional sejak tahun 1900-an. Teknologi bioremediasi yang dikembangkan bertujuan untuk detoksifikasi dan mengendalikan pencemaran air merupakan metoda yang lebih menguntungkan dibandingkan dengan metoda kimia. Bahkan, saat ini, flokulan umum yang berbahan baku alum untuk menurunkan bahan pencemar air sungai sudah bisa digantikan dengan bioflokulan yang mikroorganismanya diisolasi dari proses lumpur aktif. Kemampuan yang dapat diketahui adalah mampu menurunkan turbiditi sebesar 84-94% (Buthelezi *et al*, 2009). Bakteri, jamur dan protozoa dapat diandalkan untuk mengolah air limbah, serta memiliki peranan dalam menjaga ekologis perairan (Priadie 2012).

B. Prospek Fitoremediasi

Walaupun teknologi fitoremediasi masih dalam tahap perkembangan dan masih banyak yang belum diungkap, namun minat peneliti untuk mendalami cukup besar. Penelitian untuk pengembangan kearah komersialisasi dari teknologi ini. menjadi pertimbangan untuk diterapkan karena biayanya murah. Perkiraan biaya remediasi pada situs yang terkontaminasi antara US \$ 10 sampai 100 per m³ dengan cara *in-situ*, sedangkan dilakukan secara *ex-situ* antara US \$ 30 sampai 300 per m³. Hal ini jika dibandingkan dengan menggunakan jasa tanaman biayanya hanya sekitar US \$ 0,05 per m³ (Watanabe, 1997). Khusus untuk lahan basah, remediasi yang pernah dilakukan memerlukan biaya sebesar US \$ 450.000 per ha untuk pembangunan fasilitasnya, sedangkan biaya operasional dan pemeliharaan sekitar US \$ 20.000 tahun⁻¹.

Di Indonesia, sebenarnya sudah banyak penelitian untuk meremediasi tanah terdegradasi dengan menggunakan media tanaman, seperti reklamasi lahan bekas tambang emas di PT. Freeport Papua dengan menggunakan jenis rumput import, dan jenis tanaman yang tumbuh cepat pada bekas tambang emas rakyat di Jombang, Sukabumi, Singkep dan Riau, tetapi belum secara khusus mengarah pada fitoremediasi (Hidayati, 2005). Secara fisik lahan tertutup vegetasi tetapi kontaminan tidak secara otomatis mengalami biodegradasi. Hal ini yang perlu dikembangkan terus. Di masa yang akan datang fitoremediasi sangat diperlukan mengingat setiap tahun kasus pencemaran terus bertambah jumlah dan intensitasnya. Daya dukung dan sumberdaya alam semakin menurun karena sekitar 35% wilayah Indonesia sudah beralih fungsi menjadi areal pertambangan. Keadaan ini berdampak pada perubahan lanskap dan pencemaran makin tinggi. Untuk itu penggunaan tanaman remediator dalam mengendalikan pencemaran dapat tidak bisa ditawar lagi.

Keanekaragaman hayati berupa tumbuhan dan mikro-organisme yang kita miliki saat ini sangat besar sehingga perlu diteliti lebih lanjut. Beberapa mikroorganisme yang ditemukan mempunyai kemampuan untuk mendegradasi xenobiotika seperti senyawa organik aromatik berklor. Hal ini menunjukkan potensi alam Indonesia yang cukup besar. Beberapa tumbuhan yang bersifat hiperakumulator telah diketahui, namun kebanyakan tumbuhan tersebut berasal dari wilayah beriklim sedang. Sehingga perlu dicari tumbuhan asli yang mampu beradaptasi baik dengan iklim Indonesia.

Bab 4

Detoksifikasi Logam Berat



A. Peran Tanaman Dalam Detoksifikasi Logam Berat

Penggunaan tanaman untuk remediasi sangat ditentukan oleh jenis tanaman yang dikaitkan dengan aspek fisiologi. Chaney *et al.*, (2008 ; Ghosh dan Singh (2005) mengungkapkan bahwa tanaman yang digunakan untuk remediasi tanah logam berat harus memiliki karakteristik yang mampu menyerap logam berat yang tinggi serta mampu mentraslokasikan ke seluruh jaringan tanaman yang meliputi akar, daun dan batang. Beberapa jenis tumbuhan yang mempunyai sifat hiperakumulasi akan mampu menyerap polutan dalam jumlah besar. Namun pada tanah dengan kadar logam tinggi pertumbuhannya akan lambat. Penyerapan serta akumulasi logam berat yang dilakukan oleh tanaman secara berturut-turut dimulai dari penyerapan oleh akar, kemudian ditranslokasikan dari akar ke jaringan tanaman, selanjutnya dilokalisir pada jaringan tertentu untuk menjaga agar tidak menghambat metabolisme (Ghosh and Singh, 2005). Mekanisme penyerapan dan translokasinya sebagai berikut :

1) Penyerapan oleh akar

Logam yang larut masuk ke symplast akar melalui membran plasma dalam sel endodermis akar melalui ruang antar sel. Untuk memasuki xylem, logam harus melintasi jalur casparian yang kedap larutan karena adanya lapisan lilin, kecuali melalui sel-sel endodermis. Transportasi logam seperti ini juga disebut transportasi symplast. Sistem transportasi ini lebih teratur berdasarkan selektifitas membran plasma sel permeabel yang mengendalikan akses menuju symplast melalui pengangkut atau kanal-kanal ion logam tertentu atau yang umum (Sheoran *et al*, 2009).) Disaat masuk ke dalam xylem, aliran getah xylem akan mengantarkan logam ke pucuk-pucuk tanaman.

2) Translokasi dari akar ke jaringan tanaman

Logam berat yang masuk ke dalam sel akar, akan diangkut melalui jaringan pengangkut (xilem dan floem) ke bagian jaringan tumbuhan yang lain. Berbagai molekul khelat dapat berfungsi untuk mengkhelat logam berat yang dihasilkan oleh tumbuhan. Logam yang dikelat diantaranya histidin yang diikat oleh Ni dan fitokhelaatin pada Cd (Zhu *et al.*, 1999 ; Ghosh and Singh, 2005).

3) Lokalisasi logam pada jaringan

Secara alami tumbuhan memiliki mekanisme dalam mendetoksifikasi logam berat, diantaranya menimbun logam berat pada organ tertentu seperti akar tanaman *Silene dioica* untuk Cd, *trikhoma* untuk Cd, dan lateks untuk Ni pada *Serbetia acuminata*. Kondisi oksidasi logam berat memiliki karakteristik pengambilan, pengangkutan dan detoksifikasi yang sangat berbeda dalam tanaman. Saat logam ditranslokasikan pada sel-sel pucuk tanaman kemudian disimpan di sel seperti trichone (jaringan apoplas), epidermis, mesofil, dinding sel dan lain sebagainya, di mana logam tersebut tidak akan merusak proses-proses seluler yang vital. (Shah dan Nongkynrih, 2007).

Langkah terakhir dari akumulasi utama logam ialah memisahkan logam sejauh mungkin dari proses seluler, yang kemungkinan akan terjadi. Pemisahan biasanya terjadi di vakuola, di mana logam/ligand logam harus ditransportasikan melalui membran vakuola. Protein pengikat logam semisal metallothionein (MT) dan phytochelatin (PC) dalam tumbuhan memainkan peranan penting dalam proses pemisahan dan juga dalam peningkatan toleransi dan akumulasi logam. Logam seperti Ag, Cu, dan Ni dipisahkan dengan cara mengikatnya dengan sulfur organik (R-SH) pada residu sistein dari peptida. MT dan PC mengkombinasikan ion-ion logam menjadi tidak aktif dan mengangkutnya ke dalam vakuola-vakuola untuk dipisahkan dalam jangka waktu yang panjang (Eapen dan D'Souza, 2005).

Logam berat Pb yang diakumulasi tanaman dan ditranslokasikan ke bagian organ tanaman seperti akar, batang dan daun tergantung pada komposisi unsur hara pengikat, pH tanah, dan KTK. Konsentrasi Pb yang tertinggi atau lebih dari 200 mg kg⁻¹ akan berpengaruh pada proses fotosintesa dan pertumbuhan tanaman. Tanaman dapat menyerap logam berat pada saat kandungan bahan organik, serta KTK tanah berada dalam kondisi rendah. Kedaan demikian logam berat akan terlepas dari ikatan tanah dalam bentuk ion dan bergerak bebas pada larutan tanah. Jika logam lain tidak mampu menghambat keberadaannya, maka logam berat akan segera diserap oleh akar.

B. Penggunaan Biochar dan Tanaman untuk Detoksifikasi Logam Berat

Biochar adalah karbon aktif berpori yang dihasilkan dari proses pirolisis bahan organik. Meskipun penggunaan arang (kayu biochar) sudah umum sejak zaman lalu, tetapi ide menggunakan bahan baku lainnya untuk produksi biochar masih baru. Biochar memiliki KTK tinggi serta mempunyai pH basa. Pemanfaatannya cukup potensial terutama pada sifat-sifat tanah sebagai peningkatan aktivitas biologis tanah (Lehmann *et al*, 2011), mengurangi emisi gas rumah kaca, meningkatkan karbon tanah dan memperbaiki kualitas tanah untuk meningkatkan produksi (GASCO *et al.*, 2012 ; Paz-Ferreiro dan Fu, 2013)

Rondon *et al.* (2007) menggunakan limbah kayu eucalyptus untuk bahan baku biochar. Karakteristik biochar yang diperoleh adalah :

- total C (823,7 g kg⁻¹)
- pH (7,0), abu (0,3 %)
- P-Bray (49,5 5)
- total S (280 mg kg⁻¹)
- KTK (46,9 mmol kg⁻¹)
- total N (5,73 g kg⁻¹),
- O₂ (13,7 %),
- P-total (580 mg kg⁻¹),
- total Mg (1,31g kg⁻¹),

Karakteristik biochar yang diproduksi dari kotoran ayam adalah :

- pH (9,93)
- total N (2,6 %)
- total K (3,40 g kg⁻¹)
- total Mg (3,0 g kg⁻¹)
- C (12,33 %)
- total P (18,7 g kg⁻¹)
- total Ca (1,20 g kg⁻¹)

Biochar memiliki kemampuan secara fisik dan kimia untuk menghilangkan keaktifan logam berat sehingga potensial digunakan pada lahan tercemar. Selain itu biochar juga mampu mensuplay sejumlah hara bagi tanaman (Hidayat, 2015).

Selain digunakan untuk memperbaiki produktivitas tanah, biochar juga digunakan untuk meremediasi tanah-tanah yang tercemar. Fellet *et al.* (2011) menggunakan biochar untuk memulihkan tanah tambang yang terkontaminasi. Pencemaran limbah tambang dapat dikurangi dengan menggunakan biochar kotoran ayam. Biochar kotoran ayam yang digunakan sangat efektif untuk mengurangi konsentrasi Cd dan Pb. Penambahan biochar konsentrasi Pb berkurang (Sizmur *et al.*, 2011). Jiang *et al.*, (2012) mengemukakan bahwa penggunaan biochar mampu menurunkan Pb antara 18,8-77,0%, sedangkan Cu antara 19,7- 100,0% tergantung pada masing-masing konsentrasi biochar.

Penelitian de Abreu *et al.*, (2012) telah mengkombinasikan biochar dengan tanaman remediator untuk menstabilkan tanah tercemar logam berat. Selama ini penelitian yang dilakukan sudah banyak, namun masih bersifat parsial. Antara tanaman remediator dan biochar sama-sama memiliki potensi yang sama. Hamzah *et al.*, (2012), telah mengkombinasikan penggunaan biochar dengan tanaman remediator untuk merediasi logam berat. Kombinasi keduanya mampu menyerap Hg dan Pb masing-masing sebara 14,3 – 33,2 mg kg⁻¹ dan 48 – 92 mg kg⁻¹.

Liu *et al.*, (2013), perbaikan hasil tanaman setelah penambahan biochar sering dikaitkan dengan peningkatan air dan retensi nutrisi, meningkatkan sifat biologis dan KTK tanah, efek pada nutrisi terhadap perbaikan pH tanah. Banyak dari efek-efek ini saling berkaitan dan berpotensi mereka bisa bertindak secara sinergis. Secara umum, tanah asam dengan kasar sebuah tekstur atau tekstur media lebih rentan untuk menghasilkan peningkatan produktivitas tanaman.

C. Pengendalian Pencemaran Tanah dengan Tanaman *Indigenous*

Fitostabilisasi lahan pertanian yang tercemar dengan menggunakan tanaman bertujuan mengimobilisasi logam berat pada tanah. Secara teori, bioavailabilitas logam akan berkurang jika tanaman mengendapkan logam berat. Logam berat yang diserap selanjutnya diakumulasi di daerah perakaran seperti sulfida, logam karbonat, dan beberapa logam organik lainnya. Kehadiran tanaman pada areal yang tercemar dapat meningkatkan mikroba heterotrofik yang mampu meningkatkan pertumbuhan tanaman dan berpartisipasi dalam stabilisasi logam (Mendez *et al.*, 2007).

Akumulasi logam berat dalam jangka waktu yang panjang akan ditransfer ke biomasa tanaman melalui ke rantai makanan, selanjutnya berbahaya jika dikonsumsi manusia. Fitostabilisasi merupakan pendekatan yang baik untuk pengelolaan lahan pertanian yang terkontaminasi. Suatu spesies tanaman dianggap potensial sebagai fitostabilisasi jika nilai faktor akumulasi (AF) lebih kecil dari satu (Brooks, 2001). Beberapa tanaman yang telah digunakan sebagai fitostabilisasi untuk logam berat pada tanah yang terkontaminasi Pb, As dan Zn pada tambang emas antara lain *Lolium multiflorum*, *Holcus lanatus* dan *Agrotis castellana*, *Atriplex lentiformis* untuk Pb dan Zn (Mendez *et al.*, 2007). Tiga spesies tanaman indigenous yang pernah digunakan untuk fitostabilisasi lahan yang tercemar sulfida yaitu *Elymus repens*, *Bromus tectorum*, dan *Cardaria draba*. Ketiga spesies tersebut sangat efisien dalam proses fitostabilisasi. Tanaman pohon seperti *Eucalyptus cladocalyx* juga ideal untuk fitostabilisasi lahan yang tercemar arsenik (King *et al.*, 2008). Sebenarnya alam telah menyediakan semuanya untuk dimanfaatkan tergantung kita masing-masing. Beberapa mikroorganisme yang telah ditemukan mempunyai kemampuan untuk mendegradasi xenobiotika seperti senyawa organik aromatik berkhlor. Negara kita dengan keanekaragaman yang tinggi memiliki potensi yang cukup besar untuk dikembangkan, terutama tanaman-tanaman asli Indonesia.

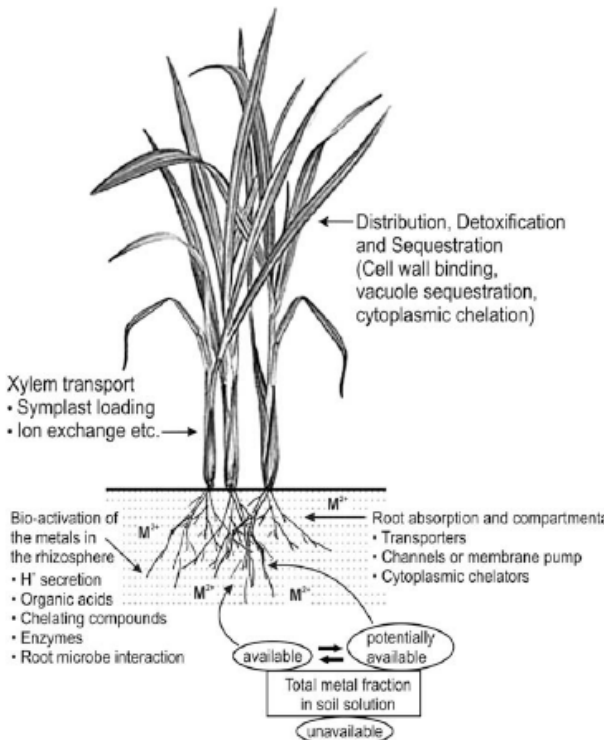
Bab 5

Mekanisme Penyerapan Logam Berat



A. Mekanisme Penyerapan Logam Berat oleh Tanaman

Penyerapan logam ke dalam jaringan tanaman melalui beberapa proses. Proses ini melibatkan beberapa langkah sebagaimana terlihat pada Gambar 5.1 yang diilustrasikan oleh Sheoran *et al.* (2009).



Gambar 5.1 Mekanisme tanaman dalam proses akumulasi logam (Sheoran *et al.*, 2009)

B. Pelarutan Logam dari Matriks Tanah

Konsentrasi logam dalam matriks tanah, berada dalam tiga macam bentuk: bentuk tersedia, bentuk yang potensial tersedia, dan bentuk yang tidak tersedia. Dalam bentuk tersedia, logam tersedia untuk organisme setiap saat. Dalam bentuk yang potensial tersedia, logam berat akan tersedia untuk organisme saat fraksi yang tersedia telah hilang. Logam pada bentuk yang tidak tersedia mempunyai daya larut yang sangat rendah dan terikat secara kimia pada sebuah matriks organik atau matriks silikat. Tanaman menggunakan metode yang bermacam-macam untuk mendesorbsikan logam dari matriks tanah (Robinson *et al.*, 2003 ; Sheoran *et al.*, 2009).

1) Difikasi asam pada rhizosfer

Pengasaman rhizosfer dan pelepasan karboksilat dianggap potensial untuk meningkatkan akumulasi logam. Sekresi H⁺ oleh akar dapat mengasamkan rhizosfer dan meningkatkan penguraian logam. Tekanan proton dari akar dijalankan oleh pompa membran plasma H⁺ ATPase dan H⁺ (Ghosh dan Singh, 2005).

2) Sekresi ligand oleh rhizosfer

Akar tanaman mengeluarkan bermacam ligand diantaranya asam organik (asam malonik dan oksalik), senyawa pembentuk kelat logam (*phytosiderophore*), dan enzim-enzim (reduktase), sebagai agen pembentuk kelate dan meningkatkan ketersediaan logam organik dalam larutan tanah dan akumulasi yang lebih besar pada tanaman (Callahan *et al.*, 2006).

3) Rhizosfer dihubungkan dengan mikroorganisme

Rhizosfer terpopulasi oleh konsentrasi yang besar dari mikroorganisme yang utamanya terdiri dari bakteri dan jamur mikoriza. Bakteri dan mikoriza yang mendiami akar ini telah dinyatakan untuk mengkatalisasi transformasi redoks yang mengarahkan ke peningkatan ketersediaan logam di dalam tanah (Idris *et al.*, 2004).

4) Absorpsi dan pengangkutan ke pucuk tanaman

Logam yang larut masuk ke dalam *symplast* akar melewati membran plasma dalam sel endodermis akar atau masuk ke sel akar melalui ruang antar sel. Hal ini memungkinkan larutan untuk mengaruhi tanaman dengan arus apoplastik. Metode perpindahan unsur yang paling efektif ialah melalui sistem vaskuler tanaman, yang disebut xylem. Untuk memasuki xylem, logam harus melintasi jalur casparian, sebuah lapisan lilin yang tidak dapat ditembus/ke dalam larutan, kecuali melewati sel-sel endodermis. Jadi untuk memasuki xylem, logam harus melewati sebuah membran, yang mungkin melalui gerak pompa atau kanal membran. Transportasi logam tipe ini yang bertempat di dalam xylem setelah larutan melintasi jalur casparian disebut transportasi *symplast*. Sistem transportasi ini lebih

teratur berdasarkan selektifitas membran plasma sel permeabel yang mengendalikan akses menuju *symplast* melalui pengangkut atau kanal-kanal ion logam tertentu atau yang umum (Sheoran *et al.*, 2009). Disaat masuk ke dalam xylem, aliran getah xylem akan mengantarkan logam ke pucuk-pucuk tanaman. Beberapa kelas dari protein telah diimplikasikan dalam transportasi logam berat dalam tanaman.

5) Distribusi, detoksifikasi dan pemisahan ion logam.

Kondisi oksidasi logam berat memiliki karakteristik pengambilan, pengangkutan dan detoksifikasi yang sangat berbeda dalam tanaman. Saat logam ditranslokasikan pada sel-sel pucuk tanaman kemudian disimpan di sel seperti *trichome* (jaringan apoplas), epidermis, mesofil, dinding sel dan lain sebagainya, di mana logam tersebut tidak akan merusak proses-proses seluler yang vital (Shah dan Nongkynrih, 2007).

Langkah terakhir dari akumulasi utama logam ialah memisahkan logam se jauh mungkin dari proses seluler manapun, yang kemungkinan akan terjadi. Pemisahan biasanya terjadi di vakuola tanaman, di mana logam/ligand logam harus ditransportasikan melalui membran vakuola. Protein pengikat logam semisal *metallothionein* (MT) dan *phytochelatin* (PC) dalam tumbuhan memainkan peranan penting dalam proses pemisahan dan juga dalam peningkatan toleransi dan akumulasi logam. Logam seperti Ag, Cu, dan Ni dipisahkan dengan cara mengikatnya dengan sulfur organik (R-SH) pada residu sistein dari peptida-peptida tersebut. MT dan PC mengombinasikan ion-ion logam menjadi tidak aktif dan mengangkutnya ke dalam vakuola-vakuola untuk dipisahkan dalam jangka waktu yang panjang (Eapen dan D'Souza, 2005).

Mekanisme proses sebagaimana diungkapkan Ghosh dan Singh (2005), menjadi tiga proses yang berkesinambungan :

a. Penyerapan logam oleh akar :

Tumbuhan yang dapat menyerap logam, selanjutnya dibawa ke rizosfer dengan beberapa cara, tergantung spesies tumbuhan itu karena tidak semua tumbuhan mampu melakukan itu sendiri karena perbedaan fisiologi. Pada perubahan pH misalnya pada tanaman *Thlaspi caerulescens*, mobilisasi seng terjadi karena penurunan pH pada daerah perakaran sampai sebesar 0,2-0,4 unit. Mekanisme penyerapan besi telah diketahui secara mendalam pada jenis rumput-rumputan. Molekul yang terbentuk akan mengkhelat besi dan diangkut ke sel akar melalui transport aktif (Ghosh dan Singh, 2005).

Selain aktif, besi juga mampu mengikat logam lain seperti seng, tembaga serta mangan. Beberapa molekul lain seperti histidin dapat meningkatkan penyerapan nikel pada tanaman *Alyssum sp.* dan senyawa peptide. Selain itu fitokhelatin yang mengikat selenium pada *Brassica juncea* dan logam lain seperti cadmium, timbal, serta tembaga. Marschner (1995), dalam meningkatkan penyerapan logam besi, tumbuhan akan membentuk molekul reduktase pada membran akar. Fungsi reduktase ini untuk mereduksi logam berat dan diangkut melalui kanal khusus ke dalam membran akar.

b. Translokasi di dalam tubuh tumbuhan :

Setelah logam yang diangkut masuk ke dalam sel akar, mekanisme selanjutnya diangkut melalui xilem dan floem ke jaringan tumbuhan yang lain. Berbagai molekul khelat yang dihasilkan tumbuhan juga berfungsi mengikat logam berat, seperti histidin yang diikat oleh Ni dan fitokhelatin-glutation pada Cd (Ghosh dan Singh, 2005).

c. Lokalisasi logam pada jaringan : Pencegahan keracunan logam berat, pada umumnya tumbuhan mempunyai mekanisme detoksifikasi, misalnya dengan menimbunnya di dalam organ tertentu seperti akar untuk Cd pada *Silene dioica*, dan *trikhoma* untuk Cd. (Collins, 1999).

C. Tumbuhan dan Remediasi Tanah Tercemar

Pemanfaatan tumbuhan untuk remediasi tanah, ditentukan oleh bagaimana memahami tentang penyerapan logam berat serta penyerapan dan atau degradasi. Saat ini pemahaman dan pengetahuan tentang akumulasi dan mekanisme penyerapan logam berat dan reduksi berkembang cukup pesat teruma yang berkaitan dengan aspek fisiologi. Chaney dan koleganya dari USDA-ARS telah mengembangkan itu sejak lama, mereka memanfaatkan tumbuhan untuk remediasi logam berat dengan mengidentifikasi beberapa karakteri penting yang dimiliki tumbuhan untuk dijadikan sebagai agen fitoremediasi. Karakter dan mekanisme penyerapannya sebagaimana telah diungkapkan oleh Ghosh dan Singh (2005) yaitu mempunyai sifat hipertoleran, kemampuan menyerap logam berat tinggi, serta mampu mentranslokasikan ke berbagai jaringan tanaman.

Beberapa jenis tumbuhan mempunyai sifat hiperakumulator yang luar biasa. Namun biasanya tumbuhan yang teradaptasi di tanah berkadar logam tinggi dan toleran terhadap logam memiliki sifat dan pola pertumbuhan yang lambat. Chaney *et al.* (1997) meyakini bahwa tanaman yang memiliki sifat hipertoleransi tinggi masih lebih penting daripada yang memiliki biomassa yang tinggi. *Brassica juncea* misalnya, dalam kondisi optimum dapat menghasilkan biomassa kering hingga 20 t/ha/musim tanam. Tanaman ini mampu mengakumulasi Zn dan Cd, namun

pertumbuhannya akan terhambat hingga separuhnya bila kadar Zn dalam biomassa mencapai 500 mg kg^{-1} . Pada tingkat hasil biomassa sebesar 10 t/ha tanaman ini hanya mampu mengambil 5 kg Zn ha^{-1} . *Thlaspi caerulescens* dapat mengakumulasi hingga $25.000 \text{ mg Zn kg}^{-1}$ tanpa reduksi hasil. Hasil panen yang diperoleh hanya sebesar 5 Mg ha^{-1} dengan jumlah seng yang diserap dari dalam tanah mencapai 125 kg ha^{-1} atau 25 kali yang dicapai oleh *Brassica juncea*.

Pada pihak lain usaha meningkatkan akumulasi logam berat, khususnya timbal, telah dilakukan di berbagai tempat. Upaya menaikkan tingkat akumulasi Pb oleh *Brassica juncea* dengan memberikan zat pengkhelat ke dalam tanah telah dilakukan. Hasilnya menunjukkan bahwa pemberian khelator EDTA ke dalam tanah sebesar $600 \text{ mg Pb kg}^{-1}$, tanaman *Brassica juncea* dapat mengakumulasi Pb hingga 1,5% biomasainya (Blaylock *et al.* 1997). Dengan demikian, untuk mencapai efisiensi pada teknologi fitoremediasi, maka dapat dilakukan dua pendekatan, yaitu menggunakan tumbuhan hiperakumulator dengan pendekatan budidaya yang tepat serta usaha manipulasi genetika serta agonomi agar biomassa tumbuhan dapat ditingkatkan.

Selain tanaman yang dikembangkan mempunyai kemampuan menyerap logam berat tinggi, juga tumbuhan dan mendegradasi zat organik. Kemampuan ini diharapkan mampu mengendalikan serta memulihkan tanah yang tercemar. Di lapangan sering dipadukan berbagai jenis tumbuhan karena keunggulan yang dimiliki masing-masing tanaman (Schnoor *et al.*, 1995). Sebagai contoh, jenis pohon, poplar (*Populus deltoides*) dan willow (keduanya dari familia *Salicaceae*) mendapat perhatian khusus karena perakarannya yang dalam dan kemampuan mendegradasi berbagai zat organik (Schnoor *et al.*, 1995). Di Iowa, 4 barisan poplar ditanam untuk mengendalikan pencemaran dari lahan pertanian sekaligus melindungi sungai karena memiliki perakaran yang dalam. Pada skala plot, terbukti pula poplar mampu mereduksi *atrazin* sebesar 10-20%. Penelitian lain juga membuktikan bahwa poplar juga ditanam sebagai penutup area landfill untuk mencegah penyebaran *leachate* (Ghosh dan Singh., 2005).

Penggunaan Tanaman *Chromolaena odorata L.*, dan *Vetiveria zizanioides L.*, serta Bahan Organik untuk Meningkatkan Penyerapan Logam Berat

A. Pendahuluan

Kontaminasi tanah oleh logam berat sebagai akibat aktivitas manusia merupakan isu lingkungan yang sangat serius di seluruh dunia. Kegagalan mitigasi logam berat yang terkonsentrasi di tanah akan mengakibatkan mobilisasi logam berat ke flora, fauna, dan juga mengganggu kesehatan manusia. Sumber utama kontaminasi tanah oleh logam berat umumnya berasal dari aktivitas industri, antara lain pertambangan. Aktivitas pertambangan menghasilkan limbah berbahaya karena adanya proses amalgamasi. Limbah yang dihasilkan kemudian akan dilepaskan ke tanah, air, maupun air tanah. Logam berat yang terkontaminasi di lingkungan, baik dalam jumlah sedikit atau besar tidak dapat dihilangkan sepenuhnya. Namun, pengaruhnya pada ekosistem dapat dimitigasi melalui imobilisasi.

Ada berbagai penelitian yang dilakukan untuk mencari metode yang efektif, murah, dan ramah lingkungan untuk mengimobilisasi logam berat yang terkontaminasi di tanah. Salah satu metode untuk mendekontaminasi tanah dari bahan yang terpolusi adalah fitoremediasi, yaitu menggunakan tanaman untuk mengakumulasi logam berat atau fitoekstraksi untuk menghambat penyebaran polutan (Ogundiran dan Osibanjo, 2008). Fitoremediasi merupakan metode biologi yang memanfaatkan tanaman tertentu untuk membersihkan lingkungan agar tidak tercemar. Teknologi ini merupakan metode yang ekonomis, hemat energi, dan ramah lingkungan. Selain itu, fitoremediasi dapat diterapkan pada areal yang luas serta berguna untuk berbagai jenis kontaminan (logam, radionuklida, dan zat organik) maupun media tumbuh (tanah, lumpur, sedimen, dan air), serta diterima oleh banyak orang.

Chromolaena odorata dipilih untuk mengurangi cemaran logam berat dalam tanah karena sifat fisiknya. *Chromolaena odorata* merupakan tumbuhan liar yang banyak dijumpai pada areal-arela terbuka karena memiliki daya adaptasi tinggi. Tanaman ini mampu mengakumulasi Hg dan Pb karena mempunyai distribusi akar baik, cepat tumbuh, dan mudah pengelolaannya. Selain itu *Chromolaena odorata* tidak dimakan, umurnya pendek, propagasinya tinggi, serta memiliki biomassa yang besar. Selain *Chromolaena odorata*, tanaman *Vetiveria zizanioides* juga merupakan tanaman remediator yang baik. Tanaman ini juga mempunyai sifatnya yang toleran pada berbagai kondisi iklim dan tanah yang ekstrim, termasuk logam berat (Roongtanakiat and Chairroj, 2001 ; Indrayatie, 2006). Luu *et al.* (2009), *Vetiveria zizanioides* mampu tumbuh pada pH antara 3,3 sampai 9,5, juga memiliki kemampuan untuk mentolerir konsentrasi Pb yang tinggi di tanah (Chen *et al.*, 2004). Selain itu mampu menyerap Cd, Cr dan Hg antar 95-99 % (Troung, 2001), serta mampu menyerap Hg antara 13-58 % (Xuhui, 2002). Penelitian ini bertujuan untuk menguji hipotesis “Pertumbuhan tanaman remediator yang lebih baik akan diikuti oleh meningkatnya penyerapan logam berat (Hg, Pb) karena meningkatnya biomassa tanaman dan berkembangnya sistem perakaran yang masif”.

B. Metode

1) Persiapan Tanah

Tanah yang digunakan pada percobaan ini berasal dari tailing dari kegiatan penambangan emas rakyat. Sampel tanah (tailing) kemudian dikering anginkan, dihaluskan. Sampel tanah selanjutnya diayak hingga lolos ayakan 2 mm, dan dicampur secara merata. Tanah ditimbang sebanyak 10 kg dan ditambah bahan amandemen organik (pupuk kandang, biochar) dan FeSO_4 dengan perbandingan 1: 0,5. Pupuk kandang yang digunakan dikering udarakan terlebih dahulu sebelum dipakai, sedang biochar berasal dari pupuk kandang yang dibakar dengan sistem oksigen terbatas (pirolisis).

Kombinasi perlakuan, antara lain :

- A1B1= Pupuk kandang+ FeSO_4 100 g + *Chromolaena odorata*
- A2B1= Biochar + FeSO_4 100 g + *Chromolaena odorata*
- A3B1= Pupuk kandang + FeSO_4 50 g + *Chromolaena odorata*
- A4B1= Biochar + FeSO_4 50 g + *Chromolaena odorata*
- A1B2= Pupuk kandang+ FeSO_4 100 g + *Vetiveria zizanioides*
- A2B2= Biochar + FeSO_4 100 g + *Vetiveria zizanioides*
- A3B2= Pupuk kandang + FeSO_4 50 g + *Vetiveria zizanioides*
- A4B2= Biochar + FeSO_4 50 g + *Vetiveria zizanioides*

Masing-masing perlakuan diinkubasi selama 30 hari sebelum ditanam.

2) Persiapan Tanaman

Bibit *Chromolaena odorata* sebelum ditanam, terlebih dulu dibibitkan selama 21 hari. Setelah tanaman mencapai tinggi 20 cm baru ditransplantasikan ke pot berisi 10 kg tanah terkontaminasi tailing, sedangkan *Vetiveria zizanioides* ditanaman berupa stek setinggi 25 cm. Penanaman dilakukan selama 4 bulan di dalam rumah kaca. Percobaan disusun menurut Rancangan Acak Lengkap (RAL) dengan 3 ulangan. Bersamaan dengan saat tanam pada tiap-tiap pot ditambahkan 10 g pupuk NPK. Selama masa penanaman, kadar air tanah tetap dipertahankan dalam kondisi kapasitas lapangan. Parameter yang diamati meliputi data pertumbuhan seperti tinggi tanaman maupun gejala-gejala fisiologis /keracunan yang nampak.

3) Pengumpulan Data Tanah dan Tanaman

Sampel tanah dan tanaman diambil pada 120 hari sesudah tanam. Tanah dari masing-masing pot diambil sebanyak 10 g untuk ditentukan nilai pH dan kadar logam berat (Hg, Pb) yang tersisa di tanah sesudah proses fitoremediasi. Contoh tanah yang diambil kemudian dianalisa logam berat (Hg, Pb) total dan tersedia. Sampel tanah untuk analisis kadar logam berat (Hg, Pb) total terlebih dahulu dikering udarakan. Kemudian sampel tanah ditumbuk dan diayak lolos ayakan 2 mm dan dicampur merata.

Pertumbuhan tanaman diamati setiap minggu selama empat bulan. Sesudah empat bulan tanaman dipanen. Sampel tanaman kemudian dibersihkan, dicuci dengan air ledeng, dan dibilas dengan air bebas ion. Kemudian sampel tanaman dikering udarakan, ditimbang, dan dipotong menjadi tiga bagian: akar, batang, dan daun. Contoh dikering oven pada suhu 60-70 °C selama 72 jam sehingga beratnya konstan. Sampel tanaman kemudian ditimbang sehingga diperoleh berat keringnya. Terakhir, sampel tanaman digiling dan dicampur merata sebelum dianalisa.

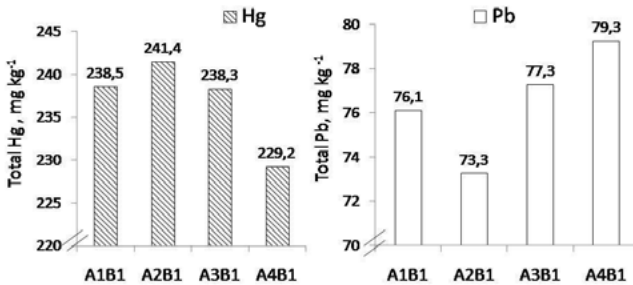
4) Analisis Sampel tanah dan Tanaman

Metode yang digunakan untuk mengukur kadar Hg dan Pb dalam sampel tanah dan tanaman ditentukan berdasarkan metode yang dikemukakan dari Puslitan (Anonymous, 2005). Kadar total Hg dan Pb dalam tanah dan tanaman ditentukan menggunakan *Atomic Absorption Spectrometry* (AAS). Satu gam tanah terkontaminasi tailing didestruksi dengan 5 ml HNO₃ dan 1 ml HClO₄, kemudian dipanaskan hingga volume tersisa 1 ml. Kemudian ditambahkan aquadest sedikit demi sedikit sampai cairan menjadi jernih. Setelah itu contoh ditambah aquadest hingga volume menjadi 10 ml kemudian disaring. Merkuri (Hg) dan Timbal (Pb) dalam tanah dan tanaman diukur memakai *Atomic Absorption Spectrometry* (AAS). Data yang terkumpul, selanjutnya dianalisis ragam untuk mengetahui pengaruh perlakuan dan serapan logam berat.

C. Hasil

1. Konsentrasi Hg dan Pb Total di Tanah Terkontaminasi Tailing dengan *Chromolaena odorata*

Konsentrasi Hg dan Pb total di tanah terkontaminasi tailing setelah fitoremediasi menggunakan *Chromolaena odorata* diamati pada umur 60 dan 120 HST. Hasil penelitian memperlihatkan bahwa pada semua macam bahan amandemen, konsentrasi Hg dan Pb total di tanah cenderung menurun selama masa pertumbuhan karena adanya serapan Hg dan Pb oleh *Chromolaena odorata* (Gambar 6.1).



Gambar 6.1 Konsentrasi Hg dan Pb Total dalam Tanah Sesudah Fitoremediasi dengan *C. odorata*

Keterangan : A1B1 = Pupuk kandang + Ferrosulfat 100g + *C. odorata*, A2B1 = Biochar + Ferrosulfat 100g + *C. odorata*, A3B1 = Pupuk kandang + Ferrosulfat 50 g + *C. odorata*, A4B1 = Biochar + Ferrosulfat 50 g + *C. odorata*

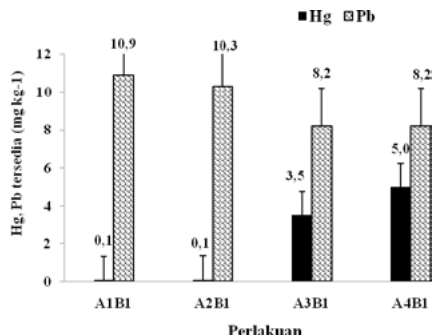
Konsentrasi total logam berat tertinggi selama 120 hari masa penanaman ditemukan pada tanah terkontaminasi tailing yang menggunakan bahan amandemen organik biochar. Kadar total Hg terbanyak ditemukan pada tailing yang diberi kombinasi bahan amandemen biochar +100 g FeSO_4 (241,4 mg kg^{-1}). Sedangkan kadar Pb total tertinggi djumpai pada kombinasi biochar+50 g FeSO_4 (79,3 mg kg^{-1}). Hal ini menunjukkan bahwa biochar lebih efektif dibandingkan pupuk kandang untuk mengurangi ketersediaan (melakukan fitostabilisasi) Hg dan Pb dalam tanah. Biochar dapat menyerap karbon organik terlarut. Penyerap karbon seperti karbon hitam dan karbon aktif memiliki afinitas yang tinggi dan kapasitas untuk menyerap senyawa organik (Brandli *et al.*, 2008).

Ketersediaan logam berat di tanah terkontaminasi tailing setelah fitoremediasi menggunakan *Chromolaena odorata* ditunjukkan pada Gambar 6.2. Ketersediaan logam berat yang paling rendah pada tanah terkontaminasi tailing dengan remediator *Chromolaena odorata* ditemukan pada bahan amandemen biochar +100g FeSO_4 (0,1 mg kg^{-1}) dan biochar+50 g FeSO_4 (8,2 mg kg^{-1}) masing-masing untuk Hg dan Pb. Konsentrasi Hg dan Pb tersedia ditanah diduga disebabkan oleh adanya pelepasan asam-asam organik yang terdapat didalam bahan

amandemen. Pengaruh penggunaan bahan amandemen baik pupuk kandang maupun biochar telah mampu menurunkan pH tanah, sehingga akan mempengaruhi pula terhadap ketersediaan logam berat Hg dan Pb di dalam tanah.

Asam-asam organik yang dilepaskan oleh bahan amandemen sehingga memperbaiki kimia tanah yang, juga sebagian diduga berasal dari eksudat akar. Pendias dan Pendias (2000) mengemukakan bahwa logam berat dapat pula masuk ke dalam sistem perakaran karena adanya asam-asam organik yang dikeluarkan olah akar. Asam-asam organik tersebut berikatan dengan logam dan bergerak masuk ke dalam vakuola sel (Ferguson, 1991).

Pada penelitian ini terlihat bahwa konsentrasi Hg total di tanah terkontaminasi tailing lebih besar dari Pb, namun sebaliknya ketersediaan Pb lebih besar dibandingkan Hg. Hal ini terlihat dari besarnya error bar pada Gambar 6.2. Berdasarkan hal ini, diduga bahwa *Chromolaena odorata* lebih efektif dalam menekan ketersediaan merkuri (Hg) dari pada timbal (Pb) melalui proses fitostabilisasi. Hasil yang sama dikemukakan juga oleh Sampanpanish *et al.* (2008) yang mengemukakan bahwa *Chromolaena odorata* sangat efektif dalam menekan ketersediaan merkuri (Hg).



Gambar 6.2 Konsentrasi Hg dan Pb Tersedia dalam Tanah Sesudah Fitoremediasi dengan *Chromolaena odorata*

Keterangan : A1B1 = Pupuk kandang + Ferrosulfat 100g + *C. odorata*, A2B1 = Biochar + Ferrosulfat 100g + *C. odorata*, A3B1 = Pupuk kandang + Ferrosulfat 50g + *C. odorata*, A4B1 = Biochar + Ferrosulfat 50g + *C. odorata*

Ketersediaan logam berat pada tanah terkontaminasi tailing yang diremediasi menggunakan *Chromolaena odorata* dihubungkan dengan nilai pH. Kisaran pH yang dapat menekan ketersediaan logam berat adalah bervariasi tergantung jenis logam beratnya. Untuk merkuri (Hg), pH yang dibutuhkan adalah pH tanah netral atau mendekati pH alkalin (pH 6,6 – 7,1) dan sedang untuk timbal (Pb) kisaran pH 7,3 - 7,4 sangat tepat untuk menekan ketersediaan logam berat dalam tanah terkontaminasi tailing.

2. Gejala Keracunan Hg dan Pb pada *Chromolaena odorata* yang Tumbuh di Tanah Terkontaminasi Tailing

Tanaman remediator (*Chromolaena odorata* dan *Vetiveria zizanioides*) yang digunakan dalam percobaan ini, sebelum ditanam pada pot yang telah ada perlakuan bahan amandemen, ditanam terlebih dulu pada pot yang tidak diberi perlakuan sebagai kontrol. Hasilnya, kedua tanaman yang ditanam tidak mampu hidup. Gejala yang ditunjukkan antara lain : Sehari setelah ditransplanting pada media yang berisi tailing (kontrol) menunjukkan gejala layu. Gejala ini terus berlangsung sampai pada hari keempat kedua tanaman tersebut kering dan mati (Gambar 6.3).

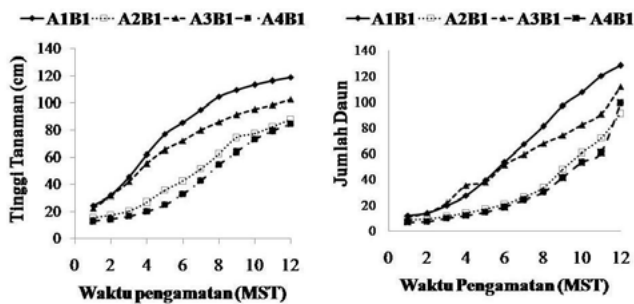


Gambar 6.3 Tanaman remediator yang mati pada perlakuan tanpa bahan amandemen

Hal ini mengindikasikan bahwa tanaman yang ditanam pada tailing yang tidak diberi bahan amandemen tanaman tidak mampu tumbuh. Penyebab utama tanaman tidak bisa tumbuh karena pH yang terlalu tinggi (9,1). Disamping itu kandungan logam berat yang terlalu tinggi juga merupakan salah satu faktor penyebab. Hasil ini sesuai dengan pendapat beberapa peneliti bahwa tailing yang tidak diberi penambahan bahan amandemen akan sulit tumbuh. Mains *et al.* (2006a), yang menggunakan barley (*Hordeum vulgare*) sebagai tanaman indikator yang ditanam pada tailing tidak diberi bahan amandemen tidak mampu tumbuh dengan baik, jika dibandingkan dengan tailing yang diberi bahan amandemen. Penyebab utamanya adalah pH tailing yang terlalu tinggi yaitu antara 7 - 8,5. Disamping itu penggunaan bahan pembenah tanah pada tailing dengan dosis yang sedikit akan mempengaruhi pertumbuhan tanaman *Lupinus angustifolius*, namun hal tersebut berbeda dengan jagung yang diberi bahan amandemen menunjukkan pertumbuhan yang baik (Mains *et al.*, 2006b). Hal yang sama terjadi pada tanaman jagung yang dicobakan pada tailing yang tidak diberi bahan amandemen tidak mampu tumbuh dengan baik kecuali diberikan bahan amandemen (King dan Craw 2006). Hasil diatas menunjukkan bahwa pertumbuhan tanaman akan berlangsung sempurna jika tanah yang tercemar tailing diperlakukan sesuai dengan yang dikehendaki tanaman.

Bukti ini terlihat dari adanya pertumbuhan tanaman remediator yang diberi bahan amandemen seperti pada penelitian ini.

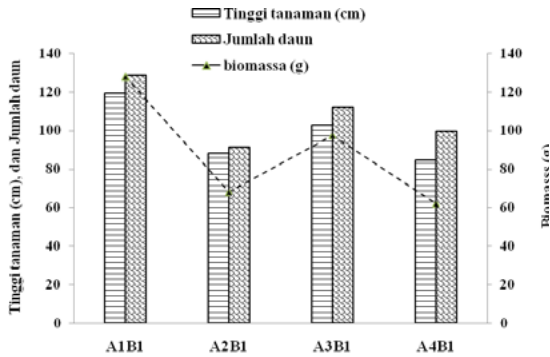
Chromolaena odorata yang tumbuh di tanah terkontaminasi tailing dapat tumbuh dengan baik meskipun nampak ada karakteristik abnormal seperti klorosis, mengeriting, muncul bintik-bintik coklat di daun yang terlihat di tahap awal pertumbuhan tanaman. Kandungan klorofil merupakan salah satu parameter yang menunjukkan dampak tekanan lingkungan terhadap tanaman, karena perubahan pigmen berhubungan dengan gejala visual akibat pertumbuhan yang tidak normal serta produktivitas fotosintesis.



Gambar 6.4 Pertumbuhan Tanaman Remediator *Chromolaena odorata* Selama 12 Minggu Penanaman

Keterangan : A1B1 = Pupuk kandang + Ferrosulfat 100 g + *C.odorata*, A2B1 = Biochar + Ferrosulfat 100 g + *C.odorata*, A3B1= Pupuk kandang + Ferrosulfat 50 g + *C. odorata*, dan A4B1 = Biochar + Ferrosulfat 50 g + *C. odorata*

Pertumbuhan tanaman *Chromolaena odorata* direpresentasikan dari tinggi tanaman, jumlah daun, dan biomasnya. Pada semua perlakuan macam bahan amandemen, terlihat bahwa tinggi tanaman dan jumlah daun *Chromolaena odorata* meningkat selama waktu pertumbuhan (Gambar 6.4). Hal ini mengindikasikan bahwa tanaman *Chromolaena odorata* yang ditanam sebagai agen fitoremediasi tumbuh secara baik karena telah terjadi perbaikan sifat kimia tanah yang bersumber dari bahan amandemen pupuk kandang, biochar dan ferosulfat yang diberikan. Tinggi tanaman *Chromolaena odorata* meningkat sehingga berat tanaman juga meningkat. Hasil pengamatan memperlihatkan bahwa tinggi tanaman dan jumlah daun pada perlakuan pupuk kandang lebih tinggi dibandingkan perlakuan biochar, demikian pula dengan biomassa (Gambar 6.5).

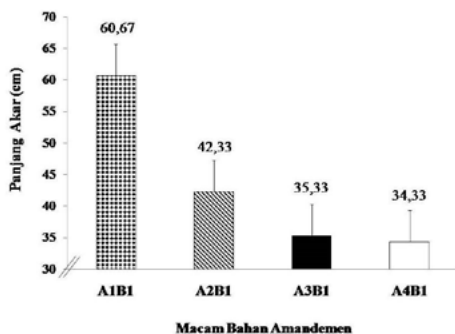


Gambar 6.5 Tinggi Tanaman, Jumlah Daun dan Biomassa *Chromolaena odorata* pada Tanah Terkontaminasi Tailing yang diberikan Berbagai Bahan Amandemen

Keterangan: A1B1 = Pupuk kandang + Ferrosulfat 100 g + *C.odorata*, A2B1 = Biochar + Ferrosulfat 100 g + *C.odorata*, A3B1= Pupuk kandang + Ferrosulfat 50 g + *C.odorata*, dan A4B1 = Biochar + Ferrosulfat 50 g + *C. odorata*

Tinggi tanaman *Chromolaena odorata* untuk masing-masing perlakuan A1B1 (86,3 cm) dan A3B1 (80,6 cm) sedang jumlah daun masing-masing untuk A1B1 (68,8) dan A3B1 (66,4). Hartley *et al.* (2009) juga menemukan bahwa pemberian biochar tidak dapat meningkatkan produksi biomassa tanaman secara signifikan. Pengukuran panjang akar menunjukkan bahwa distribusi panjang akar tertinggi pada tanaman *Chromolaena odorata* berturut-turut terdapat pada perlakuan A1B1 (60,7 cm) A2B1 (42,3 cm), A3B1 (35,3 cm) dan A4B1 (34,3 cm) (Gambar 6.6).

Hal ini berarti bahwa tanaman remediator *Chromolaena odorata* yang ditanam pada tailing yang diberi campuran bahan amandemen organik pupuk kandang dan biochar yang dikombinasikan dengan FeSO_4 100 g lebih mampu meningkatkan distribusi panjang akar tanaman, dibandingkan jika hanya menggunakan FeSO_4 50 g.



Gambar 6.6 Distribusi panjang akar *Chromolaena odorata* pada Berbagai Penambahan Macam Bahan Amandemen

Keterangan: A1B1 = Pupuk kandang + Ferrosulfat 100 g + *C. odorata*, A2B1 = Biochar + Ferrosulfat 100 g + *C. odorata*, A3B1= Pupuk kandang + Ferrosulfat 50 g + *C. odorata*, dan A4B1 = Biochar + Ferrosulfat 50 g + *C. odorata*

3. Serapan Hg dan Pb pada *Chromolaena odorata* yang Tumbuh di Tanah Terkontaminasi Tailing

Kemampuan *Chromolaena odorata* dalam menyerap logam berat Hg dan Pb diketahui dengan melakukan analisa jaringan daun pada akhir masa penanaman (120 hari). Tabel 4, memperlihatkan konsentrasi Hg dan Pb dalam seluruh jaringan tanaman *Chromolaena odorata* di akhir masa penanaman (120 hari). Konsentrasi Hg dan Pb total di seluruh jaringan tanaman *Chromolaena odorata* bervariasi tergantung bahan amandemen yang diberikan.

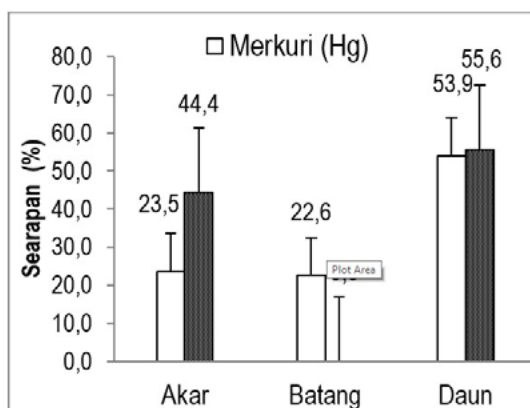
Total Hg dan Pb yang diserap *Chromolaena odorata* pada media tanam masing-masing untuk bahan amandemen pupuk kandang (A1B1 dan A3B1) 8,7 dan 8,9 mg kg⁻¹ sedangkan biochar (A2B1 dan A4B1) sebesar 5,8 dan 18,0 mg kg⁻¹. Sedangkan untuk Pb total serapannya 58,2 dan 57,0 mg kg⁻¹ untuk bahan amandemen pupuk kandang (A1 dan A3), dan biochar (A2 dan A4) masing-masing 61,0 dan 55,0 mg kg⁻¹.

Tabel 6.1 Total serapan Hg dan Pb pada tanaman remediator *Chromolaena odorata* (mg kg⁻¹)

Perlakuan	Hg	Pb
A1B1	8,7 ± 0,44	58,2 ± 1,05
A2B1	5,8 ± 0,15	61,0 ± 1,53
A3B1	8,9 ± 0,25	57,0 ± 1,26
A4B1	18,0 ± 0,80	55,0 ± 3,21

Keterangan: A1B1 = Pupuk kandang + Ferrosulfat 100 g + *C.odorata*, A2B1 = Biochar + Ferrosulfat 100 g + *C.odorata*, A3B1= Pupuk kandang + Ferrosulfat 50 g + *C.odorata*, dan A4B1 = Biochar + Ferrosulfat 50 g + *C. odorata*; Angka diikuti oleh Standar Deviasi

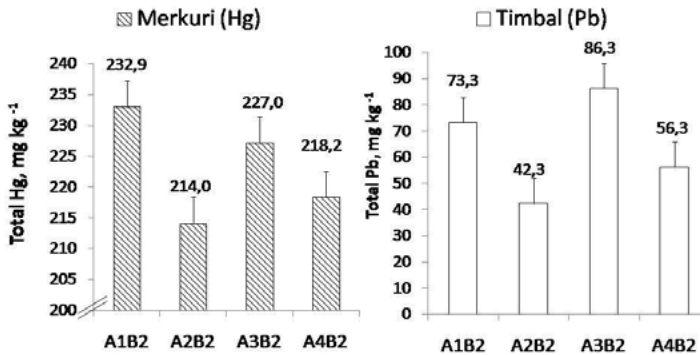
Konsentrasi serapan Hg tertinggi dijumpai pada perlakuan biochar+50 g FeSO₄ (18 mg kg⁻¹); sedang untuk Pb serapan tertinggi ditemukan pada perlakuan biochar+100 g FeSO₄ (61 mg kg⁻¹) (Tabel). Hasil penelitian memperlihatkan bahwa *Chromolaena odorata* mampu menyerap timbal (Pb) per unit massa lebih besar dibandingkan menyerap merkuri (Hg). *Chromolaena odorata* mampu menyerap merkuri (Hg) rata-rata sebesar 4% dan untuk timbal (Pb) sebesar 76%. Hasil pengamatan serapan logam berat Hg dan Pb di berbagai bagian tanaman *Chromolaena odorata* menunjukkan bahwa serapan tertinggi dijumpai di bagian daun dibandingkan bagian tanaman yang lain (akar dan batang). Prosentase serapan merkuri (Hg) di daun, akar, dan batang masing-masing adalah 53,9%, 23,5%; dan 22,6%; sedang untuk timbal (Pb) besarnya serapan adalah 55,6%; 44,4% untuk daun dan akar, sedang untuk batang tidak terdeteksi adanya logam berat Pb (Gambar 6.7).



Gambar 6.7 Serapan Merkuri (Hg) dan Timbal (Pb) pada bagian Tanaman *Chromolaena odorata*

4. Pelepasan Hg dan Pb dari Terkontaminasi Tailing dengan *Vetiveria zizanioides*

Konsentrasi Hg dan Pb total di tanah terkontaminasi tailing setelah fitoremediasi menggunakan *Vetiveria zizanioides* diamati pada 60 dan 120 hari masa penanaman. Hasil pengamatan menunjukkan bahwa Konsentrasi Hg (Hg²⁺) mengalami penurunan seiring dengan semakin lamanya waktu penanaman (Gambar 6.8). Kadar logam berat Hg dan Pb dalam waktu 120 hari masa inkubasi menunjukkan pola yang sama. Bahan amandemen biochar, baik dikombinasikan dengan FeSO₄ 100g maupun FeSO₄ 50g mampu menekan kadar total Hg dalam tanah lebih tinggi dibandingkan menggunakan amandemen organik pupuk kandang. Kadar total Hg terbanyak ditemukan pada tailing yang diberi kombinasi bahan amandemen pupuk kandang +100 g FeSO₄ (232,9 mg kg⁻¹). Sedangkan kadar Pb total tertinggi dijumpai pada kombinasi pupuk kandang +50 g FeSO₄ (86,3 mg kg⁻¹). Hal ini membuktikan bahwa penggunaan biochar jauh lebih efektif untuk menekan kadar Hg total di dalam tanah dibanding pupuk kandang.



Gambar 6.8 Konsentrasi Total Hg dan Pb di Tanah Terkontaminasi Tailing yang Diremediasi Menggunakan *Vetiveria zizanioides*

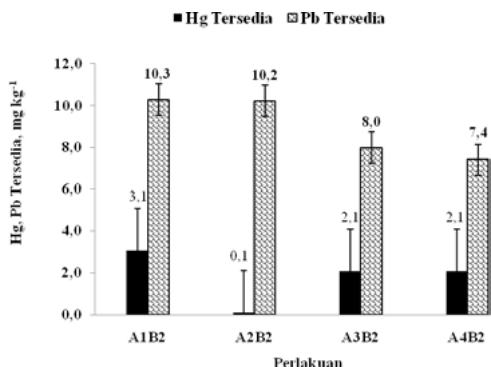
Keterangan: A1B2 = Pupuk kandang + Ferrosulfat 100 g + *V. zizanioides*, A2B2 = Biochar + Ferrosulfat 100 g + *V. zizanioides*, A3B2= Pupuk kandang + Ferrosulfat 50 g + *V. zizanioides*, dan A4B2 = Biochar + Ferrosulfat 50 g + *V. zizanioides*

Pupuk kandang merupakan stimulan untuk meningkatkan proses fitoremediasi. Keberadaan kompos dapat meningkatkan daya biodegradable tanah dan selain itu kadar anion bahan kompos yang digunakan juga memiliki kapasitas serapan yang tinggi sehingga mampu mengikat kation logam dalam tanah. Namun biochar memiliki beberapa keuntungan jika ditambahkan ke tanah termasuk diantaranya kemampuan mengadsorpsi karbon organik terlarut (Pietikainen *et al.*, 2000). Tidak seperti amandemen tanah lainnya, kemampuan biochar untuk berada di permukaan tanah dalam waktu lama, akan mengurangi kemungkinan akumulasi logam berat (Lehman dan Joseph, 2009), yang disebabkan adanya penyerap karbon seperti karbon hitam dan karbon aktif dalam biochar yang memiliki afinitas dan kapasitas yang tinggi untuk menyerap senyawa organik (Brandli *et al.*, 2008). Hal ini menyebabkan pemanfaatan biochar yang berasal dari pupuk kandang yang sudah mengalami proses pirolisis memiliki kemampuan yang jauh lebih besar dibanding pupuk kandang biasa untuk mengikat kation dalam tanah.

Selama masa penanaman *Vetiveria zizanioides* sebagai tanaman remediator logam berat, kadar konsentrasi Hg dan Pb dalam tanah menurun. Hal seperti ini terjadi dikarenakan akumulasi Hg dan Pb oleh tanaman *Vetiveria zizanioides* dan juga karena adanya proses rhizodegradasi. Rhizodegradasi merupakan bagian dari proses fitoremediasi dengan pelepasan unsur ke zona perakaran. Penurunan konsentrasi Hg dan Pb dalam tanah dapat dijadikan indikator terjadinya proses kompleksasi logam oleh eksudat. Pivetz (2001), mengatakan bahwa penurunan Hg dalam tanah disebabkan oleh penguapan, di mana polutan Hg dari dalam tanah yang diserap oleh tanaman *Vetiveria zizanioides* ditransformasikan

dan dikeluarkan dalam bentuk uap cair ke atmosfer dan kemudian diserap oleh daun. Proses ini yang kemudian disebut fitovolatilisasi (*Follage Filtration*). Persentase penurunan konsentrasi merkuri (Hg) terus meningkat hingga akhir pengamatan. Di akhir hari pengamatan, terjadi penurunan konsentrasi Hg yang tinggi (12,6 %) pada perlakuan penambahan bahan amandemen biochar. Demikian juga penurunan konsentrasi timbal (Pb) sebesar 63,3 % terjadi pada penambahan bahan amandemen yang sama (biochar).

Ketersediaan logam berat pada tanah terkontaminasi tailing setelah fitoremediasi menggunakan *Vetiveria zizanioides* ditunjukkan pada Gambar 6.9. Ketersediaan logam berat yang paling rendah pada tanah terkontaminasi tailing dengan remediator *Vetiveria zizanioides* ditemukan pada bahan amandemen biochar +100g FeSO₄ (0,03 mg kg⁻¹) dan biochar+100 g FeSO₄ (7,4 mg kg⁻¹) masing-masing untuk Hg dan Pb.



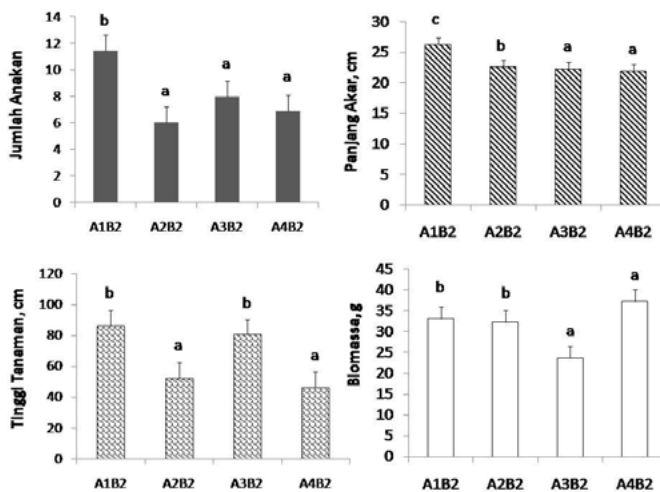
Gambar 6.9 Konsentrasi Hg dan Pb Tersedia di Tanah Terkontaminasi Tailing yang Diremediasi Menggunakan *Vetiveria zizanioides*

Keterangan: A1B2 = Pupuk kandang + Ferrosulfat 100 g + *V. zizanioides*, A2B2 = Biochar + Ferrosulfat 100 g + *V. zizanioides*, A3B2= Pupuk kandang + Ferrosulfat 50 g + *V. zizanioides*, dan A4B2 = Biochar + Ferrosulfat 50 g + *V. zizanioides*

Pemberian pupuk kandang ternyata memiliki kadar Hg dan Pb tersedia yang lebih besar. Hal ini dihubungkan dengan kadar Hg dan Pb total yang juga lebih tinggi di dalam tanah. Hasil penelitian ini memperlihatkan bahwa pemberian amandemen biochar mampu menekan ketersediaan Hg (0,5%) maupun ketersediaan Pb (18,6 %).

5. Pertumbuhan *Vetiveria zizanioides* yang Tumbuh di Tanah Terkontaminasi Tailing

Vetiveria zizanioides dapat tumbuh dengan baik pada tanah terkontaminasi logam berat. Meningkatnya konsentrasi logam berat dalam tanah berpengaruh pada pertumbuhan *Vetiveria zizanioides* (Gambar 6.10). Secara umum, pemberian bahan amandemen memberikan pengaruh yang signifikan ($p < 0,05$) terhadap pertumbuhan *Vetiveria zizanioides*. Hal ini berarti bahwa keberadaan logam berat dalam tanah tidak bersifat toksik bagi *Vetiveria zizanioides*. Hal ini berkaitan dengan batas toleransi *Vetiveria zizanioides* terhadap logam berat yang mencapai lebih dari 6 mg kg^{-1} untuk merkuri dan lebih dari 1.500 mg kg^{-1} untuk timbal (Truong, 2000). Dari berbagai bahan amandemen yang diberikan, pemanfaatan bahan amandemen pupuk kandang menunjukkan pertumbuhan *Vetiveria zizanioides* terbaik ditinjau dari jumlah anakan, tinggi tanaman, biomassa, dan panjang akar



Gambar 6.10 Parameter Pertumbuhan (Jumlah anakan, Panjang akar, Tinggi Tanaman dan Biomassa) Tanaman Remediator *Vetiveria zizanioides* pada Berbagai Amandemen.

Keterangan: A1B1 = Pupuk kandang + Ferrosulfat 100 g + *V. zizanioides*, A2B2 = Biochar + Ferrosulfat 100 g + *V. zizanioides*, A3B2= Pupuk kandang + Ferrosulfat 50 g + *V. zizanioides*, dan A4B2 = Biochar + Ferrosulfat 50 g + *V. zizanioides*; Angka diikuti oleh Standar Deviasi

6. Serapan Hg dan Pb pada *Vetiveria zizanioides* yang Tumbuh di Tanah Terkontaminasi Tailing

Konsentrasi logam berat dalam tanaman, serta total biomassa merupakan dua faktor penting dalam serapan logam berat. Logam berat Hg dan Pb yang diserap oleh *Vetiveria zizanioides* di akhir penanaman (120 hari) ditunjukkan pada Tabel 6.2. Hasil penelitian memperlihatkan bahwa pemberian bahan amandemen mampu meningkatkan kemampuan *Vetiveria zizanioides* untuk menyerap logam berat Hg dan Pb.

Tabel 6.2 Total serapan Hg dan Pb pada tanaman remediator *Vetiveria zizanioides* (mg kg⁻¹)

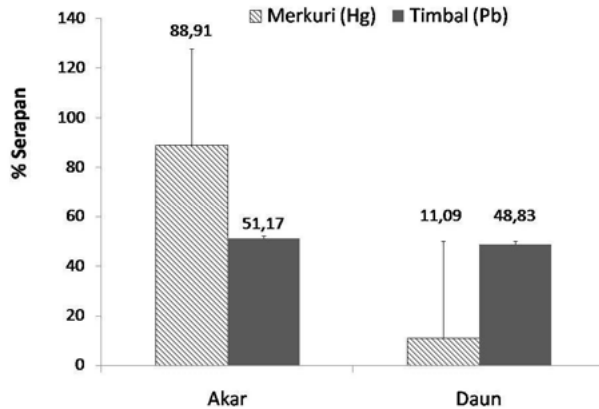
Perlakuan	Hg	Pb
A1B2	14,3 ± 0,87	45,4 ± 0,66
A2B2	33,2 ± 0,31	68,5 ± 0,44
A3B2	20,2 ± 0,91	35,8 ± 0,46
A4B2	29,0 ± 1,00	58,1 ± 0,36

Keterangan : A1B1 = Pupuk kandang + Ferrosulfat 100 g + *V. zizanioides*, A2B2 = Biochar + Ferrosulfat 100 g + *V. zizanioides*, A3B2 = Pupuk kandang + Ferrosulfat 50 g + *V. zizanioides*, dan A4B2 = Biochar + Ferrosulfat 50 g + *V. zizanioides*; Angka diikuti oleh Standar Deviasi

Konsentrasi serapan Hg dan Pb tertinggi dijumpai pada perlakuan biochar+100 g FeSO₄, masing-masing 33,2 mg kg⁻¹ untuk Hg dan 68,5 mg kg⁻¹ untuk Pb (Tabel 6.2). Hasil penelitian memperlihatkan bahwa *Vetiveria zizainoides* mampu menyerap timbal (Pb) per unit massa 2-4 kali lebih besar dibandingkan menyerap merkuri (Hg). Hal ini sesuai dengan hasil penelitian Antiochia *et al.* (2007) yang menyebutkan bahwa berdasarkan percobaan fitoekstraksi, *Vetiveria zizainoides* merupakan tanaman hiperakumulator yang tepat untuk timbal (Pb).

7. Serapan Hg dan Pb di Berbagai Bagian Tanaman *Vetiveria zizainoides*

Tanaman biasanya memiliki sensitivitas yang berbeda dalam mengakumulasi logam berat. Faktor pengendali akumulasi merkuri (Hg) di tanaman adalah konsentrasi dan jenis logam yang dimiliki masing-masing tanaman. Logam berat yang didistribusikan tanaman ke bagian-bagian tanaman berbeda, termasuk pada tanaman *Vetiveria zizainoides*. Hal ini terlihat dari konsentrasi merkuri yang terbanyak pada bagian akar, sedang untuk timbal konsentrasi di bagian akar tidak berbeda dengan bagian daun. Konsentrasi merkuri di bagian akar cukup besar, yakni 88,9 mg kg⁻¹, sedang untuk timbal sebesar 51,17 mg kg⁻¹ (Gambar 6.11).



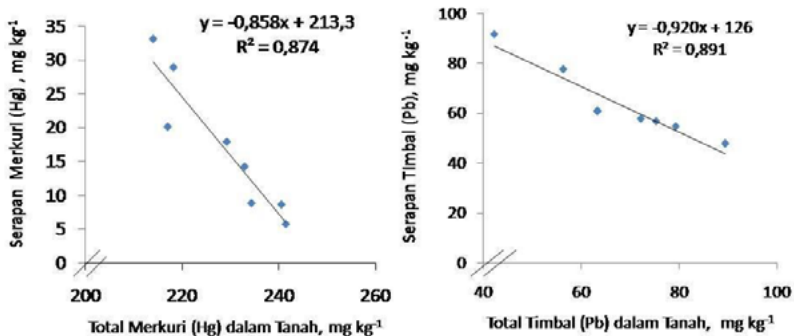
Gambar 6.11 Serapan Merkuri (Hg) dan Timbal (Pb) pada Bagian-bagian Tanaman *Vetiveria zizanioides*

Distribusi logam berat di berbagai jaringan tanaman dengan konsentrasi yang berbeda-beda disebabkan oleh kemampuan tanaman untuk mengeluarkan enzim dan eksudat yang mampu mendegradasi kontaminan organik dalam tanah.

D. Konsentrasi Hg, Pb di Tanah, Serapan Hg, Pb dan Pertumbuhan Tanaman Remediator

Kemampuan tanaman menyerap logam berat, khususnya Hg dan Pb ternyata berbanding terbalik dengan total logam berat (Hg, Pb) yang ada di dalam tanah (Gambar 6.12). Konsentrasi logam berat yang ada di dalam tanah tidak selalu berhubungan dengan ketersediaan dan mobilitas logam berat (Urunmatsoma *et al.* 2010). Konsentrasi Hg dan Pb yang lebih tinggi dalam tanah diikuti oleh berkurangnya serapan Hg dan Pb oleh tanaman remediator. Hal ini dihubungkan dengan karakteristik bahan amandemen organik (pupuk kandang dan biochar) yang ditambahkan. Asam-asam organik yang dihasilkan selama proses dekomposisi akan memacu proses fitoekstraksi tanah terkontaminasi tailing (Angin *et al.* 2007), sekaligus proses fitostabilisasi melalui proses penyerapan, pengendapan maupun pembentukan kompleks logam maupun pengurangan valensi logam berat (Ghosh dan Singh, 2005). Menurut Berti dan Cunningham (2000), tanaman yang memiliki laju transpirasi yang tinggi seperti rumput-rumputan yang berakar dalam seperti *Vetiveria zizanioides* maupun yang akarnya masif seperti *Chromolaena odorata* sangat tepat untuk proses fitostabilisasi melalui kemampuannya mengurangi jumlah air yang hilang dari daerah yang terkontaminasi logam berat.

Rumput-rumputan dengan kerapatan akar yang tinggi juga penting bagi proses rhizodegradasi. Kerapatan akar yang tinggi berhubungan erat dengan keberadaan berbagai jenis mikrobial yang berperan penting dalam degradasi kontaminan organik di daerah rhizosfer (Kirk *et al.*, 2005).



Gambar 6.12 Hubungan antara Konsentrasi Total Hg, Pb di Tanah dengan Konsentrasi Serapan Hg, Pb di Tanaman.

Pemanfaatan tanaman remediator *Chromolaena odorata* dengan bahan amandemen biochar+FeSO₄ 100g memiliki kemampuan paling besar dalam mengurangi logam berat Hg. Sebaliknya kombinasi bahan amandemen biochar+FeSO₄ 50g dengan *Vetiveria zizanioides* sangat tepat untuk menyerap logam berat Pb. Pemanfaatan tanaman remediator, baik *Chromolaena odorata* maupun *Vetiveria zizanioides* dengan bahan amandemen biochar+FeSO₄ mampu menekan ketersediaan Hg dan Pb meskipun konsentrasi Hg dan Pb-nya paling tinggi. Panjang akar yang tinggi sekaligus biomassa yang besar memperbesar kemampuan *Chromolaena odorata* dalam menyerap Hg serta kemampuan *Vetiveria zizanioides* untuk menyerap Pb. Perakaran *Chromolaena odorata* dan *Vetiveria zizanioides* yang bercabang banyak dan massif memiliki kemampuan dalam menyerap unsur logam yang tinggi.

Kedua tanaman remediator tersebut juga memiliki proses fotosintesa dan transpirasi yang sangat efektif sehingga membantu dialirkan hara dari tanah dan menyimpannya di daun dan bagian hijau lainnya. Prasad (2011) mengemukakan bahwa akibat reaksi terhadap stress logam berat terjadi proses perubahan pertumbuhan. Dalam kondisi seperti ini tumbuhan lambat laun mengalami adaptasi sampai pertumbuhannya menjadi normal. Pada tahap ini tumbuhan mengalami pertumbuhan vegetatif di mana terjadi pembelahan pada sel-sel meristematis. Gejala pertumbuhan ini nampak pada warna daun dan batang yang hijau. Kemampuan pertumbuhan berkaitan dengan erat dengan ketersediaan nutrisi yang ada di tanah yang terkontaminasi.

Ketersediaan N dapat memacu pertumbuhan *Chromolaena odorata* dan *Vetiveria zizanioides*. Dalam jaringan tumbuhan, nitrogen bertindak sebagai penyusun senyawa esensial seperti asam-asam amino. Nitrogen diserap tanaman pada umumnya dalam bentuk NH₄⁺ dan NO₃⁻. Kebutuhan terbesar tanaman akan nitrogen diambil dalam bentuk NO₃⁻ (Hopkins and Norman, 2008). Pengambilan ion oleh akar tergantung dari proses metabolisme, sedangkan laju pengangkutannya tergantung

pada permukaan akar (Schenk, 1996). Perbaikan karakteristik kimia tanah akibat pemberian bahan amandemen mampu memperbaiki pertumbuhan tanaman remediator sehingga memacu penyerapan logam berat (Hg, Pb). Tanaman yang tumbuh baik akan berpengaruh pula pada distribusi akar sehingga mampu menyerap logam-logam berat terutama Hg dan Pb. Hasil penelitian juga menunjukkan bahwa tanaman *Chromolaena odorata* dan *Vetiveria zizanioides* yang ditanam sebagai tanaman remediator dapat mengakumulasi Hg dan Pb dalam jumlah cukup besar.

E. Mekanisme dan Translokasi Hg, Pb pada Tanaman Remediator

Logam berat Hg dan Pb dikenal sebagai unsur non esensial untuk tanaman, dan keberadaannya dalam jaringan tanaman mengganggu fisiologi tanaman. Namun demikian sebagian unsur yang mudah diserap akar dan didistribusikan ke berbagai jaringan tanaman seperti akar, dan bagian atas tanaman. Hasil penelitian ini juga membuktikan adanya serapan logam berat yang didistribusikan ke berbagai jaringan tanaman

Dari kedua jenis tanaman remediator yang diuji terlihat bahwa *Chromolaena odorata* sebagian besar terdistribusi ke daun, sedangkan *Vetiveria zizanioides* tersimpan di bagian akar. Kedua tanaman remediator memiliki karakter yang berbeda dalam penyerapan pendistribusian logam berat yang diserap. Menurut Mukhopadhyay dan Maiti (2010) tipe sel di mana logam berat akan dideposisikan sangat bervariasi tergantung jenis tanaman hiperakumulator yang dipergunakan.

Presentasi serapan tanaman *Chromolaena odorata*, untuk Hg terbesar terjadi pada daun yaitu 53,89% diikuti akar dan batang masing-masing sebesar 23,54% dan 22,57%. Begitu juga Pb prosentase serapan tertinggi terlihat pada daun yaitu sebesar 55,56 % dan diakar sebesar 44,44 %, sedangkan pada batang tidak terdapat adanya serapan Pb. Hal ini menunjukkan bahwa Pb yang diserap *Chromolaena odorata* hanya didistribusikan pada daun dan akar, sedangkan pada batang tidak terdeteksi adanya distribusi Pb. Hal sebaliknya dijumpai pada tanaman *Vetiveria zizanioides*, di mana merkuri (Hg) yang diserap lebih banyak disimpan di akar kemudian di daun. Proporsi tertinggi untuk Hg yang tersimpan pada akar sebesar 88,91 % sedangkan pada daun 11,09 %. Pada logam berat Pb, proporsi tertinggi pada akar sebesar 51,17% sedangkan pada daun 48,83%.

Perbedaan distribusi logam berat pada kedua tanaman tersebut berbeda karena masing-masing tanaman memiliki karakter yang berbeda. *Chromolaena odorata* memiliki luas daun yang besar dibandingkan tanaman *Vetiveria zizanioides*. Selain itu *Chromolaena odorata* memiliki daun yang lebar sehingga dimungkinkan terjadi penyerapan hara serta logam berat yang kemudian ditranslokasikan ke daun untuk fotosintesa.

Keadaan inilah yang mengakibatkan terjadi penumpukan Hg dan Pb yang lebih tinggi di daun. Hasil penelitian yang dilakukan oleh Cruttwell *et al.* (1995), mendapatkan bahwa sistem perakaran *Chromolaena odorata* mempunyai cabang yang banyak dan adventif. Sistem perakaran seperti inilah menjadikan tanaman mampu menyerap unsur yang terikat kuat dalam tanah. *Chromolaena odorata* juga memiliki fotosintesa dan transpirasi yang sangat efektif sehingga membantu penyerapan dan penyimpanan unsur di daun maupun bagian hijau lainnya (Priyanto dan Prayitno, 2003). Namun, Singh *et al.* (2009) menemukan bahwa limbah nuklir Cesium-137 yang diremediasi dengan *Chromolaena odorata* lebih banyak terkonsentrasi di akar dibandingkan dengan di tunas.

Penyerapan logam berat baik pada Hg maupun Pb tertinggi terlihat pada daun, kemudian akar dan batang. Hal ini berlawanan dengan hasil yang diperoleh Moreno *et al.* (2005) yang mendapatkan akumulasi Hg pada tanaman *Brassica juncea* lebih banyak di akar. Begitu pula pada tanaman lupin putih, Hg yang diserap hanya sedikit yang ditranslokasikan ke cabang muda (Esteban *et al.*, 2008). Perbedaan alokasi logam berat ini terjadi karena masing-masing tanaman memiliki kemampuan dan sifat morfologi yang berbeda. Hal ini juga terjadi pada tanaman *Chromolaena odorata* dan *Vetiveria zizanioides* yang memiliki karakter dan sifat morfologi yang berbeda. Hasil penelitian Chantachon *et al.* (2004) memperlihatkan bahwa *Vetiveria zizanioides* mampu mengakumulasi dan menimbun Pb di bagian akar lebih banyak dari pada dibagian atas tanaman (daun). Menurut Kopttke *et al.* (2007) dan Tijani (2008) logam berat yang masuk ke akar tanaman melalui ruang antara sel (apoplas) melewati korteks akan terakumulasi di dekat endodermis, karena ada pita kaspari yang menghalangi. Hal inilah yang mengakibatkan akumulasi logam berat lebih besar diakar dibandingkan di batang dan daun. (Susilowati, 2010).

Tumbuhan memiliki kemampuan menyerap logam, namun jumlah berbeda antartanaman. Jenis-jenis tumbuhan dan berasal dari berbagai famili banyak sekali memiliki sifat hipertoleran, karena mampu mengakumulasi logam dalam jumlah yang tinggi dan disimpan pada jaringan tanaman. Sifat hiperakumulator artinya tanaman tersebut mampu mengakumulasi unsur logam dengan konsentrasi tinggi sebagai fitoekstraksi. Fitoekstraksi logam berat yang dilakukan tanaman, selanjutnya ditranslokasikan ke tajuk untuk diolah kembali atau dibuang pada saat tanaman dipanen (Chaney, 1995). Keadaan demikian yang sering disebut sebagai *fitomining*.

Eckenfelder (2003) berpendapat bahwa logam berat terutama merkuri (Hg) dapat atasi dengan beberapa cara antara lain melalui presipitasi, pertukaran ion, dan absorpsi. Tumbuhan menyerap nutrisi untuk pertumbuhannya melalui akar dari lingkungan sekitar di mana tumbuhan itu hidup. Proses penyerapan nutrisi dan mineral ke dalam tumbuhan melalui mekanisme transpor aktif yang terjadi antar sel dalam bentuk unsur.

Secara keseluruhan, hasil penelitian ini mendukung bahwa tanaman *Chromolaena odorata* tidak hanya dapat digunakan sebagai sumber bahan organik saja, tetapi juga digunakan sebagai tanaman remediator dalam pemulihan tanah tercemar logam berat terutama Hg dan Pb. Efisiensi dalam pengakumulasian Hg dan Pb dalam akar dan kemudian ditranslokasikan ke batang dan daun menjadi pilihan yang baik untuk mencegah penyebaran logam berat Hg dan Pb pada tanah-tanah pertanian lainnya.

Logam berat terutama Pb yang masuk jaringan tanaman dipengaruhi oleh (Alloway, 1990),

- 1) laju pergerakan Pb dari tanah ke permukaan akar,
- 2) konsentrasi ion Pb,
- 3) pengangkutan logam dari permukaan akar ke dalam akar,
- 4) waktu kontak, dan
- 5) translokasi dari akar ke tajuk tanaman.

Marschner (1995), menambahkan bahwa logam berat yang mencapai permukaan akar melalui tiga proses yaitu aliran masa, difusi, dan kontak langsung dengan akar. Penumpukan Hg dan Pb pada jaringan tanaman *Chromolaena odorata* dan *Vetiveria zizanioides* L ini dibuktikan dengan nilai factor konsentrasinya (FT) dan factor bioakumulator (BCF), disajikan pada Tabel 6.3.

Tabel 6.3 Biomassa akar, bagian atas tanaman, Faktor Translokasi (FT) dan Faktor Bioakumulasi (BCF) pada masing-masing tanaman remediator.

Perlakuan	Akar	Bagian atas	Total	FT	BCF
Serapan Hg					
<i>Chromolaena odorata</i>	24,5	30,8	55,3	1,3	0,2
<i>Vetiveria zizainoides</i> L.	10,7	1,0	11,8	0,1	0,1
Serapan Pb					
<i>Chromolaena odorata</i>	83,5	100,0	183,5	1,2	1,4
<i>Vetiveria zizainoides</i> L.	123,4	89,0	212,4	0,3	1,6

Faktor translokasi (FT) dan faktor bioakumulasi (BCF) pada Tabel 6, menunjukkan bahwa *Chromolaena odorata* memiliki nilai FT sebesar 1,3 dan 1,2., artinya bahwa nilai FT yang diperoleh lebih besar dari 1. Hal sebaliknya terlihat pada *Vetiveria zizainoides*, di mana nilai FT lebih kecil dari 1 yaitu sebesar 0,1 dan 0,7. Hal ini menunjukkan bahwa *Chromolaena odorata* mampu menyerap Hg dan Pb di akar untuk kemudian ditranslokasikan ke bagian atas (batang dan daun). Hal ini menyebabkan kadar Hg dan Pb di bagian atas tanaman yang lebih tinggi dibandingkan di bagian akar. Hal sebaliknya dijumpai pada *Vetiveria zizainoides*, yang menimbun Hg dan Pb dibagian akar lebih tinggi dari pada bagian atas tanaman (daun).

Faktor biokonsentrasi (BCF) untuk kedua tanaman menunjukkan bahwa BCF logam berat Hg lebih kecil dari 1 (0,2 dan 0,1), sedangkan logam berat Pb lebih besar dari 1 (1,4 dan 1,6). Hal ini menunjukkan bahwa kedua tanaman tersebut baik *Chromolaena odorata* maupun *Vetiveria zizainoides L*, bukan tanaman akumulator untuk Hg, tetapi diindikasikan sebagai tanaman akumulator untuk logam berat Pb. Menurut Melleem *et al.* (2009 ; 2012), tanaman yang memiliki nilai BCF lebih besar dari 1 dapat digolongkan sebagai tanaman akumulator.

Menurut Ross (1994) ada tiga tipe hubungan antara respon tanaman dengan bahan pencemar yaitu tanaman sebagai akumulator, indikator dan ekskluder. Lehman dan Franz (2004) menggolongkan tanaman sebagai akumulator apabila faktor bioakumulator lebih dari 1 (satu), sedangkan kurang dari 1 dikategorikan sebagai tanaman ekskluder. Menurut Lehman dan Franz (2004), tanaman tergolong toleran terhadap logam berat apabila logam berat yang diserap pada jaringan akar lebih tinggi dari bagian atas tanaman, namun tidak mempengaruhi pertumbuhan dan akumulasi pada bagian tanaman. Lebih lanjut dijelaskan bahwa tanaman mempunyai faktor fitoekstraktor potensial tinggi jika jumlah polutan yang dipindahkan dari tanah yang terkontaminasi ke bagian atas tanaman lebih besar dibandingkan tanah tidak terkontaminasi yang diikuti dengan peningkatan biomassa tanaman dan fitoekstraksi potensial lebih dari 0,5%.

Fitostabilisasi Lahan Pertanian Pasca Erupsi Gunung Kelud Dengan Tanaman *Indigenus*

A. Latar Belakang

Penggunaan pupuk dan pestisida telah mampu memberikan kontribusi pada produksi pangan nasional. Namun dibalik keberhasilan tersebut terdapat bahan ikutan berupa logam berat dan berdampak negatif terhadap produktivitas sumberdaya lahan. Permasalahan ini menjadi isu yang perlu dikaji, terutama yang berkaitan dengan keberadaan kandungan logam berat seperti Pb, Cd, Cu, dan Zn yang berpotensi sebagai sumber pencemar (Tijani, 2008 ; Zeng *et al*, 2007).

Pencemaran lahan pertanian di Indonesia terutama Pb, Cd, Cu, dan Zn pada lahan yang dikelola secara intensif dilaporkan telah melampaui nilai ambang batas. Kadar Pb pada bawang merah di daerah Tegal dan Bekasi dilaporkan sekitar $3,67 \text{ mg kg}^{-1}$, sementara ambang batas Pb dalam sayuran yang ditetapkan sebesar $2,0 \text{ mg kg}^{-1}$ (Adi, 2003). Begitu pula kadar Cd yang diperoleh sekitar $0,29 \text{ mg kg}^{-1}$, padahal ambang batasnya adalah $0,1 \text{ mg kg}^{-1}$. Subowo *et al*, (2004) juga melaporkan, telah terjadi pencemaran Pb sebesar 206-449 mg kg^{-1} pada tanah sawah di kawasan industri Tangerang Jawa Barat. Kegagalan mitigasi logam berat yang terkonsentrasi di tanah akan mengakibatkan mobilisasi logam berat ke tanah dan tanaman, selanjutnya akan berdampak pada kesehatan manusia.

Permasalahan penggunaan bahan agrokimia pada beberapa wilayah diatas perlu mendapat perhatian. Kondisi ini juga terjadi di beberapa sentar hortikultura, sebagai contoh di wilayah kota Batu dan kabupaten Malang juga perlu perhatian. Kedua wilayah tersebut merupakan sentra tanaman hortikultura yang disinyalir penggunaan pupuk dan pestisidanya cukup tinggi. Residu pupuk dan pestisida yang mencemari lahan pertanian akan terakumulasi dan menimbulkan bioakumulasi dalam tubuh manusia yang mengonsumsinya (Anonymous, 2013). Selain dampak penggunaan bahan agrokimia diatas, tahun 2014 kedua wilayah tersebut juga terpapar abu erupsi gunung Kelud. Bahan ikutan tersebut turut mempengaruhi produktivitas lahan.

Terdapat beberapa unsur kimia dari bahan ikutan erupsi gunung berapi yang berpotensi menurunkan produktivitas lahan. Kadar keasaman tanah (pH) misalnya terdeteksi antara 4–5 serta beberapa unsur lain yang berpengaruh terhadap produktivitas tanah. pH tanah yang rendah ini jika tidak diatasi, terutama pada daerah yang drainasenya buruk akan mengalami oksidasi lanjutan dan berpotensi menurunkan pH antara 2 - 3 (Stewart *et al*, 2006 ; Wilson *et al*, 2007). Akumulasi abu vulkanik pada beberapa unsur terutama silika (Si) sampai mencapai 45,9 % (Suriadikarta, 2010), sedangkan Stewart *et al*, (2006) mendapatkan kandungan SiO₂ yang terdapat pada gunung St. Helens sebesar 57-67 %. Hal ini menunjukkan bahwa bahan yang di erupsikan dari gunung api mampu menyediakan kandungan hara yang cukup, namun keberadaannya di dalam tanah berlebihan akan menjadi toksik bagi tanaman. Pada aspek lain, akumulasi abu vulkanik yang tinggi dapat membunuh biodiversitas tanah yang berfungsi untuk menjaga keseimbangan maupun sebagai dekomposer. Kondisi seperti ini mengakibatkan produktivitas tanah dalam jangka waktu pendek berpengaruh. Namun dalam jangka panjang, keberadaannya memberikan dampak positif untuk produktivitas tanah. Sudaryo dan Sutjipto (2009), terdapat empat bahan mineral utama yang terkandung dalam abu vulkanik yaitu : Besi (Fe), Aluminium (Al), Magnesium (Mg), dan Silika (Si).

Dalam kasus ini, petani dihadapkan dengan kebutuhan mendesak untuk memanfaatkan lahan yang terpapar abu vulkanik. Namun pada sisi lain produktivitas tanah masih menyisakan masalah termasuk akumulasi logam berat dari penggunaan bahan agrokimia, sehingga diperlukan upaya pemulihan dalam jangka pendek. Melihat fenomena ini maka langkah untuk menstabilkan lahan yang tercemar segera dilakukan, salah satunya dengan menggunakan tanaman *indigenous*. Penggunaan tanaman *indigenous* untuk fitoremediasi saat ini dianggap teknologi yang paling murah, dibandingkan dengan cara fisik maupun kimia (Mc. Mohan, 2000). Ogundiran dan Osibanjo (2008) telah menggunakan tanaman untuk menghambat penyebaran polutan agar tidak menyebar luas (fitostabilisasi). Teknologi pembersihan logam berat seperti ini juga telah dilaporkan oleh Robinson *et al*, (2009) dan Hamzah *et al*, (2012) terutama pada lahan yang tercemar logam berat Pb. Berdasarkan hal tersebut maka penelitian pembersihan lahan seperti ini perlu dilakukan untuk menstabilkan lahan pertanian yang tercemar agar digunakan kembali sebagai lahan pertanian yang sehat.

B. Permasalahan

Rendahnya produktivitas lahan pertanian saat ini tidak hanya disebabkan oleh penggunaan bahan agrokimia (pupuk dan pestisida) yang tinggi tetapi juga disebabkan faktor lain. Salah satu faktor yang ikut mempengaruhi produktivitas lahan adalah debu dari erupsi gunung berapi. Di Jawa Timur sendiri total kerusakan lahan pertanian akibat erupsi gunung Kelud tahun 2013 dilaporkan seluas 4781 ha, dengan kerugian mencapai 377,54 miliar (Kementan, 2014).

Permasalahan pencemaran lahan pertanian terutama logam berat ditambah dengan tutupan abu erpsi gunung Kelud menjadi permasalahan yang kompleks.

Beberapa unsur dari bahan ikutan abu vulkanik antara lain ; Si, Al, Mg dan Fe yang keberadaannya cukup tinggi. Tinggi Si misalnya akan berdampak baik dalam jangka panjang, namun keberadaan Al dan Fe akan segera menurunkan pH tanah sehingga tanah menjadi masam. Tingginya Al dan Fe juga akan memfiksasi P sehingga tidak tersedia bagi tanaman. Kondisi inilah yang perlu diupayakan untuk meningkatkan produktivitas tanah.

Perbaikan produktivitas tanah telah banyak dilakukan terutama menggunakan tanaman remediator. Beberapa peneliti melaporkan, ada terdapat sekitar 400 spesies tumbuhan yang bisa digunakan untuk menyerap logam berat dan memperbaiki produktivitas tanah (Reves, 2006 ; Robinson et al, 2009). Beberapa diantaranya adalah *Vetiveria zizanioides*, *Alyssum bertolonii*, *Brassica juncea* dan beberapa jenis tanaman lain yang dapat digunakan untuk meremediasi tanah yang tercemar (Sheoran et al., 2009). Selain itu tanaman *Equisetum hyemale* yang digunakan mampu menghilangkan Pb dan Cr (82,2% dan 61,2%) pada air lindih (Kurniati, et al, 2014). Hamzah et al (2012), menggunakan tanaman *Chomolaena odorata* untuk meremediasi tanah yang tercemar tailing tambang emas rakyat. Tanaman tersebut selain digunakan untuk memperbaiki kesuburan tanah, juga mampu menyerap logam berat Pb sebesar 55,56 %. Potensi ini sebenarnya bisa digunakan untuk merehabilitasi lahan pertanian yang tercemar logam berat pasca erupsi gung Kelud, namun perlu dipelajari lebih lanjut mengenai sistim distribusi perakaran dan biomassa tanaman, serta kemampuan tanaman remediator dalam meremediasi logam berat pasca letusan gunung kelud.

C. Metode

1. Pemetaan Lokasi Penelitian dan Koleksi Tanaman *Indigenous*

Penelitian dilaksanakan di rumah kaca dan lahan petani, analisis tanah dan cemaran logam berat dilakukan di laboratorium. Penelitian lapangan dilaksanakan di beberapa tempat telah terindikasi tercemar residu bahan agrokimia. Disamping tercemar kedua wilayah tersebut juga terkena dampak erupsi gunung Kelud yang cukup parah sehingga permasalahannya menjadi kompleks. Tempat yang dijadikan sebagai obyek penelitian adalah lahan petani yang telah teridentifikasi tercemar logam berat dan terpapar logam berat. Indikator yang dipakai adalah sejarah penggunaan lahan, intensitas pemupukan dan penyemprotan serta jenis pupuk dan pestisida yang digunakan. Data tersebut kemudian dilakukan sinkronisasi dengan data hasil analisis tanah.

Pengamatan dilakukan pada 3 plot di masing-masing berukuran 200 m². Masing-masing plot kemudian dibuat petak berukuran 1 m x 1 m sebagai petak pengamatan. Pada masing-masing petak, dilakukan analisis sederhana untuk menghitung tingkat dominasi tumbuhan. Setiap tumbuhan bawah dicatat nama jenis, dan jumlah individu kemudian dianalisis untuk mengetahui tingkat dominasi tumbuhan menggunakan metode yang dikembangkan Soerianegara dan Indrawan, (2005) dan Kent, (1993). Jika suatu spesies sering ditemukan dan memiliki kepadatan yang tinggi dalam suatu habitat dibandingkan dengan spesies lainnya, maka spesies yang bersangkutan merupakan spesies dominan dan memiliki kemampuan hidup tinggi sehingga bisa dikembangkan sebagai tanaman remediator. Hasil analisis dominasi tumbuhan pada tahap ini akan diambil 3 jenis tumbuhan dominan, selanjutnya dijadikan sebagai kandidat tanaman remediator.

2. Pengambilan Contoh Tanah, Analisis Sifat Tanah dan Logam Berat

Pengambilan contoh tanah dilakukan secara acak di masing-masing plot secara komposit pada berbagai kedalaman. Contoh sampel kemudian dibawa ke laboratorium untuk dianalisa dan sebagian dijadikan sebagai media percobaan. Sampel tanah yang diambil kemudian, dikeringkan dan diayak dengan ayakan 2 mm. selanjutnya dianalisis untuk mengetahui status kesuburan dan cemaran logam berat. Analisis sifat fisik tanah meliputi tekstur (pipet), kemantapan agregat (ayakan kering/basah), Bobot isi (Clod) serta kadar air (%). Analisis kimia meliputi pH (H₂O), bahan organik tanah (Walkey & Black), N (Kjedahl), P total (olsen), K total, KTK (Amonium Acetat pH 7,0), Calcium (Ca), Magnesium (Mg), Sulfur (S), Alumunium (Al), Besi (Fe), Tembaga (Cu), Seng (Zn), dan silikat (Si), Sedangkan logam berat yang dianalisa terdiri dari Timbal (Pb), Kadmium (Cd), Crom (Cr), Sianida (Cn) dan Arsenik (As), dengan menggunakan AAS (*Atomic Absorbtion Spectrometry*).

3. Studi Kemampuan Tanaman *Indigenous* Dalam Meremediasi Logam Berat

Tahap ini akan dilakukan percobaan rumah kaca untuk mengetahui mekanisme dan karakteristik tanaman remediator dalam menyerap logam berat. Percobaan ini menggunakan pot ukuran 10 kg, dengan media tanah yang tercemar logam berat yang didatangkan dari lokasi penelitian. Tanaman remediator yang digunakan adalah 3 (tiga) jenis tanaman *indigenous* yang dominan tumbuh dan teradaptasi disekitar tempat penelitian yang memiliki potensi sebagai tanaman remediator. Jika tanah yang digunakan mempunyai kesuburan dan kandungan bahan organik yang rendah berdasarkan hasil analisis tanah maka media tanam akan ditambahkan dengan bahan organik (pupuk kandang).

Penanaman 3 jenis tanaman indigenous yang dominan tumbuh pada masing-masing lokasi, ditambah dengan 2 jenis tanaman yang sudah diketahui potensinya yaitu *Chromolaena odorata* dan *Vetiveria zizanioides*. Dengan demikian akan di cobakan 5 jenis tanaman pada 2 kondisi wilayah yang tercemar. Percobaan ini disusun dalam rancangan acak lengkap (RAL) dengan 3 ulangan, sehingga akan terdapat 30 pot percobaan. Perlakuan percobaan sebagaimana terlihat :

KODE PERLAKUAN	
KM-1 = Tanaman indigenous 1	KB-1 = Tanaman Indigenous 1
KM-2 = Tanaman indigenous 2	KB-2 = Tanaman Indigenous 21
KM-3 = Tanaman indigenous 3	KB-3 = Tanaman Indigenous 3
KM-4 = Chromolaena odorata	KB-4 = Chromolaena odorata
KM-5 = Vetiveria zizanioides	KB-5 = Vetiveria zizanioides

Pengamatan dilakukan setiap minggu sampai tanaman menjelang panen (3-4 bulan). Parameter yang diamati meliputi pertumbuhan dan keadaan visual yang merupakan gejala defisiensi nutrient serta kandungan hara tanaman dan logam berat yang mencerminkan kemampuan penyerapan tanaman. Pada saat panen akar, batang dan daun dipisahkan kemudian dicuci dengan akuades untuk menghilangkan kotoran kemudian di oven pada suhu 60°C selama 72 jam selanjutnya dilakukan analisis logam berat pada tanah dan tanaman (akar, batang, dan daun).

D. Hasil

1. Pemetaan Lokasi Penelitian

Tempat penelitian yang dijadikan objek penelitian adalah lokasi dengan kegiatan pertanian sejak dulu dengan intensitas penggunaan lahan yang tinggi. Beberapa tanaman hortikultura yang diusahakan sepanjang tahun diantaranya Apel, kentang, wortel, kubis, tomat, sawi dan berbagai jenis tanaman hortikultura lain. Tingginya kegiatan disektor pertanian khususnya hortikultura dalam jangka waktu panjang memberikan dampak terhadap produktivitas tanah. Pengaruh yang paling besar adalah adanya residu pupuk maupun pestisida yang tinggi. Hasil pemantauan di lapangan tentang penggunaan pestisida pada wilayah tersebut intensitasnya cukup tinggi. Jenis pestisida dan bahan aktif yang digunakan didominasi oleh fungisida sebanyak 9 jenis dan insektisida 4 jenis (Tabel 7.1).

Jenis-jenis pestisida diatas intensif digunakan untuk tanaman hortikultura terutama sayuran dan apel. Jenis-jenis tanaman tersebut merupakan penopang utama kehidupan sehari-hari kedua wilayah. Beberapa jenis pestisida yang digunakan memiliki bahan aktif yang jika digunakan dalam jangka waktu lama akan berdampak pada kesehatan tanah. Tingginya kandungan merkuri (Hg) maupun kadmium (Cd) merupakan salah satu dampak dari penggunaan fungisida yang telah berlangsung dalam jangka waktu lama.

Tabel 7.1 Jenis fungisida dan insektisida yang digunakan beserta bahan aktif

No	Nama Jenis Fungisida	Bahan Aktif
1	Curzale 8/64 WP	Simoksaniil 8,36 % ; Mankozebe 64,64 %
2	Equation Pro 52 WG	Simoksaniil 29 % ; Famoksadan 22,5 %
3	Previcurn 722 SL	Propamorkarb hidroklorida 722,9/L
4	Victory 80 WP	Mankozebe 80 %
5	Aurora 70 WP	Propinebe 70 %
6	Bazoka 80 WP	Mankozebe 80 %
7	Fulicur 25 WP	Tebukonazol 25 %
8	Daconil 75 WP	Klorotalonil 75 %
9	Karibu 75 WP	Klorotalonil 75 %
	Jenis Insektisida	Bahan Aktif
10	Ripcord 50 EC	Cypermtrin 50 g/l.
11	Windes 100 EC	Imdak loprid 100 g/l.
12	Capture 50 EC	Cypermtrin 50 g/l.
13	Greta 50 EC	BPMC 500 g/l.

2. Karakteristik Tanah dan Cemaran Logam Berat

Hasil anaalisis tanah awal kedua lokasi disajikan pada Tabel 1.1. Secara fisik tanah dikedua lokai memiliki sedikit perbedaan. Lokasi pertama di wilayah kecamatan Bumiaji kota Batu bertekstur lempung berpasir dengan sebaran fraksi masing-masing pasir 56%, debu 8% dan liat 35 %. Hal ini berbeda dengan Ngantang-Pujon kabupaten Malang yang memiliki fraksi pasir 27%, debu 9 % dan liat 65 %. Sifat kimia sebagian besar kandungan unsur makro terlihat rendah sampai sangat rendah. Hal ini terlihat dari beberapa unsur makro terutama C-organik, N, P, K, KTK pada kedua lokasi yang berada dalam kategori rendah.

Kecamatan Ngantang-Pujon kabupaten Malang kandungan hara yang diperoleh C-organik (1,73), N (0,11), P (0,64), K (0,09), dan KTK (20,29), sedangkan wilayah kecamatan Bumiaji masing-masing C-organik (1,86), N (0,13), P (0,64), K(0,03) dan KTK (6,00). Data ini menunjukkan bahwa kedua lokasi yang dijadikan sebagai objek penelitian memiliki kandungan hara makro yang rendah. Namun beberapa unsur mikro terlihat cukup tinggi diantaranya Mn, Zn, Cu, dan Al. Rendahnya C-organik dan KTK mengindikasikan kesuburan tanah tersebut tergolong rendah (Tabel 7.2).

Hasil analisa kandungan logam berat sebagai indikator kesehatan tanah, telah melewati nilai ambang abatas yang dipersyaratkan. Kandungan logam berat dari tujuh unsur yang dianalisis empat diantaranya telah melewati nilai ambang batas yaitu Hg, Cd, Ni, Cr, dan Co sehingga tergolong tercemar. Dua unsur logam berat lain (Pb dan As) tergolong rendah bahkan ada yang tidak terdeteksi. Kandungan logam berat yang dianggap sangat berbahaya didalam tanah adalah Hg dan Cd, jika dibandingkan dengan logam berat yang lain. Hasil analisis kedua logam berat tersebut diperoleh angka sebesar 13,62 dan 9,05 mg⁻¹kg untuk Hg, sedangkan Cd sebesar 2,26 dan 1,93 mg⁻¹kg. Hasil analisis inilah yang selanjutnya digunakan untuk penelitian pada tahap berikutnya, yaitu fitostabilisasi logam berat Cd dan Hg.

Tabel 7.2 Hasil Analisa Tanah Tercemar

No	Unsur	KB	Kategori *	KM	Kategori *
1	pH H ₂ O	6,22	netral	6,18	netral
3	C-organik (%)	1,73	rendah	1,86	rendah
4	N-total (%)	0,13	rendah	0,11	rendah
5	C/N	13,30	rendah	16,91	rendah
6	P-olsen (mg mg kg ⁻¹)	0,64	rendah	0,64	rendah
7	K (me/100g)	0,03	rendah	0,09	rendah
9	Ca (me/100g)	1,00	rendah	0,48	rendah
10	Mg (me/100g)	0,35	rendah	0,22	rendah
11	KTK (me/100g)	6,00	rendah	20,29	sedang
12	S	0,04	rendah	0,03	rendah
13	Fe	1,64	rendah	1,38	rendah
14	Mn	524,16	tinggi	648,52	tinggi
15	Zn	42,15	tinggi	22,56	tinggi
16	Cu	49,31	tinggi	38,16	tinggi

17	Al	3,34	rendah	4,46	tinggi
18	Merkuri (Hg) (mg kg ⁻¹)	13,62	tinggi	9,05	tinggi
19	Timbal (Pb) (mg kg ⁻¹)	0,61	rendah	LoD**	-
20	Kadmium (Cd) (mg kg ⁻¹)	2,26	tinggi	1,39	tinggi
21	Nikel (Ni) (ppm)	10,89	tinggi	9,12	tinggi
22	Krom (Cr) (ppm)	11,93	tinggi	6,54	tinggi
23	Kobalt (Co) (ppm)	17,80	tinggi	15,20	tinggi
24	Arsen (As) (ppm)	0,45	rendah	0,46	rendah
25	Tekstur	Lempung berpasir			Lempung berliat

Sumber : * Hardjowigwno, S. 1995.

** Limid of Detection (LoD)

Tingginya kandungan logam berat yang diperoleh diduga berasal dari dua sumber yaitu (1) berasal dari silikat yang diurupsikan oleh gunung kelud dan (2) berasal dari residu pestisida yang telah terakumulasi dalam jangka panjang. Tingginya kandungan silikat (Si) yang diperoleh (73,42 %) (Tabel 2.1) dari abu letusan kemudian mengalami oksidasi membentuk garam-garam yang bersifat asam. Hal ini diperkuat oleh Herman (2006), mineral silika dan silikat besi, memiliki sifat kimia secara aktif, bila bersentuhan dengan udara akan mengalami oksidasi sehingga membentuk garam-garam yang bersifat asam. Cairan asam mengandung sejumlah logam beracun seperti As, Hg, Pb, dan Cd yang dapat mencemari atau merusak lingkungan.

Tabel 7.3 Hasil analisis kimia abu gunung Kelud

Kandungan Hara dan Logam Berat									
pH (H ₂ O)	C-org	N-total	P	K	Ca	Mg	Si	Cd (ppm)	Hg (ppm)
7,5	4,83	0,40	23	124	3,98	0,18	73,42	td	0,23

Tingginya kandungan Cd dan Hg pada tanah juga berasal dari penggunaan pupuk dan pestisida. Akumulasi fosfat yang digunakan dalam bentuk TSP dalam jangka panjang dapat memicu terbentuknya unsur Cd. Jumlah normal kadmium di tanah berada di bawah 1 mg kg⁻¹. Secara alami logam berat Cd rata-rata kandungannya hanya 0,4 mg kg⁻¹, tetapi angka yang diperoleh pada kedua lokasi berada diatas nilai ambang batas yaitu 2,26 dan 1,39 mg kg⁻¹. Pada tanah yang bebas polusi kandungan Cd adalah 0,06-1,00 mg/kg tanah.

Peningkatan kandungan Cd dapat berasal dari asap kendaraan bermotor dan pupuk fosfat yang digunakan sebagai pupuk. Pupuk yang diberikan ke tanaman umumnya hanya diserap sedikit (1-5%). Sisanya akan membentuk residu dan menjadi toksik bagi tanaman. Logama berat Cd lebih mudah diserap oleh tanaman dibandingkan dengan logam berat lain seperti timbal (Pb). Logam berat ini bergabung bersama timbal dan merkuri sebagai *the big three heavy metal* yang memiliki tingkat bahaya tertinggi pada kesehatan manusia (Widaningrum et al, 2007 ; Subowo et al., 1999).

Tresnawati et al, (2014), tanaman yang sering dipupuk dengan fosfat (SP-36 dan NPK) dalam jangka waktu lama dapat memicu akumulasi Cd di dalam tanah. Hasil pengukuran kandungan logam berat Cd yang pernah dilakukan mencapai $4,22 \text{ mg kg}^{-1}$, yang berarti telah melebihi ambang batas yang diperbolehkan. Nilai ambang batas kadmium dalam tanah dibawah 2 mg kg^{-1} (Puslitbangtan, 2003), sedangkan menurut Alloway (1995) batas kritis Cd dalam tanah sebesar 3 mg kg^{-1} . Jumlah normal kadmium di tanah seharusnya berada di bawah 1 mg kg^{-1} (Nopriani, 2011). Selain fosfat, penggunaan pestisida terutama fungisida juga dapat meningkatkan logam kadmium dalam tanah. Lahuddin (2007), pestisida yang digunakan juga mengandung 0,018 ppm logam kadmium, batuan fosforit dapat mengandung 0-500 mg kg^{-1} logam kadmium (Cd).

Hal yang sama terlihat pada kandungan logam berat merkuri (Hg), di mana hasil penelitian menunjukan angka yang cukup besar yaitu sebesar $13,62 \text{ mg kg}^{-1}$ di kota Batu (KB) dan $9,05 \text{ mg kg}^{-1}$ di kabupaten Malang (KM). Angka ini sudah berada diatas nilai ambang batas (NAB) yang ditetapkan dalam peraturan pemerintah No. 18 tahun 1999 tentang pengelolaan limbah berbahaya dan beracun (B3) yaitu sebesar $0,01 \text{ mg kg}^{-1}$. Widhiyatna (2005) juga mendapatkan angka yang relative sama pada areal pertanian di wilayah Jawa Barat yaitu $1,47 - 30,53 \text{ mg kg}^{-1}$. Hal ini menunjukan bahwa pada beberapa wilayah sentra produksi pertanian di Indonesia sudah waktunya diwaspadai akibat cemaran logam berat. Pencemaran logam berat Hg yang terjadi diwilayah ini relative sama dengan kadmium (Cd). Sumber utamanya dari fungisida yang notabene mengandung *alkylmerkuri*.

Alloway, (1995), Sumber pencemaran logam berat berasal dari bahan agrokimia, asap kendaraan bermotor, bahan bakar minyak, pupuk organik, buangan limbah rumah tangga, industri, dan pertambangan. Kondisi ini akan mempengaruhi kesehatan tanah dan tanaman dalam jangka panjang. Dampak yang terlihat terletak pada perubahan metabolisme tanaman sehingga mempengaruhi penurunan hasil pertanian. Proses ethylisasi merkuri sebagai akibat dari interaksi logam, biasanya terjadi pada kondisi terbatas selanjutnya membentuk elemen berbahaya, karena merkuri mudah terakumulasi pada rantai makanan.

Melihat fenomena yang ada, maka langkah strategi yang dapat dilakukan selanjutnya adalah dengan mengoptimalkan penggunaan sumberdaya lokal yang mampu memperbaiki tanah sehingga tanaman mampu tumbuh. Salah satunya adalah penggunaan tanaman *indigenous* sebagai agen fitoremediasi. Tanaman-tanaman liar lokal diharapkan mampu menstabilkan logam berat di tanah sehingga tanah menjadi sehat kembali. Tanah yang sehat akan menghasilkan produk pertanian yang sehat.

3. Koleksi Tanaman Indigenous Sebagai Fitostabilisasi

Hasil identifikasi tumbuhan *indigenous* sekitar areal pertanian intensif pasca letusan gunung Kelud pada wilayah penelitian, keduanya memiliki karakteristik yang relative sama. Identifikasi lakukan dengan melihat dominasi tumbuhan yang tumbuh di daerah tersebut. Karakter yang dimunculkan oleh tumbuhan tergantung pada kondisi lingkungan. Sifat toleran tanaman terhadap keberadaan logam berat merupakan karakter dari suatu tumbuhan yang dapat diamati. Tumbuhan yang dikatergorikan sebagai tanaman akumulator jika memiliki kemampuan menyerap tinggi dan toleransi pada daerah tersebut serta memiliki kemampuan mentarnslokasikan ke berbagai jaringan tanaman (Brown et al, 1995).

Kedua lokasi ditemukan sekitar 24 jenis tumbuhan liar yang dominan dari total 4436 tumbuh yang teridentifikasi. Dominasi tumbuhan diketahui dari perhitungan Indeks Nilai Penting (INP). Dari total tumbuhan yang dominan selanjutnya dipilih 3 jenis tumbuhan yang memiliki nilai INP tertinggi. Nilai INP yang tinggi suatu spesies di suatu wilayah akan menentukan tingkat adaptasi pada lingkungan tersebut (Soerianegara dan Indrawan, 2005). Hasil perhitungan nilai INP disajikan pada Tabel 7.4. Nilai INP pada kedua lokasi yang dominan antara lain : (1) Lulangan (*Eleusine indica*, L) sebesar 53,1 (2) Wedusan (*Ageratum conyzoides* L) 44,6, dan (3) Patikan (*Euphorbia hirta*, L) sebesar 26,1 untuk kota Batu. Sedangkan kabupaten Malang masing-masing: Lulangan (*Eleusine indica*, L) 42,2 (2) Tempuyung (*Sonchus Arvensis*) 42,6 dan tumberan (*Fimbristylis miliacea*) sebesar 38,3. Beberapa tumbuhan yang diidentifikasi memiliki potensi sebagai tumbuhan akumulator karena sifat toleransinya tinggi. Sifat toleran tanaman terhadap logam berat merupakan karakter dari suatu tumbuhan.

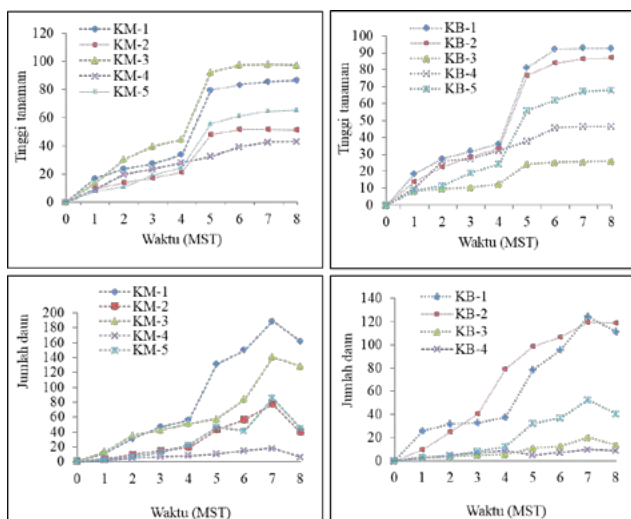
Tabel 7.4 Hasil identifikasi dan nilai Indeks nilai Penting (INP)

No.	Nama Lokal	Nama Latin	Famili	INP.	
				KB	KM
1	Lulangan	Eleusine indica, L.	Poaceae	53,1	42,2
2	Kremah	Alternanthera sessilis	Amaranthaceae	0	24,7
3	Tempuyung	Sonchus arvensis	Asteraceae	0	42,6
4	Grinting	Cynodon dactylon, L.	Poaceae	0	13,4
5	Wedusan	Ageratum conyzoides, L	Asteraceae	44,6	11,8
6	Cemplonan	Drymaria cordata	Caryophyllaceae	0	15
7	Bayam hutan	Amaranthus, spp.	Amarantaceae,	5	17
8	Rempi	Oxalis conicalata, L.	Oxalidaceae	10,2	4,7
9	Krokot	Portulaca oleracea	Portulacaceae	0	7,6
10	Tumbaran	Fimbristylis miliacea	Cyperaceae .	0	38,3
11	Lemon	Limonia acidissima, L.	Rutaceae	46	45
12	Lumut darat	Polytricum juniperinum	Polytrichaceae	0	33
13	Pedesan	-	Poaceae	0	1
14	Cabe rawit	Capsicum frutescens, L.	Solanaceae	0	79
15	Keleciran	-	Poaceae	0	1
16	Teki	Cyperus rotundus, L.	Cyperaceae.	18,1	32,8
17	Teropongan	-	Poaceae	0	2
18	Patikan	Euphorbia hirta, L	Euphorbiaceae	26,1	117
19	Deworan	Hedyotis corymbosa, L.	Rubiaceae	23	28,6
20	Tepung otot	Equisetum debile	Equisetaceae	0	2
21	Tapak liman	Elephantopus scaber	Asteraceae,	3	4
22	Rumput gajah	Pennisetum purpureum	Gramineae	0	10
23	Lamuran	Sapindus mukorossi	sapindaceae	0	11
24	Rumput raja	Pennisetum purpupoides	Poaceae	34	0

Di dunia terdapat kurang lebih 400 spesies tanaman yang memiliki potensi sebagai tanaman hyperakumulator. Beberapa jenis diantaranya adalah tanaman liar. Beberapa spesies lain dapat digunakan sebagai agen fitoremediasi. Jenis rumputan rumputan, semak dan pohon sangat baik digunakan untuk fitostabilisasi. Rumput-rumputan berupa tanaman liar dapat menghasilkan penutupan dengan cepat dan mengurangi dispersi debu. Semak dan pohon menghasilkan kanopi yang ekstensif menutup dan menghasilkan perakaran yang dalam untuk mencegah erosi dalam jangka panjang. Semak atau pohon dapat menyumbangkan hara dari seresah yang jatuh, ikut mengurangi cekaman air serta perbaikan fisik tanah (Tiedemann dan Klemmedson, 2004).

4. Pertumbuhan Tanaman Remediator

Hasil penelitian menunjukkan bahwa tanaman remediator yang teridentifikasi dan ditanam pada tanah yang tercemar logam berat mampu tumbuh dengan baik. Parameter yang digunakan untuk mengukur kemampuan tingkat pertumbuhan tanaman adalah tinggi tanaman dan jumlah daun serta jumlah anakan. Hal ini menunjukkan bahwa Lulungan (*Eleusine indica*, L), Wedusan (*Ageratum conyzoides*, L), Patikan (*Euphorbia hirta*, L), *Sonchus Arvensis* dan Lemon (*Limonia acidissima*, L), ditambah dengan *Vetiveria zizanioides* dan *Chromolaena odorata* yang ditanam sebagai agen fitoremediasi mampu tumbuh dengan baik, sebagaimana disajikan pada Gambar 7.1.



Gambar 7.1 Pertumbuhan tinggi tanaman dan jumlah daun yang ditanam pada tanah tercemar

Keterangan : KM-1= Lulungan, KM-2 = Tempuyung, KM-3 = Tumbaran, KM-4 = Akar wangi, KM-5 = Kirinyu, KB-1= Lulungan, KB-2 = Wedusan, KB-3 = Patian, KM-4 = Akar wangi, KB-5 = Kirinyu

Begitu juga pada parameter jumlah daun, pada wilayah kabupaten Malang terlihat pertambahan jumlah daun tertinggi terdapat pada tanaman lulan (KM-1), sedangkan lokasi dua wilayah kota Batu pertumbuhan jumlah daun terbesar terdapat pada tanaman wedusan (KB-2) dibanding tanaman lain. Tumbuhan yang memiliki kemampuan kemampuan tumbuh tinggi akan mampu menyerap logam berat. Tumbuhan yang digunakan sebagai agen fitoremediasi harus memiliki sifat toleransi. Sifat toleransi yang ditunjukkan biasanya memiliki kemampuan mengakumulasi logam berat. Logam berat yang diserap dalam tanah dalam jumlah yang tinggi selanjutnya ditranslokasikan ke akar, batang dan selanjutnya ke daun. Alberto dan Sigua (2013), secara umum keberhasilan teknologi hijau atau teknologi fitoremediasi tergantung pada beberapa faktor. Pertama, tanaman harus menghasilkan biomassa yang cukup serta menyerap logam berat tinggi. Kedua, tanaman yang ditanam harus responsive terhadap akumulasi logam berat pada jaringan tanaman. Dalam beberapa kasus, biomassa meningkat akan menurunkan konsentrasi total logam dalam jaringan tanaman, tetapi memungkinkan untuk jumlah yang lebih besar dari logam untuk diakumulasi secara keseluruhan. Pertumbuhan tanaman, yang memiliki kapasitas genetik baik akan mampu menumpuk logam. Jenis-jenis tertentu akan mampu mempertahankan kemampuan akumulasinya melalui penyerapan dan presipitasinya.

5. Penyerapan dan Reduksi Logam Berat Pada Tanaman Remediator

Hasil penelitian menunjukkan, penyerapan logam berat Cd dan Hg pada jaringan tanaman untuk kelima jenis tanaman yang dicobakan terlihat bervariasi. Hal ini terlihat dari nilai faktor konsentrasi (FT) dan faktor biokonsentrasi (BCF) yang diperoleh (Tabel 7.5). Nilai faktor translokasi (FT) pada Tabel 6.1, di wilayah batu terlihat 3 jenis tanaman yang memiliki nilai FT tanaman lebih besar dari 1. Ketiga jenis tanaman tersebut masing-masing Wedusan (*Ageratum conyzoides*) (1,16), Patikan (*Euphorbia hirta*) (1,27), dan kirinyu (*Chromolaena odorata*) (1,1). Dua jenis tanaman lain memiliki nilai FT lebih kecil dari 1, yaitu lulan (*Eleusine indica*) (0,58) dan akar wangi (*Vetiveria zizanioides*) (0,91). Hal yang sama terlihat pada wilayah kabupaten Malang, dari lima jenis yang dicobakan hanya ada dua yang memiliki nilai FT lebih besar dari 1. Kedua tanaman tersebut masing-masing tumburan (*Fimbristylis miliacea*) (1,90) dan kirinyu (*Chromolaena odorata*) (1,66).

Tabel 7.5 Biomassa akar, bagian atas tanaman, faktor transfer (FT) dan faktor biokonsentrasi (BCF) logam berat Cd pada masing-masing tanaman

Perlakuan	Akar	Bagian atas	Total	FT	BCF
KB-1 : Lulangan	0.59	0.34	0.93	0.58	0.41
KB-2 : Wedusan	0.50	0.58	1.08	1.16	0.48
KB-3 : Patian	0.48	0.61	1.09	1.27	0.48
KB-4 : Akar wangi	0.34	0.31	0.65	0.91	0.29
KB-5 : Kirinyu	0.84	0.92	1.76	1.10	0.78
KM-1 : Lulangan	0.42	0.28	0.70	0.67	0.50
KM-2 : Tempuyung	0.33	0.33	0.66	0.99	2.00
KM-3 : Tumberan	0.99	0.91	1.90	0.92	1.37
KM-4 : Akar wangi	0.43	0.43	0.32	0.75	0.74
KM-5 : Kirinyu	0.83	0.83	1.66	1.00	1.19

Tanaman yang memiliki nilai FT lebih dari 1 mengindikasikan bahwa tanaman tersebut menyerap logam berat kemudian ditransfer kebagian atas tanaman (daun dan batang). Secara keseluruhan tanaman yang dicobakan mempunyai nilai biokonsentrasi (BCF) lebih kecil dari 1. Di kabupaten Malang, kelima jenis tanaman yang ditanam 3 jenis diantaranya memiliki nilai BCF lebih dari 1. Tanaman yang memiliki nilai BCF lebih besar dari 1 menunjukkan bahwa tanaman tersebut dikategorikan sebagai akumulator logam berat.

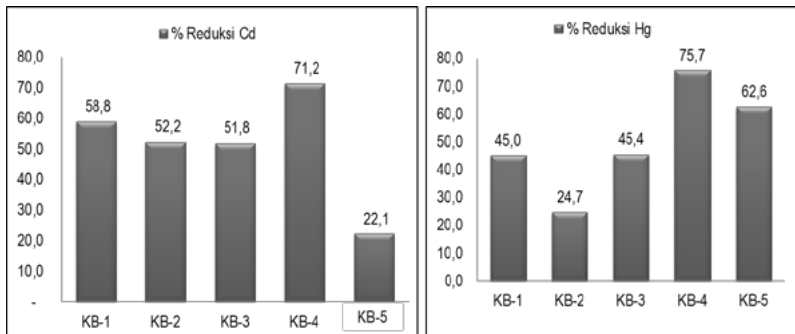
Faktor transfer dan biokonsentrasi untuk logam berat Cd diatas, relatif hampir sama dengan remediasi logam berat Hg. Kedua lokasi penelitian terlihat hanya tempuyung dan kirinyu yang memiliki nilai FT lebih besar dari 1, (Tabel 7.6). Faktor biokonsentrasi tanaman (BCF) lebih kecil dari 1, mengindikasikan bahwa tanaman tersebut bukan merupakan tanaman akumulator. Tanaman yang mempunyai nilai BCF lebih besar dari 1 digolongkan sebagai tanaman akumulator, sebaliknya jika lebih kecil dari 1 bukan tanaman akumulator (Mellem, 2012).

Tabel 7.6. Biomassa akar, bagian atas tanaman, faktor transfer (FT) dan faktoriokonsentrasi (BCF) logam berat Hg pada masing-masing tanaman

Perlakuan	AKAR	Bagian atas	Total	FT	BCF
KB : Lulangan	5.80	1.68	7.48	0.29	0.55
KB : Wedusan	2.20	1.16	3.36	0.53	0.25
KB : Patian	4.96	1.22	6.18	0.25	0.45
KB : Akar wangi	8.62	1.68	10.3	0.19	0.76
KB : Kirinyu	4.68	3.84	8.52	0.82	0.63
KM : Lulangan	2.42	1.28	3.70	0.53	0.41
KM : Tempuyung	1.33	1.66	2.99	1.25	0.33
KM : Tumberan	1.09	0.91	2.00	0.83	0.22
KM : Akar wangi	4.43	1.32	5.75	0.30	0.64
KM : Kirinyu	2.83	2.83	5.66	1.00	0.63

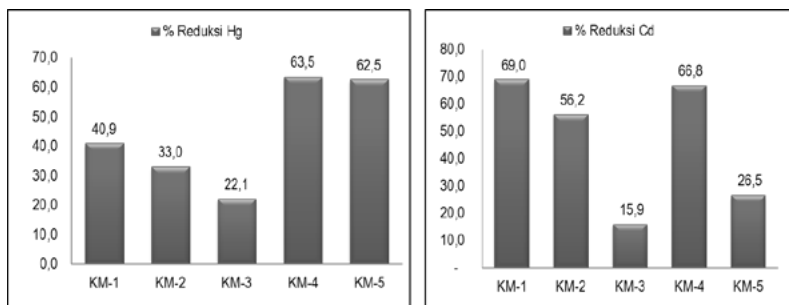
Hal ini berkaitan dengan sistem transportasi logam berat di dalam jaringan tanaman. Ross (1994), ada tiga tipe hubungan antara respon tanaman dengan bahan pencemar yaitu sebagai akumulator, indikator dan ekskluder. Lehman dan Franz (2004) menggolongkan tanaman akumulator jika faktor bioakumulator lebih dari 1, sedangkan kurang dari 1 dikategorikan sebagai tanaman ekskluder. Tanaman yang tergolong toleran terhadap logam berat apabila serapan logam berat pada jaringan akar lebih tinggi dari bagian atas tanaman. Tanaman yang memiliki faktor fitoekstraktor potensial yang tinggi jika jumlah polutan yang dipindahkan dari tanah ke bagian atas tanaman lebih besar. Disamping itu peningkatan biomassa tanaman dan fitoekstraksi potensial lebih dari 0,5% (Lehman dan Franz, 2004).

Selain faktor transfer (FT) dan faktor biokonsentrasi (BCF), juga terlihat kemampuan tanaman mereduksi logam berat. Hasil analisis logam berat pasca remediasi menunjukkan adanya penurunan logam berat (Cd dan Hg) yang signifikan. Penurunan logam berat Hg dan Cd pada kedua lokasi dapat dilihat pada Gambar 7.2. Hasil ini menunjukkan, serapa Hg pada kedua wilayah tertinggi terlihat pada tanaman akar wangi dan kirinyu (75,7 dan 63,5%), sedangkan terendah terdapat pada wedusan (24,7%) dan tumberan (22,1%).



Gambar 7.2 %Reduksi logam berat Hg dan Cd oleh tanaman remediator di KB
Keterangan : KB-1= Lulangan, KB-2 = Wedusan, KB-3 = Patian, KM-4 = Akar wangi, KB-5 = Kirinyu

Hal yang sama terlihat logam berat Cd, reduksi tertinggi terdapat pada tanaman akar wangi dan lulangan (71,2% dan 69,0%). Namun tidak berbeda jauh dengan akar wangi yang menyerap Cd (66,8%). Kelima jenis tanaman, reduksi Cd terendah terdapat pada tanaman *Chromolaena odorata* (22,1%) dan tumberan (15,9%) di (Gambar 7.3).



Gambar 7.3 % Reduksi logam berat Hg dan Cd oleh tanaman di KM
Keterangan : KM-1= Lulangan, KM-2 = Tempuyung, KM-3 = Tumberan, KM-4 = Akar wangi, KM-5 = Kirinyu

Hal ini menunjukkan bahwa setiap tanaman mempunyai karakter yang berbeda dalam menyerap logam berat, begi pula dengan kemampuan mereduksi. Faktor yang pengendali akumulasi logam berat baik Hg maupun Cd pada tanaman sangat tergantung pada konsentrasi dan jenis logam itu sendiri (Hindersah, 2004). Logam berat yang diserap selanjutnya didistribusikan, namun masing tanaman memiliki cara yang berbeda tergantung pada jenis dan bagian tanaman. Hamzah (2012), merkuri lebih banyak terkonsentrasi di akar, sedangkan logam lain seperti Pb lebih banyak terkonsentrasi dibagian akar dan daun. Perbandingan konsentrasi antara kedua logam berat tersebut cukup besar 88,9 mg kg⁻¹, sedngakn Pb sebesar 51,7 mg kg⁻¹.

Distribusi logam berat diberbagai jaringan tanaman dengan konsentrasi yang berbeda-beda disebabkan oleh kemampuan tanaman untuk mengeluarkan enzim dan eksudat yang mampu mendegradasi kontaminan dalam tanah. Secara fisik kemampuan tanaman untuk memindahkan polutan dengan cara mengabsorbsinya ke jaringan tanaman, selanjutnya ditransformasikan.

Terlihat bahwa masing-masing tanaman memiliki kemampuan masing-masing dalam mereduksi logam berat. Hal ini diduga mekanisme yang terjadi dalam proses fisiologi berjalan secara baik sehingga mampu mereduksi logam berat. Penyerapan dan akumulasi logam berat dilakukan secara berkesinambungan. Proses tersebut mulai dari akar, kemudian di translokasikan dan selanjutnya dilokalisasi. Salisbury dan Ross (1992), pengangkutan logam berat dari akar ke dalam akar dipengaruhi oleh komposisi eksudat akar tanaman, asam amino sistein, asam glutamate dan glisin yang dieksudasi oleh akar tanaman merupakan fitokelatin untuk unsur-unsur logam.

Di akhir pengamatan, terlihat terjadi penurunan konsentrasi Hg dan Cd. Penurunan tertinggi pada tanaman akar wangi antara 60 – 75%. Hal ini terjadi karena akumulasi logam berat baik Hg dan Cd oleh tanaman *Vetiveria zizanioides* karena memiliki system perakaran massif, serta adanya proses *rhizodegradasi*. *Rhizodegradasi* merupakan bagian dari proses pelepasan polutan ke zona akar. Logam berat diuraikan mikroba dalam tanah terutama diperankan oleh fungi dan eksudat akar (Gosh dan Singh, 2005). Penurunan konsentrasi logam berat di tanah dijadikan sebagai indikator terjadinya proses kompleksasi logam oleh eksudat akar. Pivetz (2001), penurunan logam berat terutama Hg di dalam tanah juga karena logam berat itu sendiri yang menguap ke atmosfer. Proses ini yang kemudian disebut fitovolatilisasi, yaitu polutan dari dalam tanah diserap oleh akar kemudian ditransformasi dan diupkan ke atmosfer melalui daun. Setiap tanaman memiliki perbedaan sensitivitas dalam menyerap logam berat. Presipitat polutan dalam tanah diimobilisasi oleh akar tanaman dengan cara diakumulasi, diadsorpsi pada permukaan akar dan diendapkan dalam zona akar. Proses inilah yang kemudian disebut fitostabilisasi. Dari akar ditranslokasikan ke bagian organ-organ lain seperti batang dan daun yang disebut proses fitoekstraksi.

Pada masing-masing organ, polutan yang diserap segera diuraikan melalui proses metabolisme tumbuhan secara enzimatik. Proses ini disebut fitodegradasi. Enzim yang berperan pada proses ini biasanya adalah *dehaloganases*, *oxygenases*, dan *reductases*. Dalam menyerap logam berat, tumbuhan membentuk enzim reduktase pada membran akar yang berfungsi untuk mereduksi logam berat. Selanjutnya dari akar, logam berat diangkut melalui jaringan pengangkut (xilem dan floem) ke bagian-bagian tumbuhan. Dalam meningkatkan efisiensi pengangkutan, logam berat diikat oleh molekul pengikat (khelat), selanjutnya, logam berat diakumulasikan di seluruh bagian tanaman terutama pada akar, batang, dan daun (Gosh dan Singh, 2005).

Bab 8

Studi Kasus 3



Fitoteknoremediasi dengan Tanaman *Indigenous* dan Biochar pada Sentra Hortikultura

A. Latar Belakang

Pencemaran logam berat pada lahan pertanian sering menimbulkan tekanan pada ekosistem terutama tanah dan kesehatan manusia. Secara spesifik pencemaran terjadi karena akumulasi logam berat sampai pada rantai makanan. Logam berat yang dihasilkan melalui kegiatan antropogenik terutama Cd, Pb, Hg serta beberapa logam berat lain dianggap paling berbahaya terutama untuk kesehatan jika terakumulasi di tanah. Para ahli lingkungan telah memberikan perhatian khusus untuk mengurangi bioavailabilitas logam beracun di lahan pertanian, dengan tujuan memastikan ketahanan dan kesehatan pangan aman dikonsumsi (Bian *et al.*, 2014). Temuan Pb, Cd dan beberapa logam lain pada produk pertanian semakin menimbulkan kekhawatiran, terutama beberapa negara Asia seperti Jepang, Cina, Korea dan Thailand, termasuk Indonesia. Sebagian besar produk yang terkontaminasi merupakan komoditas unggulan yang dikonsumsi. Di Cina bagian selatan misalnya, kadar Pb di dalam beras dilaporkan sudah melewati ambang batas yaitu di atas $0,2 \text{ mg kg}^{-1}$ (Bian *et al.*, 2014). Subowo *et al.*, (2004) juga melaporkan, Pb yang terdeteksi pada tanah sawah disekitar kawasan industri Tangerang Jawa Barat antara 206-449 mg kg^{-1} . Angka ini sebenarnya sudah berbahaya jika terkontaminasi sampai pada rantai makanan. Penyebab utamanya berasal dari pemakaian pupuk dan pestisida anorganik secara intensif. Penggunaan pupuk maupun pestisida yang melebihi batas akan berdampak pada kesehatan tanah dan manusia.

Khusus wilayah sentra hortikultura juga banyak dilaporkan sebagian tercemar. Sejak 2003, dilaporkan bahwa kandungan Pb dalam tanah di wilayah Brebes dan Tegal sudah lebih dari $> 2 \text{ mg kg}^{-1}$ (Adi (2003). Begitu juga pada sentra produksi bawang merah di Nganjuk Jawa Timur juga dilaporkan telah terindikasi tercemar, termasuk beberapa wilayah di Batu. Kandungan Cd yang terdeteksi berada pada kisaran $2,26 \text{ mg kg}^{-1}$ (Hamzah *et al.*, (2016). Selain tercemar, tingkat kesuburan tanah juga rendah. Rendahnya kesuburan tanah terutama C-organik (1,73 %), N (0,13 %), P (0,64), K (0,03), dan KTK (6,00) Cmol kg^{-1} sehingga diperlukan perbaikan pola tanam.

Teknologi remediasi yang merupakan teknologi paling murah adalah menggunakan jasa tanaman. Selain penggunaan tanaman, optimalisasi penggunaan biochar untuk pembenah tanah juga dianggap mampu memperbaiki tanah. Di dunia terdapat kurang lebih 400 jenis tanaman akumulator (Sheoran *et al.*, 2009). Beberapa dari jenis diantaranya ditemukan di Indonesia. Hasil penelitian yang pernah dilaporkan, diperoleh kurang lebih 24 famili yang dominan tumbuh pada lahan tercemar. Tumbuhan tersebut dapat dikembangkan sebagai tanaman remediator. Pada kasus lain, produktivitas tanah yang rendah dapat dilakukan dengan pemberian bahan organik. Agar bahan organik diberikan tidak berulang-ulang, dapat digunakan biochar yang memiliki sifat afinitasnya tinggi. Proses adsorpsi dan reaksi fisikokimia dari biochar mampu memperbaiki tanah. Sifatn alkalinitas yang tinggi dari biochar mampu meningkatkan pH tanah dan stabilisasi logam berat. Sukartono dan Utomo, (2012) telah membuktikannya, begitu pula Fellet *et al.*, (2014) yang menggunakan biochar untuk perbaikan produktivitas tanah dan mengendalikan logam berat.

B. Permasalahan

Kontaminasi logam berat di bidang pertanian merupakan masalah besar saat ini. Permasalahan ini akan memberi dampak pada lingkungan, dan selanjutnya pada kesehatan karena biomagnifikasi. Biomagnifikasi terjadi karena meningkatnya konsentrasi logam sebagai unsur, yang dimulai dari konsentrasi yang paling rendah ke konsentrasi paling tinggi (Roy dan McDonald, 2013). Logam berat di tanah tidak mudah untuk mengalami biodegradasi sehingga pembersihannya menjadi agak sulit bahkan sangat mahal terutama dengan cara konvensional. Selain tercemar, sebagian besar kesuburannya juga rendah, sehingga mengatasinya juga secara kolaboratif. Penggunaan tanaman indigenous yang dikombinasi dengan penggunaan biochar memperbaiki fisikokimianya sebenarnya sudah banyak diteliti.

Teknologi fitoremediasi dengan memanfaatkan tumbuhan liar teradaptasi di wilayah sekitar merupakan solusi. Hal ini sudah dibuktikan oleh Hamzah *et al.*, (2016) yang menggunakan jenis tumbuhan lokal membersihkan logam berat. Tanaman yang digunakan mampu memproduksi biomassa tinggi serta toleran. Selain itu mempunyai akumulasi logam berat juga tinggi. Beberapa peneliti melaporkan, ada sekitar 400 spesies tumbuhan yang dapat digunakan sebagai agen fitoremediasi untuk menyerap logam berat. Tumbuhan tersebut diantaranya *Vetiveria zizanioides*, *Alyssum bertolonii*, *Brassica juncea* (Sheoran *et al.*, 2009), *Chromolaena odorata* (Hamzah *et al.*, 2012). Tanaman-tanaman tersebut dapat Hg, Pb, dan Cd. Namun beberapa diantaranya tidak dapat tumbuh dengan baik karena kondisi tanahnya tercemar serta kesuburannya rendah. Kesuburan tanah rendah akan mempengaruhi daya serap logam berat. Salah satu cara yang dapat dilakukan untuk mengatasinya dengan penggunaan biochar. Biochar sebagai bahan amandemen telah banyak digunakan untuk memperbaiki kesuburan tanah karena mempunyai senyawa karbon yang relatif stabil.

Dalam jangka panjang, biochar mampu memperbaiki sifat fisikokimia dan biologi tanah. Biochar diproduksi dari limbah pertanian dari proses pyrolysis atau dengan oksigen terbatas untuk perbaikan tanah. Biochar juga mampu mengimobilisasi logam berat sehingga tidak tersedia (Bian, *et al.*, 2014). Hamzah *et al.*, (2012), menggunakan biochar dan FeSO_4 untuk memperbaiki tailing dan di tanami tanaman *Chromolaena odorata*. Hasilnya cukup signifikan karena tanaman *Chromolaena odorata* yang ditanam mampu menyerap Hg dan Pb masing-masing 8 mg kg^{-1} dan 61 mg kg^{-1} . Potensi ini perlu dikembangkan dengan teknologi remediasi yang mampu menyerap logam berat sekaligus meningkatkan produktivitas tanah. Namun perlu diteliti lebih jauh mengenai formulasi teknologi remediasi yang menggabungkan antara tanaman indigenous dengan biochar. Formulasi ini diharapkan menjadi teknologi alternatif, sehingga produk pertanian yang dihasilkan aman untuk dikonsumsi.

C. Pencemaran Tanah oleh Logam Berat

Pencemaran pada tanah pertanian berasal dari dua sumber utama yaitu penggunaan pestisida dan pupuk dalam jangka lama. Penggunaan bahan agrokimia mampu meningkatkan produksi tanaman, namun penggunaan dalam jangka waktu lama akan berdampak pada produktivitas tanah dan kesehatan tanaman.

Diakui beberapa dekade terakhir, penggunaan bahan agrokimia meningkat tajam. Penggunaan fosfor misalnya, telah terjadi peningkatan dari $1,25 \text{ Mg ha}^{-1}$ di 1975, meningkat menjadi $3,23 \text{ Mg ha}^{-1}$ pada tahun 2000. Sementara penggunaan pestisida meningkat $82 - 175 \text{ Kg ha}^{-1}$, pada periode yang sama (Zhao *et al.*, 2015a). Aplikasi bahan agrokimia yang berlebihan akan berkontribusi terhadap akumulasi logam berat di tanah pertanian karena beberapa pupuk dan pestisida tersebut mengandung logam berat seperti Cd, Pb, Zn. Tanah yang terkontaminasi logam berat dapat mempengaruhi pertumbuhan, produktivitas, serta menyebabkan kematian pada tumbuhan.

Logam berat Cd dan Pb misalnya, ditemukan telah mencemari tanah pertanian dan produksi pangan. Sumbernya berasal dari bahan induk tanah itu sendiri, penggunaan fosfat alam, pestisida dan bahan bakar. Adi, (2003) melaporkan telah terjadi pencemaran Cd seluas 4 % dari total luas sawah 106 ribu ha di daerah Karawang dan Bekasi, sedangkan Pb sekitar 7 %. Kadar Pb dalam tanah berkisar antara $7,83 - 91,47 \text{ mg kg}^{-1}$. Sedangkan Cd antara $0 - 8,75 \text{ mg kg}^{-1}$. Ambang batas Pb dalam tanah adalah $1,0 \text{ mg kg}^{-1}$, sedangkan Cd ditetapkan sebesar $0,24 \text{ mg kg}^{-1}$. Di sentra produksi bawang di wilayah Tegal dan Bekasi, kadar Pb yang ditemukan antara $2,46 - 3,67 \text{ mg kg}^{-1}$. Ambang batas yang dipersyaratkan adalah $2,0 \text{ mg kg}^{-1}$. Kadar Cd yang ditemukan pada bawang antara $0,135 - 0,285 \text{ mg kg}^{-1}$, sedangkan ambang batasnya adalah $0,1 \text{ mg kg}^{-1}$ sehingga perlu diwaspadai.

Penelitian yang dilaksanakan oleh Hamzah *et al.*, (2016 ; 2017), telah terjadi pencemaran Cd pada sentra hortikultura juga melewati ambang batas yaitu sebesar 2,26 mg kg⁻¹. Sejak 2012, Dinas pertanian kota Batu merilis sekitar 20 - 30 % lahan pertanian yang digunakan saat ini telah terdegradasi akibat penggunaan pupuk maupun pestisida. Potensi kerusakan ini akibat akumulasi logam berat yang dari pupuk dan pestisida. Kandungan logam berat akan meningkat seiring dengan intensitas penggunaan pupuk kimia. Beberapa logam berat yang merupakan sumber polutan diantaranya merkuri (Hg), timbal (Pb), Cadmium (Cd), Zeng (Zn) yang semuanya berasal dari bahan kimia.

Keberadaan logam berat seperti hidrokarbon, senyawa dan pelarut tertentu, serta pestisida sudah seharusnya dikurangi. Keberadaannya berlebihan akan mempengaruhi kualitas tanah dan kesehatan masyarakat. Daya toksik yang ada pada polutan akan bekerja sebagai penghalang kerja enzim, sehingga proses metabolisme tubuh terputus. Selanjutnya akan bertindak karsinogen bagi manusia, yang masuknya melalui kulit, pernapasan maupun pencernaan. Chirakkara *et al.*, (2016), saat ini telah berkembang beberapa metode remediasi antara lain ; pencucian tanah, stabilisasi dan solidifikasi, bioremediasi, fitoremediasi, dan beberapa metode lain. Namun penerapannya tergantung pada jenis kontaminan dan kondisi spesifik lokasi, seperti jenis tanah dan kedalaman tanah, serta biaya

D. Fitoremediasi Tanah Tercemar

Fitoremediasi merupakan serangkaian teknik penggabungan antara mikrobiologi, kimia dan fisiologi tanaman. Metode ini dianggap metode pembersihan polutan paling murah jika dibandingkan metode lain (Ferreiro *et al.*, 2013). Teknologi remedisi dengan tanaman telah diterapkan hampir disemua jenis polutan (logam, radionuklida, dan zat-zat organik) maupun pada tanah dan air. Fitoremediasi dapat bekerja pada senyawa organik dan anorganik, dapat dilakukan baik secara insitu maupun eksitu, dengan biaya yang relatif murah. Teknologi ini dianggap ramah lingkungan dan bersifat estetik. Selain itu mampu mereduksi polutan dalam jumlah besar. Keuntungan lain adalah kemampuan penyerapannya pada daerah rizosfer untuk mencegah pelepasan polutan (Aremu *et al*, 2013). Mekanisme pengambilan polutan sama dengan proses pemanfaatan hara. Bahan organik selanjutnya dimetabolisme, dirubah menjadi bahan berbahaya menjadi tidak berbahaya.

Beberapa mekanisme yang terjadi dalam fitoremediasi diantaranya :

- 1) Fitodegradasi : proses pembongkaran polutan oleh tanaman melalui enzim kemudian di serap dan dimetabolisme dalam tanaman,
- 2) Fitoekstraksi : penyerapan polutan oleh akar kemudian ditranslokasikan ke bagian tanaman,
- 3) Rizodegradasi : proses pembongkaran polutan organik dalam tanah melalui aktifitas mikroorganisme yang meningkat dalam zone perakaran,

- 4) Fitostabilisasi : penyerapan polutan dan diendapkan (imobilisasi) pada zone perakaran untuk mencegah penyebaran polutan melalui erosi, pencucian, dan dispersi tanah,
- 5) Rizofiltrasi : proses pemindahan polutan ke biomasa tanaman kemudian diendapkan dalam akar tanaman, atau di sekitar rizosfer, dan
- 6) Fitovolatilisasi : proses penyerapan polutan dalam bentuk larutan kemudian di lepaskan ke atmosfer.

E. Penggunaan Biochar dan Tanaman untuk Detoksifikasi Logam Berat

Biochar adalah karbon aktif berpori sebagai hasil proses pemakaran terbatas (pyrolysis) bahan organik. Meskipun penggunaan arang (kayu biochar) sudah umum sejak zaman lalu, tetapi ide menggunakan bahan baku lainnya untuk biochar masih baru. Biochar memiliki kapasitas KTK dan pH basa sehingga baik perbaikan tanah. Pemanfaatannya cukup potensial terutama pada sifat-sifat tanah untuk perbaikan aktivitas biologis tanah (Lehmann *et al.*, 2011), mengurangi emisi gas rumah kaca meningkatkan karbon tanah dan memperbaiki kualitas tanah untuk meningkatkan produksi pertanian (GASCO *et al.*, 2012 ; Paz-Ferreiro dan Fu, 2013) .Rondon *et al.* (2007) menggunakan limbah kayu eucalyptus untuk bahan baku biochar. Karakteristik biochar yang diperoleh adalah : total C ($823,7 \text{ g kg}^{-1}$), total N ($5,73 \text{ g kg}^{-1}$), pH (7,0), abu (0,3 %), O₂ (13,7 %), P-Bray (49,5 5), P-total (580 mg kg^{-1}), total S (280 mg kg^{-1}), total Mg ($1,31 \text{ g kg}^{-1}$), KTK ($46,9 \text{ mmol kg}^{-1}$). Karakteristik biochar yang diproduksi dari kotoran ayam adalah : pH (9,93), C (12,33 %), total N (2,6 %), total P ($18,7 \text{ g kg}^{-1}$), total K ($3,40 \text{ g kg}^{-1}$), total Ca ($1,20 \text{ g kg}^{-1}$) dan total Mg ($3,0 \text{ g kg}^{-1}$). Biochar memiliki kemampuan secara fisik dan kimia untuk menghilangkan keaktifan logam berat sehingga potensial digunakan pada lahan tercemar. Selain itu biochar juga mampu mensuplay sejumlah hara bagi tanaman (Hidayat, 2015).

Selain digunakan untuk memperbaiki produktivitas tanah, biochar juga digunakan untuk meremediasi tanah-tanah yang tercemar. Fellet *et al.* (2011) menggunakan biochar untuk memulihkan tanah tambang yang terkontaminasi. Pencemaran limbah tambang dapat dikurangi dengan menggunakan biochar kotoran ayam. Biochar kotoran ayam yang digunakan sangat efektif untuk mengurangi konsentrasi Cd dan Pb. Penambahan biochar konsentrasi Pb berkurang (Sizmur *et al.*, 2011). Jiang *et al.*, (2012) mengemukakan bahwa penggunaan biochar mampu menurunkan Pb antara 18,8-77,0%, sedangkan Cu antara 19.7- 100,0% tetapi tergantung pada konsentrasinya masing-masing. Biochar memiliki potensi untuk meremediasi logam berat (de Abreu *et al.*, 2012).

Dengan demikian, biochar memiliki potensi untuk dikombinasikan dengan tanaman remediator (). Biochar selain menstabilkan tanah yang terkontaminasi logam berat, perlu dikombinasikan dengan tanaman remediator.

Selama ini penelitian yang dilakukan lebih banyak bersifat parsial antara tanaman remediator dengan logam berat, dan biochar dengan logam berat. Keduanya memiliki potensi yang sama sehingga perlu dikembangkan teknologi remediasi yang menggabungkan keduanya. Penggabungan kedua potensi ini akan memberikan dampak lain karena sama-sama memiliki kemampuan yang sama untuk meremediasi logam berat. Liu *et al.*, (2013), perbaikan hasil tanaman setelah penambahan biochar sering dikaitkan dengan peningkatan air dan retensi nutrisi, meningkatkan sifat biologis dan KTK tanah, memberi efek pada nutrisi terhadap perbaikan pH tanah. Banyak dari efek-efek ini saling berkaitan dan potensial serta bisa bertindak secara sinergis.

F. Metode

Penelitian ini dilaksanakan di lahan petani desa Sumber Brantas Kecamatan Bumiaji Kota Batu. Dipilihnya wilayah ini didasarkan atas penelitian tahun sebelumnya. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sebagian besar wilayah tersebut telah tercemar kadmium dan merkuri (Cd dan Hg). Wilayah Sumber Brantas merupakan salah satu sentra produksi hortikultura terbesar di kota Batu, Jawa Timur. Sedangkan analisis tanah dan tanaman akan dilakukan laboratorium

G. Pelaksanaan Penelitian

Penelitian ini bertujuan untuk melihat efek penggunaan jenis dan dosis biochar terhadap pertumbuhan tanaman indigenous serta serapan logam berat. Percobaan dilakukan pada petak percobaan dengan menggunakan dua jenis tanaman remediator yang memiliki kemampuan menyerap logam berat tinggi. Perlakuannya sebagai berikut :

Faktor pertama adalah jenis dan dosis biochar (B), yaitu :

- B1 = Biochar jerami padi,
- B2 = Biochar limbah tembakau,
- B3 = Biochar sekam padi + biochar limbah tembakau.

Faktor kedua adalah jenis tanaman remediator (T), yaitu :

- T1 = tanaman remediator 1 (*Eleusine indica*),
- T2 = tanaman remediator 2 (*Sonchus arvensis*).

Percobaan ini menggunakan rancangan acak kelompok 3 ulangan sehingga akan terdapat 12 petak percobaan, dengan ukuran masing-masing petak 3 x 4 meter.

Parameter yang diamati meliputi trend pertumbuhan dan performen masing-masing tanaman meliputi : tinggi tanaman (setiap minggu), biomassa (berat akar, batang dan daun, berat brangkasian, dan panjang akar) dilakukan saat panen. Saat panen akar, batang dan daun dipisahkan kemudian dicuci dengan akuades untuk menghilangkan kotoran kemudian di oven pada suhu 60°C selama 72 jam, selanjutnya dilakukan analisis logam berat pada jaringan tanaman (akar, batang, dan daun).

Analisis sifat fisik tanah meliputi tekstur (pipet), kemantapan agregat (ayakan kering/basah), Bobot isi (Clod) serta kadar air (%), sedangkan analisis kimia tanah meliputi pH (H_2O), C-organik (Walkey-Black), N (Kjedahl), P total (olsen), K total, KTK (Amonium Acetat pH 7,0). Logam berat yang dianalisa terdiri dari Timbal (Pb), Kadmium (Cd) dan Krom (Cr) dengan menggunakan AAS. Data hasil pengamatan, selanjutnya dianalisis statistik untuk melihat pengaruh perbedaan masing-masing perlakuan.

H. Hasil Penelitian

1. Dampak Pemberian Biochar Terhadap Perbaikan Tanah

Pemberian biochar ke dalam tanah memberikan pengaruh terhadap perbaikan sifat-sifat tanah. Hal ini terjadi karena biochar yang berpori sehingga memungkinkan menjadi tempat berkembangnya organisme tanah. Berkembangnya organisme tanah pada ruang-ruang pori biochar dapat memicu bertambahnya populasi organisme tanah sehingga ketersediaan hara dipertahankan dalam jangka waktu yang lama. Meningkatnya jumlah organisme tanah terutama organisme diharapkan mampu menunjang pertumbuhan tanaman di atasnya. Hasil penelitian pasca remediasi dengan menggunakan biochar dan tanaman indigenous memperlihatkan perbedaan dalam perbaikan tanah. Hasil analisis tanah pasca remediasi tahun kedua menunjukkan perbaikan beberapa kandungan hara, jika dibandingkan dengan periode tanam tahun pertama (Tabel 8.1).

Tabel 8.1 Hasil analisis tanah pasca remediasi

Jenis Biochar	Kandungan unsur					
	pH	N- total (%)	P_2O_5 (ppm)	K (mg/100g)	C-org (%)	KTK (me/100g)
Tahun Pertama						
Sekam padi	7,4	0,14	0,93	1,92	31,92	32,34
Limbah tembakau	6,0	0,18	0,23	2,12	40,24	29,02
Tahun Kedua						
Sekam padi	7,44	1,10	1,19	1,61	34,57	39,64
Limbah tembakau	6,26	1,59	0,68	1,06	48,15	51,89

Tabel 8.1 menunjukkan bahwa pemberian jenis biochar sekam padi dan limbah tembakau untuk meremediasi tanah menunjukkan adanya perbedaan. Kandungan N dan P terlihat menunjukkan perbedaan peningkatan dari tahun pertama ke tahun kedua.

Kandungan N pada tahun pertama sebesar 0,14 dan 0,18 %, namun setelah tahun kedua meningkat menjadi 1,10 dan 1,59 %. Hal yang sama terlihat pada P_2O_5 , dimana pada tahun pertama sebesar 0,93 dan 0,23 ppm setelah tahun kedua menjadi 1,19 dan 0,68 ppm. C-organik dan KTK juga terlihat meningkat dari tahun pertama ke tahun kedua sebesar 0,2 dan 0,8 unit. Namun terjadi sebaliknya pada K yang mengalami penurunan. Sementara yang stabil adalah pH tanah masih berada pada kisaran 6-7.

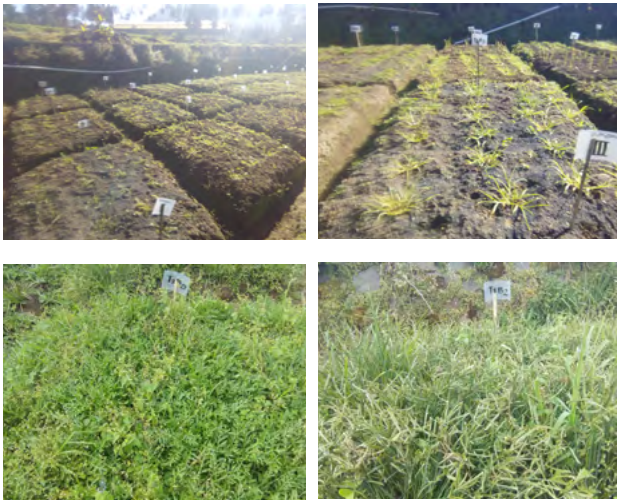
Perbaikan kandungan nilai N, P C-organik dan KTK di duga seiringa dengan berjalannya waktu terjadi proses dekomposisi sehingga terjadi peningkatan. Proses ini diduga adanya bantuan dari mikroba yang bersarang pada pori biochar. KTK tinggi akan meningkatkan produktivitas tanah. Tingginya KTK di dalam tanah akibat pemberian biochar akan meminimalisir pencucian kation seperti K^+ dan NH_4^+ (Sukartono dan Utomo, 2012). Manfaat biochar terletak dua karakter yaitu memiliki daya serap hara yang tinggi serta persisten sebagai bahan ameliorant tanah. Tang *et al.* 2013, Biochar telah terbukti efektif dalam meningkatkan sifat-sifat tanah dan meningkatkan biomassa tanaman, serta meningkatkan daya tahan terhadap penyakit.

Biochar yang digunakan sebagai pembersih tanah tercemar logam berat dan polutan organik. Mekanismenya adalah interaksi elektrostatis dan pengendapan dalam logam berat, adsorpsi permukaan, partisi dan sekuestrasi dalam kontaminan organik. Namun, penerapan biochar di tanah tercemar terbukti penurunan cemaran pestisida. Hal ini terlihat dari efek positif dari biochar untuk remediasi pestisida dan efek negatifnya terhadap efikasi pestisida. Ahmad *et al.*, 2014, Penggunaan biochar selain memperbaiki kesuburan tanah dan meremediasi polutan, juga berpotensi untuk penyerapan karbon. Parameter kuncinya terletak pada suhu pirolisis, waktu tinggal, kecepatan transfer panas, dan jenis bahan baku. Efektivitas biochar dalam manajemen kontaminan tergantung pada luas permukaannya, distribusi ukuran pori dan kapasitas pertukaran ion.

2. Pertumbuhan tanaman Remediator

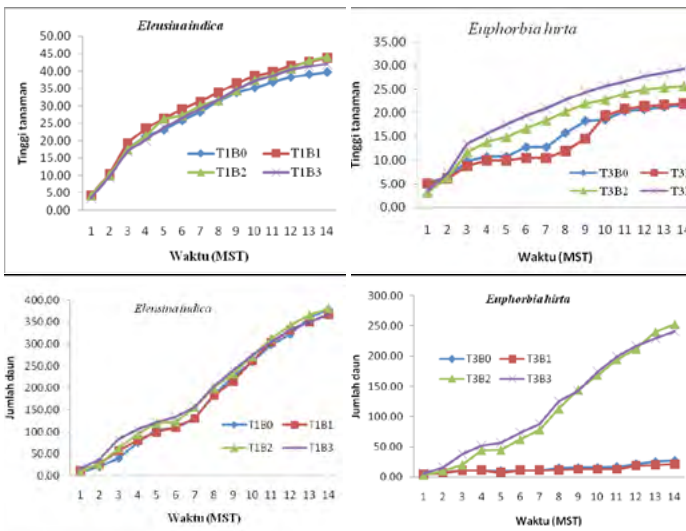
Penanaman tanaman remediator dilakukan pada lahan bekas penelitian tahun pertama yang menggunakan lahan petani. Tanaman remediator yang digunakan adalah *Eleusine indica* dan *Euphorbia hirta*. Kedua tanaman ini merupakan hasil skrining penelitian tahun pertama, dimana kedua tanaman ini memiliki daya adaptasi yang tinggi sehingga dijadikan sebagai kandidat tanaman remediator untuk logam berat Cd. Kedua tanaman tersebut selanjutnya ditanam pada perlakuan dengan menggunakan jenis biochar sekam padi dan limbah tembakau.

Hasil pengamatan menunjukkan bahwa kedua tanaman mampu tumbuh baik dan mampu beradaptasi dengan lingkungan sekitar (Gambar 8.1). Kemampuan adaptasi ini digunakan sebagai salah satu indikator kandidat tanaman remediator.



Gambar 8.1 Performa kedua jenis tanaman remediator yang ditanam pada lahan tercemar

Selanjutnya dilakukan pengukuran untuk mengetahui kemampuan masing-masing tanaman yang ditanam dengan perlakuan biochar. Kedua tanaman menunjukkan performa yang berbeda karena perbedaan morfologi. Hasil pengukuran menunjukkan bahwa perlakuan kedua jenis tanaman remediator yang ditanam memiliki karakteristik dan pola pertumbuhan yang berbeda (Gambar 8.2).



Gambar 8.2 Tinggi dan Jumlah daun tanaman remediator yang ditanam pada lahan tercemar

Gambar 8.2 menunjukkan bahwa pemberian jenis biochar pada tanah tercemar yang ditanami dua jenis tanaman remediator menunjukkan pola pertumbuhan yang berbeda. Hal ini terlihat dari jumlah daun tanaman lulan (*Eleusine indica*) memperlihatkan pola pertumbuhan yang linier, namun terlihat berbeda pada tanaman *Euphorbia hirta*. Pola pertumbuhan tanaman lulan pada parameter jumlah daun dan jumlah anakan pada perlakuan jenis biochar menunjukkan pertumbuhan yang relative sama. Hal ini diduga berkaitan dengan kemampuan adaptasi tanaman lulan yang relatif kuat. Sebaliknya terlihat berbeda pada pertumbuhan tanaman *Euphorbia hirta*. Pertumbuhan tanaman *Euphorbia hirta* pada berbagai jenis biochar memperlihatkan bahwa pemberian biochar limbah tembakau (B2) serta campuran limbah tembakau dengan biocar sekam padi (B3) menunjukkan jumlah anakan dan jumlah daun lebih tinggi dibandingkan dengan tanpa biocar (B0) dan biochar sekam padi (B1).

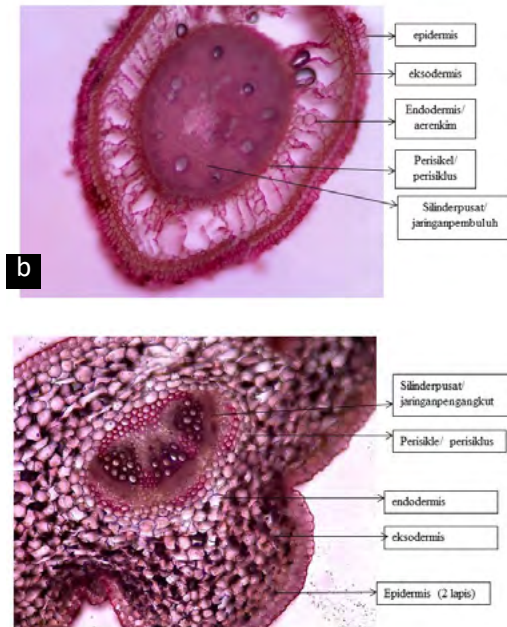
Respon kedua tanaman yang berbeda pada berbagai jenis biochar diduga karena karakteristik dan daya adaptasi masing-masing tanaman yang berbeda, termasuk fisiologinya. Tanaman lulan dikenal sebagai tumbuhan liar yang memiliki daya adaptasi yang tinggi karena memiliki system perakaran yang masif. Tanaman ini dapat tumbuh dengan baik pada tanah yang lembab atau tidak terlalu kering dan terbuka. Dapat tumbuh dengan baik pada ketinggian 0-1600 m dpl. Perakarannya tidak terlalu dalam namun lebat dan kokoh merekat kuat pada tanah sehingga sulit untuk mencabutnya.

3. Penyerapan Logam Berat dan Translokasi Dalam Tanaman

Sampai saat ini logam berat Cd masih dikategorikan sebagai unsur non essensial untuk tanaman. Keberadaannya dalam jaringan tanaman akan mengganggu fisiologi tanaman karena unsur ini mudah diserap oleh akar tanaman dan ditranslokasikan ke berbagai jaringan tanaman. Jaringan yang mudah ditranslokasikan adalah akar, batang dan daun bahkan buah. Pada bagian akar khususnya, terdiri atas xilem, floem, endodermis, korteks dan epidermis. Hal ini juga terdapat pada tanaman *Eleusine indica* dan *Euphorbia hirta* yang digunakan dalam penelitian ini (Gambar 8.3).

Gambar diatas menunjukkan bahwa kedua tanaman memiliki struktur perakaran tanaman yang terdiri atas jaringan pembuluh yang meliputi floem dan xilem, endodermis dan epidermis. Endodermis merupakan lapisan tunggal dari sel-sel yang membentuk selubung yang nyata pada akar dan merupakan lapisan terdala, dari korteks. Ciri utama dari endodermis yang sangat muda pada akar yaitu terdapat pita kasparian (*Casparian stip*) yang mengelilingi dinding sel.

Secara fisiologi endodermis mampu mengendalikan transfer air dan larutan di antara korteks dan stele karena air dan larutan tersebut harus melalui protoplas sel-sel endodermis. Hal ini juga dapat terjadi pada penyerapan logam berat Cd yang ditransfer ke bagian tanaman.



Gambar 8.3 Irisan melintang tanaman (a) *Eleusine indica* (b) *Euphorbia hirta*

Logam berat Cd yang diserap tanaman dalam jumlah yang bervariasi tergantung kondisi lingkungan tanah dan jenis tanaman. Perbedaan dalam penyerapan logam berat pada tanaman berkaitan erat dengan sifat morfologi dan kemampuan toleran dari tanaman itu sendiri. Sejumlah tumbuhan dari beberapa famili terbukti memiliki sifat yang toleran yang tinggi. Beberapa yang termasuk hipertoleran karena mampu mengakumulasi logam berat dengan konsentrasi tinggi pada jaringan akar dan tajuknya, sehingga bersifat hiperakumulator. Namuni demikian tergantung pada sistem perakaran itu sendiri yang bersifat massif. Chaney *et al*, (2008), melaporkan bahwa tanaman yang memiliki system perakaran yang masih seperti akar wangi memiliki kemampuan untuk fitoekstraksi. Dalam proses fitoekstraksi ini logam berat diserap oleh akar tanaman dan ditranslokasikan ke tajuk untuk diolah kembali atau dibuang pada saat tanaman dipanen. *Eleusine indica* L termasuk salah satu tanaman yang mempunyai sistem perakaran massif sehingga perlu ditelusuri lebih lanjut.

Penyerapan logam berat di akar selanjutnya ditranslokasikan ke bagian atas tanaman seperti pucuk, dan daun melalui sequester dan detoksifikasi logam. Tian *et al.*, (2009), karakter fisiologi dan molekuler merupakan penentu akumulasi logam berat yang akan ditransfer kebagian-bagian tanaman. Tanaman yang mampu mendekontaminasi tanah yang tercemar memiliki beberapa karakter yaitu (Alberto dan Sigua, 2013):

- (1) serapan tanaman logam berat dari tanah ke bagian-bagian akar,
- (2) mengikat polutan ke dalam jaringan tanaman secara fisik maupun kimia, dan
- (3) mengangkut polutan dalam hal ini logam berat dari akar ke bagian atas tanaman serta mencegah atau menghambat kontaminan dari pencucian keluar dari tanah.

Akar tanaman mengakumulasi logam berat bersamaan dengan hara lain yang diserap. Pengangkutannya melalui jaringan xylem dan phloem selanjutnya ditranslokasikan ke bagian yang dapat dipanen (Suresh and Ravishankar, 2004). Adsorpsi pencemar logam berat seperti Pb oleh tanaman permukaan akar lebih besar dengan afinitas reseptor kimia yang tinggi. Pencemar logam berat bersamaan dengan hara lain berikatan erat dengan permukaan akar. Urutan pengambilan logam berat termasuk Pb dan Cd ke dalam symplasma akar dan pergerakan ke xylem mencakup 3 tahapan yaitu

- (1) penahanan logam berat dalam sel akar,
- (2) pengangkutan symplastik ke stele dan
- (3) dilepas ke xylem yang dimediasi oleh membran pengangkutan protein.

Dalam pengangkutan dan translokasi logam berat, *phytochelatin* dan *metallothionein* memainkan peran penting. *Phytochelatin* merupakan kelompok protein yang memiliki asam amino cystein, glycine, dan asam glutamate yang menginduksi tanaman jika tanaman mengalami cekaman logam berat. Senyawa ini mengikat ion logam dan membawanya ke vakuola dimana logam berat tidak lebih lama menjadi toksik (Suresh and Ravishankar, 2004). *Metallothionein* belum begitu jelas, ada dua hipotesis yang diajukan. Hipotesis pertama menyatakan bahwa *metallothionein* menciptakan pool penyimpanan ion untuk kelebihan ion-ion logam berat bebas yang dikhelasi sampai tanaman menggunakannya. Hipotesis kedua menyatakan bahwa *metallothionein* adalah protein transport yang bertanggung jawab pada pemindahan kelebihan logam berat dari satu tempat dimana *metallothionein* membangun sampai ke tingkat toksik pada tempat dari tanaman dimana logam berat dibutuhkan (Shuresh and Ravishankar, 2004).

Dalam mekanisme penyerapan logam berat termasuk Cd dan Pb dimulai dari permukaan akar ke dalam akar yang dipengaruhi oleh komposisi eksudat akar. Asam amino sestein, asam glutamat dan glisin yang dieksudasi oleh akar merupakan fitokelatin untuk unsur logam. Tanaman yang sedang tumbuh akan membebaskan karbon ke rhizosfer melalui dua mekanisme yaitu (1) CO₂ hasil respirasi dari akar, dan (2) eksudasi akar berupa musilase, tudung akar dan sisa akar yang mati. Eksudat akar terdiri atas senyawa organik berbobot rendah seperti asam organik, asam amino dan gula. Sedangkan asam organik berbobot molekuler tinggi di antaranya polisakarida, asam-asam poligalakturonat, dan senyawa hasil pelapukan sel akar yang mati. Jumlah dan komposisi senyawa organik yang terkandung dalam eksudat akar sangat beragam, tergantung tergantung pada jenis dan umur tanaman (Bolton dan Frederickson, 1993). Dalam penelitian ini seperti terlihat pada Gambar diatas menunjukkan bahwa irisan melintang akar yang tercemar logam berat menunjukkan butiran kecil berwarna coklat kemerahan yang tersebar di epidermis dan korteks.

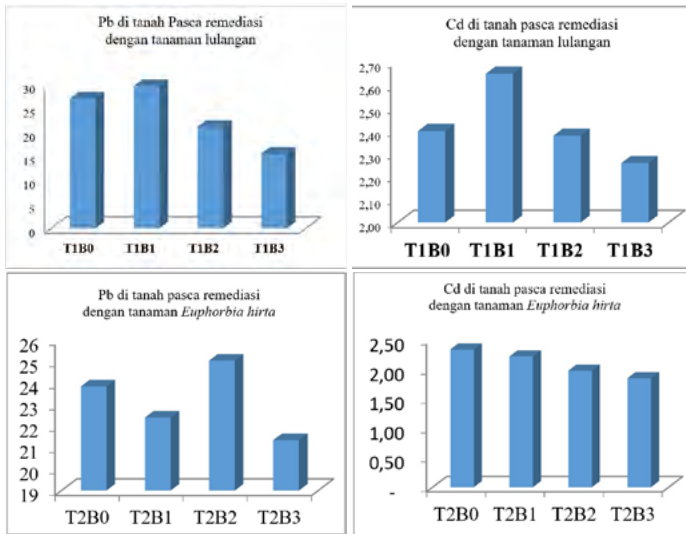
Tingginya konsentrasi logam berat Cd dan Pb di dalam tanah menyebabkan endapan logam berat tersebut menyebabkan endapan logam berat tersebut meluas ampai ke endodermis (Gambar 5.1). Beberapa peneliti terdahulu telah mengungkapkan hal tersebut, bahwa logam berat seperti Pb, diserap oleh akar yang diendapkan di dinding sel, lamela tengah dan membran plasma dalam bentuk endapan Pb tidak berbentuk, berbentuk butiran kecil dan kristal (Jiang dan Liu, 2010). Selain diendapkan, sebagian logam berat ditemukan juga dalam sitoplasma, vakuola, mitokondria dan retikulum endoplasmik. Senyawa polisakarida ekstraseluler dapat mengikat berbagai jenis logam berat seperti, Cd, Pb, Cr, Cu dan Zn.

4. Penyerapan dan Reduksi Logam Berat oleh Tanaman Remediator

Fitoremediasi oleh tanaman *Eleusine indica* (a) dan *Euphorbia hirta* untuk logam berat yang tercemar di lahan pertanian menunjukkan perbaikan yang signifikan. Perbaikan kualitas tanah yang dijadikan indikator keberhasilan fitoremediasi adalah adanya reduksi logam berat yang terjadi pada tanah. Reduksi logam berat pada masing-masing tanaman disajikan pada Gambar 8.4.

Gambar tersebut menunjukkan bahwa kedua jenis tanaman remediator yang tanam dengan menggunakan biochar terlihat memiliki kemampuan mereduksi logam berat. Mekanisme reduksi keduanya relatif sama, terutama terlihat pada perlakuan penggunaan biochar sekam padi dan limbah tembakau yang dikombinasi.

Secara terpisah penggunaan biochar sekam padi dan limbah tembakau secara terpisah terlihat kurang signifikan, namun jika dikombinasikan terlihat cukup signifikan reduksi logam berat baik Pb maupun Cd. Hal ini mengindikasikan bahwa penggunaan tanaman remediator *Eleusine indica* dan *Euphorbia hirta* dengan menggunakan campuran biochar sekam padi dan limbah tembakau mampu menurunkan logam berat Pb dan Cd pada tanah tercemar.



Gambar 8.4 Pemberian biochar terhadap penyerapan logam berat Pb dan Cd

Reduksi logam berat yang tinggi sangat tergantung kondisi tanah. Kondisi tanah dalam penelitian ini memiliki kesuburan yang cukup akibat penggunaan biochar sebagai sumber bahan organik. Kondisi tanah seperti ini mengakibatkan penyerapan logam berat menjadi tinggi dan ditranslokasikan ke bagian tanaman. Logam berat dapat diakumulasi di dalam organ-organ tanaman seperti akar, batang, daun, bunga, buah dan biji. Translokasi hasil akumulasi di dalam tanaman tergantung pada jenis logam, seperti Cd, Zn dan Ni yang masing-masing ditranslokasikan ke dinding sel, vakuola dan kloroplas (Suharjo, 2015).

Biochar sebagai pembenah tanah memiliki peranan penting dalam menyerap logam berat. Bahan organik tanah merupakan polimer yang dihasilkan dari dekomposisi sisa-sisa tanaman atau makhluk hidup oleh mikroba ataupun proses degradasi kimia. Afinitas yang tinggi pada bahan organik akan mengikat logam berat sehingga dapat mengurangi ketersediaan hayati. Akan tetapi bila mengandung asam organik yang memiliki gugus fungsional akan menguntungkan karena dapat membentuk kompleks organo metal atau istilah lain disebut khelat akan dapat meningkatkan mobilitas logam berat dalam larutan tanah.

Tingginya akumulasi logam berat pada tanah, mengindikasikan bahwa penggunaan biochar pada tanah tercemar dianggap berhasil karena selain mempercepat penyerapan logam berat, juga mampu memperbaiki kualitas tanah. Perbaikan kualitas tanah baik secara fisik, kimia maupun biologi tanah.

Beberapa hasil penelitian yang diungkapkan Atkinson *et al.* (2010), penggunaan biochar untuk memperbaiki kualitas tanah memiliki fungsi yaitu

- meningkatkan ketersediaan hara, retensi hara, dan retensi air,
- menciptakan habitat yang baik untuk mikroorganisma simbiotik.

Selain berpengaruh positif terhadap sifat tanah, pemberian biochar juga berpengaruh terhadap peningkatan produktivitas tanaman (Widowati *et al.*, 2014 ; Wisnubroto *et al.*, 2015). khususnya pada tanah masam (Spokas *et al.* 2012), mengungkapkan tidak berpengaruh nyata pada tanah dengan pH netral di Mid-West USA. Selain itu, aplikasi biochar pada lahan pertanian mengurangi laju emisi CO₂ dan N₂O, serta berkontribusi terhadap cadangan karbon (52,8%), artinya biochar mampu menyimpan karbon dalam waktu lama serta dalam jumlah besar.

Pada penelitian ini terlihat bahwa penggunaan biochar sekam padi dan biochar dari limbah tembakau mampu memperbaiki kualitas tanah. Akibatnya mempengaruhi pertumbuhan tanaman remediator *Eleusine indica* dan *Euphorbia hirta*. Perbaikan tanah dan pertumbuhan tanaman remediator ternyata mampu menyerap logam berat Pb dan Cd dalam jumlah yang signifikan (Gambar 6.2). Reduksi logam berat di tanah akan menjadikan tanah tercemar kembali pulih. namun perlu dibuktikan lebih lanjut dengan menggunakan tanaman pangan untuk melihat akumulasi logam berat pada jaringan tanaman, sekaligus memastikan kesehatan tanaman.

Mengukur kesehatan tanah dapat dilihat dari seberapa besar reduksi logam berat dari masing-masing tanaman. Hasil analisis reduksi menunjukkan bahwa kedua tanaman *Eleusine indica* dan *Euphorbia hirta* mampu mereduksi logam berat pasca penanaman kedua sampai > 75%. Tanaman *Eleusine indica* yang diberi biochar sekam padi mampu mereduksi Pb 78,36%, sedangkan diberi biochar jengkok mampu mereduksi Pb sampai 84,15%. Hal yang sama terlihat pada tanaman *Euphorbia hirta*, dimana pemberian biochar sekam padi mereduksi logam berat sampai 82,49%. Hal yang sama terlihat pada kombinasi antara biochar sekam padi dan biochar limbah tembakau dapat mereduksi 82,74% (Gambar 23).

Berbeda dengan logam berat Cd, dimana tanaman *Eleusine indica* dengan pemberian biochar limbah tembakau justru lebih tinggi (85%), sebaliknya terendah pada kombinasi biochar sekam padi dan limbah tembakau (79,03%). Hal yang berbeda terlihat pada tanaman *Euphorbia hirta*, dimana reduksi terendah pada biochar limbah tembakau.

Secara keseluruhan penggunaan kedua jenis tanaman dengan pemberian biochar sekam padi dan limbah tembakau pada periode tanam kedua (tahun ke-2) mampu mereduksi logam berat Pb dan Cd sampai > 80%. Hal ini terjadi karena kedua jenis tanaman remediator mampu beradaptasi dengan baik pada kondisi tanah yang tercemar. Kondisi tanah yang baik akan menghasilkan pertumbuhan tanaman baik sehingga mampu menyerap logam berat. Logam berat Cd lebih mudah diserap oleh tanaman dibandingkan Pb, namun Cd biasanya bergabung bersama timbal dan merkuri sebagai *the big three heavy metal* yang memiliki tingkat bahaya yang tinggi untuk kesehatan manusia.

Daftar Pustaka



- Adi Abdurachman, 2003. Degradasi Tanah Pertanian Indonesia Tanggung Jawab Siapa. Puslitbangtanak. <http://litbang.deptan.go.id>. diunduh, 28 Maret 2014
- Alberto A.M.P., dan Sigua G.C., 2013. Phytoremediation : A Green Technology to Remove Environmental Pollutants. *American Journal of Climate Change*, Volume 2, 71- 86. <http://www.scirp.org/journal/ajcc>.
- Alfian, 2006 Frero, H., Leftebrvre, C., Guber, W., Collin, C., Dos Santos, A., and Escare, J., 2006. Specific interactions between local metallophilous plants improve the phytostabilization of mine soil. *J. Plant and Soil*, 282: 53-65
- Aremu, M.O., Abike, F.O., and Oyebamiji, T., E. 2013. Phytoextraction potential of *vetiveria zizanioides* on heavy metals. *European Scientific Journal*, 9 : 1857 – 7881
- Atkinson C.J.,J.D. Fitzgerald, N.A. Higgs, 2010. Potential mechanisms for achieving agricultural benefits from biochar application to temperate soils: a review. *Plant and Soil*, 337 (2010), pp. 1-18
- Ahmad M., Rajapaksha A.U., Lim J.E., and Zhang M., 2014. Biochar as a sorbent for contaminant management in soil and water: A review. Volume 99, March 2014, Pages 19-33. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2013.10.071>. Elsevier.
- Budiman M.A.K, 2012. Sumber, Dampak, dan Penanggulangan dari Pencemaran Air. <https://asyiefkhasan.wordpress.com/2012/12/22/sumber-dampak-dan-penanggulangan-dari-pencemaran-air/>
- Buckley, M., 2000. Research Demonstrates Potentials of Plants to Break Down Some Types of Explosives. URL:<http://aec-www.apgea.army.mil:-8080/prod/usaec/op/plants.htm>.
- Bian R., Stephen J., Liqiang C., Genxing P., Lianqing L., Xiaoyu L., Afeng Z., Helen R., Singwei W., Chee C.,Chris M., Bin G., Paul M., and Scott D., 2014. A three-year experiment confirms continuous immobilization of cadmium and lead in contaminated paddy field with biochar amendment.
- Callahan, D.L., Baker, A.J.M., Kolev, S.D., and Weed, A.K., 2006. Metal ion ligands in hyperaccumulating plants. *J. of Biological Inorganic Chemistry*, 11: 2–12.

- Chaney, R.L., Chen, K.Y., Li, Y.M., Angle, J.S., and Baker, A.J.M., 2008. Effects of calcium on nickel tolerance and accumulation in *Alyssum* species and cabbage grown in nutrient solution. *J. Plant Soil*, 311: 131–140.
- Darmono.1995. *Logam Dalam Sistem Biologi Makhluk Hidup*. UI-Press:Jakarta
- Du, X., Zhu, Y.G., Liu, W.J., and Zhao, X.S., 2005. Uptake of mercury (Hg) by seedlings of rice (*Oryza sativa* L.) grown in solution culture and interactions with arsenate uptake. *J. Environmental and Experimental Botany*, 54: 1–7.
- Eapen, S., and D'Souza, S.F., 2005. Prospects of genetic engineering of plants for phytoremediation of toxic metals. *J. Biotechnology Advances* 23: 97–114.
- Environmental Protection Agency (EPA), 2001. *Brownfields technology primer: selecting and using phytoremediation for site clean up*. Environmental Protection Agency, Washington
- Fardiaz, S. 1992. *Polusi air dan udara*. Kanisius, Yogyakarta.
- Fellet G., Marmiroli M., and Marchiol L., 2014. Elements uptake by metal accumulator species grown on mine tailings amended with three types of biochar. *Science of the Total Environment* 468–469 : 598–608. www.elsevier.com/locate/scitotenv.
- Gaskin, J.W., Speir R.A., Harris K., Das K.C., Lee R.D., Morris L.A., Fisher D.S., 2010. Effect of peanuthull and pinechip biochar on soil nutrients, corn nutrient status, and yield. *Agronomy Journal* 102, 623–633.
- Geger, M., Wang, Y., and Neusch utz, C., 2005. Absence of Hg transpiration by shoot after Hg uptake by roots of six terrestrial plant species. *J. Environmental Pollution*, 134: 201–208.
- Ghosh, M., and Singh, S.P., 2005. A review on phytoremediation of heavy metals and utilization of its by product. *J. Applied Ecology and Environmental Research* 3 (1): 1–18
- Herman. D.Z., 2006. Tinjauan terhadap *tailing* mengandung unsur pencemar Arsen (As), Merkuri (Hg), Timbal (Pb) dan Kadmium (Cd) dari sisa pengolahan bijih logam. *J. Geologi Indonesia*. Vol. 1 No. 1 : 31-36.
- Hidayati N, 2005. Fitoremediasi dan Potensi Tumbuhan Hiperakumulator. Sebuah Ulasan. *J. Hayati*, 12 (1): 35-40.
- Hall, J.L., 2002. Cellular mechanisms for heavy metal detoxification and tolerance. *J. Experimental Botany* 53: 1–11.
- Hamzah A., Z. Kusuma, W.H. Utomo, and B. Guritno, 2012. Siam weed (*Chromolaena odorata* L.) for phytoremediation of artisanal gold mine tailings. *Journal Tropical of Agriculture*, 50 (1-2) : 88-91.

- Hamzah A., Ricky I.H., Erwin I.W., 2016. Phytoremediation of Cadmium-contaminated agricultural land using indigenous plants. IJOEAR Vol-2, No 1 : 8-14. www.ljoear.com
- Hamzah A., Ricky I. Hapsari, and Rosyda P. 2017. The influence of rice husk and tobacco waste biochars on soil quality. Journal of Degraded and Mining Lands Management (JDMLM) Volume 5, No. 1 (October 2017). www.jdmlm.ub.ac.id
- Handayanto E.H. dan Kurniatun H, 2009. Biologi Tanah : Landasan Pengelolaan Tanah Sehat. Penerbit Pustaka Adipura, Yogyakarta.
- Handayanto E.H., Nuraini Y., Nurul M., Netty S., dan Amrullah F., 2016. Fitoremediasi dan Phytomining Logam Berat Pencemar Tanah, Penerbit UB Press, Malang.
- Herman. D.Z., 2006. Tinjauan terhadap *tailing* mengandung unsur pencemar Arsen (As), Merkuri (Hg), Timbal (Pb) dan Kadmium (Cd) dari sisa pengolahan bijih logam. Jurnal Geologi Indonesia. Vol. 1 No. 1 : 31-36.
- Hindersah, R., Kalay, A. M., dan Muntalif, B.S., 2004. Akumulasi Pb dan Cd Pada Buah Tomat Yang Ditanam Di Tanah Mengandung Lumpur Kering Dari Instalasi Pengolahan Air Limbah Domestik. Konges Perhimpunan Ahli Teknologi Pangan Indonesia (PATPI), Jakarta 17-18 Desember 2004.
- Hidayat B., 2015. Remediasi tanah tercemar logam berat dengan menggunakan biochar. Jurnal Pertanian Tropik Volume 2, No.1. (7) : 31- 41
- Idris, R., Trifonova, R., Puschenrieiter, M., Wenzel, W.W., and Sessitsch, A., 2004. Bacterial communities associated with flowering plants of Ni hyperaccumulator *Thlaspi goesingense*. J. Applied Environmental Microbiology, 70: 2667–2677
- Jeffery S., F.G.A. Verheijen, M. van der Velde, A.C. Bastos, 2011. A Quantitative Review of the Effects of Biochar Application to Soils on Crop Productivity Using Meta-Analysis. J. Agriculture Ecosystems & Environment 144(1):175-187. DOI: 10.1016/j.agee.2011.08.015
- Kimenyu, P.N., Oyaro, N., Chacha, J.S. and Tsanuo, M.K., 2009. The potential of *Commelina bengalensis*, *Amaranthus hybridus*, *Zea mays* for phytoremediation of heavy metals from contaminated soils. J. Sains Malaysiana, 38(1): 61 – 68.
- Lasat, M.M., 2001. The use of plant of the removal of toxic metals from contaminated soil. American Association for the Advancement of Science. USA.
- Lehman, C. Dan dan franz, R. 2004. Assesising the potential for cadmium phytoremediation with *Calamagostis epigejos*: a pot experiment. J. of Phytoremediation, 6(2): 169-183

- Liu, X., Zhang, A., Ji, C., Joseph, S., Bian, R., Li, L., Pan, G., and Paz-Ferreiro, J. 2013. Biochar's effect on crop productivity and the dependence on experimental conditions – a meta-analysis of literature data, *Plant Soil*, 373 : 583–594, doi:10.1007/s11104-013-1806-x.
- McMahon, G., Subdibjo, E.R., Aden, J., Bouzاهر, A., Dore, G., and Kunanayagam, R., 2000. Mining and the environment in Indonesia: Long-term trends and repercussions of the Asian economic crisis. EASES Discussion Paper Series, 21438 November 2000. the Environment and Social Development Unit (EASES), East Asia and Pacific Region of the World Bank
- Mendez, M.O., Glenn, E.P. and Maier, R.M. 2007. Phytostabilization potential of quailbush for mine tailings: growth, metal accumulation, and microbial community changes. *J. Environmental Quality*, 36: 245–253.
- Moreno-Jimenez, E., Gamarra, R., Carpena-Ruiz, R.O., Mill' an, R., Penalosa, J.M., and Esteban, E., 2006. Mercury bioaccumulation and phytotoxicity in two wild plant species of Almaden area. *J. Chemosphere*, 63: 1969–1973.
- Notohadiprawiro, T. 2006. Logam berat dalam Pertanian. UGM Pres : Yogyakarta.
- Ortega-Villasante, C., Alvarez, R., Del Campo, F.F., Carpena-Ruiz, R.O., and Hernandez, L.E., 2005. Cellular damage induced by cadmium and mercury in *Medicago sativa*. *J. Experimental Botany*, 56: 2239–2251
- Patra, M., and Sharma, A., 2000. Mercury toxicity in plants. *J. Botany Rev.* 66 : 379-422.
- Reeves, R., 2006. Hyperaccumulation of trace elements by plants. In: *Phytoremediation of Metal-Contaminated Soils*. Morel, J. L., Echevarria, G., and Goncharova, N., Eds.: 25–52.
- Robinson, B., Fernandez, J.E., Madejon, P., Maranon, T., Murillo, J.M., Geen, S., and Clothier, B., 2003. Phytoextraction: an assessment of biogeochemical and economic viability. *J. Plant and Soil*, 249: 117–125.
- Robinson, B., Banuelos, G., Conesa, H.M., Evangelou M.W.H., and Schulin R., 2009. The Phytomanagement of Trace Elements in Soil. *Critical Reviews in Plant Science*, 28: 240–266, www.informaworld.com
- Rondon, M. A., Lehmann, J., Ramirez, J., and Hurtado, M., 2007. Biological nitrogen fixation by common beans (*Phaseolus vulgaris* L.) increases with biochar additions. *J. Biology and Fertility of Soils*, 43 : 699 -708.
- Schroder, P., Patricia, J.H., and Jean-Paul, S., 2002. prospects for phytoremediation of organik pollutants in europe. *J. Environmental Science and Pollution*, 9(1): 1 – 3.

- Schnoor, J.L., 2002. Phytoremediation of soil and groundwater. Groundwater Remediation Technologies Analysis Center, Technology Evaluation Report, TE-02-01: 1-45
- Shah, K., and Nongkynrih, J.M., 2007. Metal hyperaccumulation and bioremediation. *J. Biologia Plantarum*, 51 (4): 616–634.
- Sheoran, V., Sheoran, A.S., and Poonia P., 2009. Phytomining: A review. *J Minerals Engineering* 1007–1019 home page: www.elsevier.com/locate/mineng
- Spokas K.A., Novak J.M., Venterea R.T., (2012) Biochar's role as an alternative N fertilizer: ammonia capture. *J. Plant Soil* 350:35–42. doi:10.1007/s11104-011-0930-8
- Subowo G., Ratmini N.P.S., Dewi D.S., dan Kentjanasari, 2004. Efektivitas Teknologi Remediasi Tanah Tercemar Logam Berat Pb dan Cd. Prosiding Seminar Inovasi Teknologi Sumberdaya Tanah dan Iklim. Bogor, 14 – 15 September 2004.
- Susilowati, L.E., 2010. Perilaku Timbal (Pb) Dalam Tanah dan Pengaruhnya Terhadap Kehidupan Bakteri Pelarut Fosfat dan Perubahan Anatomi Morfologi Akar Tanaman. Disertasi. Program Pasca Sarjana Universitas Brawijaya, Malang.
- Tang J., Zhu W., Kookan R., and Katayama A., 2013. Characteristics of biochar and its application in remediation of contaminated soil. *Journal of Bioscience and Bioengineering*. Volume 116, Issue 6, December 2013, Pages 653-659. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2013.10.071>
- Wang, Y., and Geger, M., 2004. Clonal differences in mercury tolerance, accumulation, and distribution in willow. *J. of Environmental Quality*, 33: 1779–1785
- Watanabe, M.E., 1997. Phytoremediation on the brink of commercialization. *Environ. J. Science Technology*, 31(4): 182-186
- Waseem A., Jahanzaib, A., Farhat I., Ashif S., Zahid M., and Ghulam M., 2014. Pollution Status of Pakistan: A Retrospective Review on Heavy Metal Contamination of Water, Soil, and Vegetables. *BioMed Research International* Volume 2014 (2014), Article ID 813206, 29 pages. <http://dx.doi.org/10.1155/2014/813206>.
- Widaningrum, Miskiyah dan Suismono, 2007. Bahaya Kontaminasi Logam Berat Dalam Sayuran Dan Alternatif Pencegahan Cemarannya. *Jurnal, Buletin Teknologi Pascapanen Pertanian* Vol. 3 2007
- Widhiyatna, D., 2005. Pendataan Penyebaran Merkuri Akibat Usaha Pertambangan Emas di Daerah Tasikmalaya, Propinsi Jawa Barat. Laporan Penelitian-DIM
- Widowati, W., Asnah, A., and Utomo, W. H. 2014. The use of biochar to reduce nitrogen and potassium leaching from soil cultivated with maize. *Journal of Degraded and Mining Lands Management*, 2(1), 211-218.

- Wisnubroto, E. 2015. Investigation on the effect of biochar addition and the use of pasture species with different rooting systems on soil fertility and carbon storage. (Master Theses, Massey University).
- Zynda, T., 2001. Phytoremediation. Michigan State University The Technical Assistance for Brownfield Communities (TAB) Program.

Biografi Penulis



Dr. Ir. Amir Hamzah, MP., lahir di Maluku Utara, 27 Mei 1967. Bekerja sebagai dosen dpk Lembaga Layanan Dikti (LLDikti) Wilayah 7 pada Fakultas Pertanian Universitas Tribhuwana Tunggadewi, Malang. Saat ini menjabat sebagai Dekan Fakultas Pertanian Universitas Tribhuwana Tunggadewi, dengan Jabatan Fungsional Lektor Kepala.

Gelar Sarjana Pertanian (Ir) diperoleh dari Jurusan Budidaya Pertanian Fakultas Pertanian Universitas Darussalam Ambon, 1992. Tahun 1999 memperoleh gelar Magister Pertanian (MP) dari Pascasarjana Universitas Brawijaya Program Studi Pengelolaan Tanah dan Air. Tahun 2013 menyelesaikan Program Doktor Ilmu Pertanian dari Universitas Brawijaya. Sejak tahun 2008 sampai saat ini masih menekuni berbagai penelitian yang berkaitan dengan pencemaran tanah dan air. Aktif pada forum-forum ilmiah baik sebagai pemakalah maupun peserta. Beberapa hasil penelitian telah publikasikan di jurnal Nasional maupun Internasional. Beberapa dari hasil penelitian telah diajukan untuk dipatenkan.



Dr. Ir. Rosyda Priyadarshini, MP., lahir di Sampang, 19 Maret 1967. Saat ini bekerja sebagai dosen Fakultas Pertanian Universitas Pembangunan Nasional Veteran Surabaya. Saat ini menjabat sebagai Sekretaris LPMM Universitas Pembangunan Nasional Veteran Jawa Timur, dengan Jabatan Fungsional Lektor Kepala.

Gelar Sarjana Pertanian (Ir) diperoleh dari Jurusan Tanah Pertanian Fakultas Pertanian Institut Pertanian Bogor, 1990. Tahun 1999 memperoleh gelar Magister Pertanian (MP) dari Pascasarjana Universitas Brawijaya Program Studi Pengelolaan Tanah dan Air. Tahun 2012 menyelesaikan Program Doktor Ilmu Pertanian dari Universitas Brawijaya. Sejak tahun 2007 sampai saat ini masih menekuni berbagai penelitian yang berkaitan Biodiversitas dan kimia tanah. Aktif mengikuti seminar baik sebagai pemakalah maupun peserta pada tingkat nasional maupun internasional. Beberapa hasil penelitian telah publikasikan di jurnal Nasional maupun Internasional, dan sebagian diajukan untuk dipatenkan.