

PEMULIHAN LAHAN TERKONTAMINASI LIMBAH B3 DARI PROSES DEINKING INDUSTRI KERTAS SECARA FITOREMEDIASI

(CLEAN UP CONTAMINATED SOIL OF HAZARDOUS WASTE FROM DEINKING PROCESS IN THE PAPER INDUSTRIES BY PHYTOREMEDIATION)

Henggar Hardiani
Balai Besar Pulp dan Kertas
Jalan Raya Dayeuhkolot No. 132, Bandung 40258
henggarh@yahoo.co.uk

ABSTRAK

Pembuangan limbah padat secara timbunan terbuka (*open dumping*) berpotensi menimbulkan permasalahan lingkungan, selain estetika lingkungan dan keterbatasan lahan, juga dapat menimbulkan permasalahan pencemaran tanah, air tanah dan air permukaan, sehingga perlu dilakukan pemulihan lahan terkontaminasi pada lokasi bekas timbunan tersebut. Fitoremediasi adalah teknologi proses pemulihan tanah terkontaminasi menggunakan tanaman, yang efektif, murah dan ramah lingkungan. Efektifitas proses sangat dipengaruhi oleh jenis dan konsentrasi kontaminan dan tanaman yang digunakan. Penelitian ini menggunakan tanaman jarak pagar (*Jatropha curcas* L.) dengan variasi umur tanam 2, 4 dan 6 bulan dengan 3 ulangan. Parameter yang diuji adalah logam Cu dan Zn yang merupakan polutan cukup tinggi di dalam limbah *deinking* industri kertas.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa tanaman jarak mempunyai kemampuan mengakumulasi dan menyerap logam Zn lebih besar dibandingkan dengan logam Cu. Umur tanam 4 bulan merupakan kondisi baik yang dipilih untuk fitoremediasi logam Zn dan Cu dalam tanah terkontaminasi. Akumulasi logam Cu pada tanah terkontaminasi ke dalam akar 14,5% dalam batang 2,2% dan dalam daun 7,2%, sedangkan akumulasi logam Zn kedalam akar 81,1%, dalam batang 35,5% dan dalam daun 46,9%. Efisiensi serapan tanaman terhadap logam Zn sebesar 2,65% dan logam Cu 0,24%.

Kata kunci: Fitoremediasi, limbah padat proses *deinking*, jarak pagar, logam berat Zn dan Cu

ABSTRACT

Open dumping disposal of solid waste can generate environmental problem, such as aesthetical degradation, space decreasing, soil and ground water pollution as well as surface water pollution. To overcome those problem remediation of open dumping area is needed. Phytoremediation is clean up process technology which can effectively remediate the heavy metals at low cost and environmentally friendly. Its effectivity depends on the type of plants and concentration of the contaminants. This research used *Jatropha curcas* with various planting period of 2, 4 and 6 months with 3 replication. Parameters to be tested were Cu and Zn metals, because *deinking* waste contain this pollutant high enough.

The experiment result indicates that *Jatropha curcas* has ability to accumulate and to absorb higher Zn compared to Cu, in which absorption efficiency of Zn was 2.65% and 0.24% of Cu. The ability of

Zn accumulation in root, stem and leaf were 81.1%; 35.5% and 46.9% respectively, whereas Cu were 14.5%; 2.2% and 7.2% respectively.

Keywords: *Phytoremediation, solid waste, deinking process, Jatropha curcas L, heavy metal Zn and Cu*

PENDAHULUAN

Industri Kertas dengan proses *deinking* merupakan salah satu industri penghasil limbah padat yang limbahnya diklasifikasikan sebagai limbah B3 dari sumber yang spesifik (Peraturan Pemerintah no18/1999 dan 85/1999 tentang *Pengelolaan Bahan Berbahaya dan Beracun*). Pada umumnya limbah padat ini mengandung logam berat toksik yang berasal dari tinta yang larut dalam air limbah proses *deinking*, logam berat tersebut yaitu Pb, Cr, Cu, Ni, Zn, Cd dan Hg (Richardson *et al.*, 1992). Logam berat secara alamiah akan terus menerus berada di alam, karena tidak mengalami transformasi (*persistent*), sehingga menyimpan potensi peracunan yang laten.

Secara umum jumlah limbah padat yang dihasilkan industri pulp dan kertas cukup besar. Limbah lumpur IPAL pabrik yang terpadu jumlahnya 1-3% (lumpur kering) dari kapasitas produk, sedangkan yang tidak terpadu pabrik pulp 0,6-0,7% dan pabrik kertas 0,8-1,2% (Deprin, 2006). Pada tahun 90-an, penanganan dan pengelolaan limbah padat di industri kertas umumnya dibuang secara timbunan terbuka (*open dumping*) di lokasi sekitar pabrik. Pembuangan limbah secara timbunan terbuka tersebut berpotensi menimbulkan permasalahan, selain estetika lingkungan, dapat menimbulkan permasalahan pencemaran tanah, air tanah dan air permukaan. Pembuangan limbah padat secara timbunan terbuka sekarang ini tidak diperbolehkan lagi, oleh karena itu perlu dilakukan pemulihan terhadap lahan yang sudah terkontaminasi oleh timbunan limbah tersebut.

Karakteristik limbah padat industri kertas umumnya mengandung logam Cu cukup tinggi yang belum memenuhi persyaratan untuk dibuang ke lingkungan. Menurut Kep-04/Bapedal/09/1995, nilai Cu yang dipersyaratkan sebesar 100 mg/kg untuk kriteria B. Hasil analisis total logam Cu dalam limbah padat pabrik kertas dari tahun 2000 sampai 2005 memberikan nilai rata-rata berturut-turut adalah 102,3 mg/kg, 104,8 mg/kg; 88,6 mg/kg; 105,8 mg/kg, sedangkan kandungan Zn masih memenuhi persyaratan

(nilai persyaratan sebesar 500 mg/kg). Hasil analisis total logam Zn dari tahun 2000 sampai 2005 memberikan nilai rata-rata berturut-turut adalah 115,45 mg/kg; 17,46 mg/kg; 78,09 mg/kg; 23,65 mg/kg. (Progress report, 2006). Logam Cu berpotensi toksin terhadap tanaman dan berbahaya bagi manusia karena bersifat karsinogenik (Notodarmojo, 2005)

Logam Zn dan Cu sebagai unsur mikro esensial, tetapi dengan kadar yang berlebihan, baik secara sendiri maupun bersama-sama dapat meracuni tanaman. Untuk pertumbuhan, tanaman membutuhkan unsur Zn hanya dalam jumlah sedikit dibandingkan dengan unsur hara makro. Kandungan Zn pada jaringan tanaman yang sehat berkisar 21-120 mg/kg dan dikatakan rendah bila kandungan Zn 11-25 mg/kg dan bila dibawah nilai 10 mg/kg disebut kurang (defisien), dan tinggi atau berlebihan bila kandungan Zn diatas 71 mg/kg (Lahudin, 2007). Kadar Zn yang tinggi menekan serapan P dan Fe oleh tanaman. Berbeda dengan logam Cu, kandungan dalam jaringan tanaman yang tumbuh normal sekitar 5-20 mg/kg, sedangkan pada kondisi kritis dalam tanah 60-120 mg/kg dan dalam jaringan tanaman 5-60 mg/kg. Pada kondisi kritis pertumbuhan tanaman mulai terhambat sebagai akibat keracunan Cu (Alloway, 1995).

Keberadaan logam berat dalam tanah perlu mendapatkan perhatian yang serius karena tiga hal, meliputi : 1) sifat racun dan potensi karsinogeniknya; 2) mobilitas logam dalam tanah bisa dengan cepat berubah dari yang tadinya immobile dan 3) mempunyai sifat konservatif dan cenderung kumulatif dalam tubuh manusia.

Salah satu pilihan untuk mengatasi masalah tersebut adalah fitoremediasi menggunakan tumbuhan. Fitoremediasi cukup menarik, selain hemat biaya, dapat juga dilakukan secara *in situ* langsung di tempat dan prosesnya alamiah. Menurut Lasat (2000) biaya pengolahan dengan fitoekstraksi lebih rendah daripada pengolahan lainnya. Perbandingan biaya tersebut adalah \$ 100-500 untuk pengolahan kimia dan landfilling, \$ 20-200 untuk pengolahan dengan *Electrokinetics*, sedangkan fitore-

mediasi sebesar \$ 5-40. Fitoremediasi merupakan teknologi proses yang menggunakan tumbuhan untuk menghilangkan atau memulihkan tanah atau perairan yang telah terkontaminasi oleh logam berat (Gatliff, 1996). Proses remediasi polutan dari dalam tanah atau air terjadi karena jenis tanaman tertentu dapat melepaskan zat *carriers*, yang biasanya berupa senyawaan kelat, protein, glukosida, yang berfungsi mengikat zat polutan tertentu kemudian dikumpulkan di jaringan tanaman, misalnya pada daun atau akar. Teknologi yang mulai berkembang ini memanfaatkan kemampuan alamiah tanaman dalam menyerap, mengakumulasi dan mendegradasikan senyawa pencemar serta menginteraksikan dengan mikroba tertentu. Oleh karena itu pemilihan jenis tanaman merupakan salah satu faktor penting dalam keberhasilan fitoremediasi.

Tanaman yang mempunyai kemampuan menyerap logam berat dari tanah oleh akar dan mengakumulasikan dalam berbagai organnya, dikenal sebagai tanaman hiperakumulator. Jenis tanaman ini sangat terbatas. Beberapa peneliti mengusulkan selain tanaman hiperakumulator, jenis tanaman hipertoleransi yang mempunyai biomassa tinggi bisa juga digunakan sebagai tanaman alternatif dalam fitoremediasi (Ebbs, 1998). Batas kadar logam yang terdapat di dalam biomassa, agar suatu tanaman dapat disebut hiperakumulator berbeda-beda bergantung pada jenis logamnya. Menurut Lasat (2003) sebagai acuan tanaman bersifat hiperakumulator adalah tanaman yang dapat menyerap logam berat, sebagai berikut:

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

Beberapa contoh tumbuhan hiperakumulator terhadap logam berat dan potensi bioakumulasinya dapat dilihat pada Tabel 1.

Fitoremediasi secara umum dapat dibagi menjadi fitoekstraksi, rizofiltrasi dan fitostabilisasi. Fitoekstraksi disebut juga fitoakumulasi adalah penyerapan senyawa-senyawa pencemar logam oleh akar tanaman dan translokasi atau akumulasi senyawa itu ke bagian tanaman, seperti

Tabel 1. Beberapa tumbuhan hiperakumulator terhadap logam dan potensi bioakumulasi

Spesies Tumbuhan	Logam	Kandungan di daun (ppm)
<i>Thlaspi caerulescens</i>	Zn	39.600
	Cd	1.800
<i>Ipomea alpine</i>	Cu	12.300
<i>Haumaniastrum robertii</i>	Co	10.200
<i>Astragalus racemosus</i>	Se	14.900
<i>Sebertia acuminata</i>	Ni	25% berat kering

Sumber : Lasat, 2003

akar, daun atau batang. Rizofiltrasi adalah pemanfaatan kemampuan akar tanaman untuk menyerap, mengendapkan dan mengakumulasikan senyawa-senyawa pencemar dari aliran limbah. Rizofiltrasi mempunyai kesamaan dengan fitoekstraksi tetapi berbeda pada media yang diolah. Pada rizofiltrasi medianya adalah air tanah, air permukaan dan air limbah, sedangkan fitoekstraksi medianya adalah tanah, sedimen dan limbah padat (*sludge*). Fitostabilisasi adalah suatu fenomena diproduksinya senyawa kimia tertentu untuk mengimobilisasi senyawa-senyawa pencemar di daerah rizosfer. Proses ini mengurangi mobilitas senyawa-senyawa pencemar dan mencegah migrasi ke air tanah atau udara dan proses ini juga mencegah senyawa-senyawa pencemar masuk ke dalam rantai makanan jenis fitoremediasi pada penelitian ini termasuk dalam tipe fitoekstraksi.

Tindakan remediasi perlu dilakukan agar lahan yang terkontaminasi dapat digunakan kembali untuk berbagai kegiatan secara aman. Dewasa ini fitoremediasi semakin mendapat perhatian serius dari para peneliti di dunia karena sangat berpotensi untuk dikembangkan lebih lanjut menjadi sebuah teknologi yang handal dalam ilmu lingkungan. Pengembangan fitoremediasi dapat memberikan harapan besar dalam upaya pemulihan lahan terkontaminasi limbah padat industri kertas proses *deinking*. Namun dalam pelaksanaannya, masih ada kendala yang dihadapi. Permasalahan utama adalah menemukan spesies tanaman yang sesuai untuk kebutuhan fitoremediasi.

Pada penelitian ini dipilih tanaman jarak pagar (*Jatropha curcas* L.), karena sifat tanaman ini mudah tumbuh dan dapat tumbuh di lahan marginal yang miskin hara (Prihandana, 2006). Tanaman jarak mudah beradaptasi terhadap lingkungan tumbuhnya, bisa ditanam di lahan kritis dan cocok juga untuk program reboisasi atau

penghijauan, tahan terhadap stres air sehingga sesuai ditanam di daerah yang kurang air. Tanaman jarak pagar termasuk famili *Euphorbiaceae*, satu famili dengan karet dan ubi kayu. Pohonnya berupa perdu dan bercabang tidak teratur, berbentuk pohon kecil atau belukar besar. Batangnya berkayu, silindris bila terluka mengeluarkan getah. Akar tanaman jarak memiliki akar tunggang sehingga tahan kering dan mampu berumur panjang. Pertumbuhan akar yang cepat dapat meningkatkan kemampuan tanaman beradaptasi terhadap perubahan kondisi kelembaban tanah. Daun tanaman jarak pagar berupa daun tunggal, dan tersebar di sepanjang batang, daunnya lebar dan berbentuk jantung atau bulat telur melebar.

Tanaman jarak pagar adalah tanaman yang cukup prospektif dan sedang dikembangkan karena relatif mudah ditanam, toleransinya tinggi terhadap berbagai jenis tanah dan iklim (Sudradjat, 2006). Manfaat lain dari tanaman jarak adalah pemanfaatannya untuk bahan baku biodiesel sebagai alternatif bahan energi terbarukan pengganti bahan bakar minyak.

Jarak pagar akhir-akhir ini menjadi komoditas primadona karena berpotensi sebagai penghasil bahan bakar. Pengembangan jarak pagar secara besar-besaran memerlukan sumber daya lahan yang cukup luas. Namun, luas lahan yang ada terbatas, sehingga perlu dilakukan penelitian alternatif penggunaan lahan non produktif. Lahan tersebut dapat diarahkan pada lahan timbunan terbuka bekas pembuangan limbah padat industri kertas, sehingga selain dapat digunakan untuk budidaya tanaman jarak pagar juga berfungsi sebagai pemulihan tanah terkontaminasi.

Penelitian ini dilakukan untuk dapat memberikan masukan tentang tanaman yang dapat berfungsi sebagai fitoremediator terhadap logam berat khususnya untuk mengetahui tingkat akumulasi logam Cu dan Zn dari tanah yang terkontaminasi limbah padat proses *deinking* dengan menggunakan tanaman jarak (*Jatropha curcas* L.)

BAHAN DAN METODA

Bahan Penelitian

1. Tanah Percobaan

- Tanah tidak terkontaminasi, yaitu tanah yang diambil dari lahan di lokasi lain yang tidak terkontaminasi limbah padat.

- Tanah terkontaminasi, yaitu tanah yang diambil dari lahan pembuangan limbah padat pabrik kertas proses *deinking* dengan umur timbunan diatas 3 tahun.

Cara pengambilan contoh tanah di lokasi timbunan terbuka dilakukan secara acak dengan memetak 2 x 2 m pada kedalaman sekitar 1 m. Selanjutnya dicampur dan dikeringkan.

2. Jenis Tanaman

Tanaman yang digunakan untuk penelitian ini adalah tanaman jarak pagar (*Jatropha curcas* L.)

Metoda Penelitian

Penelitian dilakukan di laboratorium (rumah kaca) yang meliputi, karakterisasi media tanam (tanah terkontaminasi dan tanah tidak terkontaminasi limbah *deinking*) dan penanaman tanaman jarak pada tanah percobaan.

a. Karakterisasi media tanam

Karakterisasi meliputi parameter kesuburan tanah, kandungan logam dan analisis fraksinasi untuk mengetahui ketersediaan logam bagi tanaman dan sifat mobilitas logam dalam tanah.

b. Persiapan media tanam dan tanaman

Media tanam disiapkan sebanyak 36 kg, sebelumnya telah dilakukan pengeringan dan penyaringan dengan saringan 10 mesh, kemudian dimasukkan pada pot sebanyak 2 kg setiap pot. Tanaman jarak pagar yang ditanam berasal dari bibit biji. Biji tanaman jarak sebelumnya direndam dalam air selama 24 jam, kemudian di tanam pada tanah percobaan dalam wadah pot plastik dan setiap pot satu benih biji. Penyiapan tanaman jarak dilakukan dengan penyiraman setiap hari (pagi dan sore).

c. Percobaan fitoremediasi oleh tanaman jarak pagar

Percobaan fitoremediasi dilakukan di rumah kaca. Rancangan percobaan yang digunakan adalah rancangan acak sempurna dengan pengulangan masing-masing perlakuan sebanyak tiga kali. Perlakuan percobaan adalah variasi umur tanam dan jenis media tanam. Variasi umur tanam, adalah 2 bulan, 4 bulan dan 6 bulan. Sedangkan jenis media adalah tanah terkontaminasi dan tanah tidak terkontaminasi limbah *deinking*. Tanah tidak

terkontaminasi ini digunakan sebagai pembanding dalam penelitian ini. Selama percobaan tidak dilakukan penambahan pupuk. Parameter pengamatan dilakukan terhadap biomassa kering akar, batang dan daun. Selain itu juga dilakukan analisis kandungan logam Zn dan Cu dalam akar, batang dan daun serta dalam tanah sebelum dan setelah percobaan fitoremediasi.

d. Evaluasi Data

Uji kemampuan akumulasi logam, dilakukan dengan menghitung persen efisiensi penyerapan oleh tanaman, sebagai berikut:

$$\text{Laju Penyerapan \%} = \frac{\text{Logam dlm tanah} - \text{logam dlm tanaman}}{\text{Logam dlm tanah}} \times 100 \%$$

dan efisiensi remediasi/pemulihan ditentukan dengan perhitungan sebagai berikut :

$$\text{Efisiensi remediasi (\%)} = \frac{\text{Logam dlm tanaman}}{\text{Logam dlm tanah}} \times 100\%$$

Faktor mobilitas (MF) ditentukan dengan perhitungan sebagai berikut ;

$$MF = \frac{F1 + F2 + F3}{F1 + F2 + F3 + F4 + F5 + F6}$$

Keterangan :

- F1 : bentuk terlarut
- F2 : bentuk tertukarkan (aktual)
- F3 : bentuk yang berasosiasi dengan karbonat (potensial)
- F4 : bentuk yang berasosiasi dengan oksida logam Fe-Mn (potensial)
- F5 : bentuk yang berasosiasi dengan organik
- F6 : fraksi residu

Analisis data perhitungan efisiensi penyerapan tanaman jarak pagar dan analisis perbedaan efek dilakukan dengan menggunakan analisis varian. Selanjutnya untuk menguji perbedaan rata-rata antar perlakuan tanah percobaan dan umur tanam digunakan Uji Rentang *Newman-Keuls*.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Karakterisasi Tanah sebagai Media Tanam

Analisis karakterisasi tanah tidak terkontaminasi dan tanah terkontaminasi oleh limbah proses *deinking* meliputi uji kimia, uji

logam dan kesuburan tanah. Hasil analisis seperti dapat dilihat pada Tabel 2 dan Tabel 3 adalah kisaran nilai untuk kualifikasi tanah menurut Winarso (2005) dan Departemen Pertanian.

Dari hasil analisa tekstur tanah terlihat bahwa tanah tidak terkontaminasi didominasi fraksi liat 74% (>55%) maka tanah tersebut mempunyai tekstur liat (clay), sedangkan pada tanah terkontaminasi fraksi liatnya rendah, yaitu 37% (<55%). Berarti tingkat kesuburan tanah terkontaminasi lebih rendah dibandingkan dengan tanah tidak terkontaminasi, hal ini ditunjukkan pula dengan nilai KTK.

Menurut Suwardji (2006), perbedaan jumlah kandungan fraksi pasir, debu dan liat dapat menyebabkan perbedaan pertumbuhan pada tanaman jarak pagar (*Jatropha curcas*).

Tanah terkontaminasi mempunyai pH netral dengan nilai pH 7,3 sedangkan tanah tidak terkontaminasi menunjukkan sedikit basa dengan nilai pH sekitar 8,2. Nilai pH akan mempengaruhi ketersediaan dan sifat meracuni unsur logam terhadap tanaman atau mikroorganisme. Tanah yang terlalu asam maupun terlalu basa akan mencegah tanaman menyerap nutrisi dalam tanah meskipun unsur hara tersedia bahkan melimpah.

Tabel 2. Hasil analisis tanah

No	Parameter	Satuan	Tanah Tidak Terkontaminasi	Tanah Terkontaminasi
1	Tekstur			
	- Pasir	%	5	14
	- Debu	%	21	49
	- Liat	%	74	37
2	pH :		8,2	7,3
3	Nitrogen (N)	%	0,06	0,41
	Karbon (C)	%	1,33	19,98
4	Rasio (C/N)	%	22	49
	Posfor (P ₂ O ₃)	mg/kg	9,6	110,0
5	Kalium (K)	mg/kg	273,1	103,3
6	Kapasitas Tukar Kation (KTK)	me/100g	50,8	11,50
7	Unsur hara			
	- Ca	me/100g	46,67	30,25
	- Mg	me/100g	8,90	1,22
	- K	me/100g	1,10	0,36
	- Na	me/100g	2,83	0,16
	- Jumlah	me/100g	59,50	31,99

Tabel 3. Kisaran nilai untuk kualifikasi tanah

Parameter	Kriteria Kualifikasi Tanah				
	Sangat Rendah	Rendah	Sedang	Tinggi	Sangat Tinggi
pH	4,5-5,5 masam	5,6-6,5 (agak masam)	6,6-7,5 (netral)	7,6-8,5 (agak alkalis)	>8,5 alkalis
Nitrogen	<0,07	0,07-0,11	0,2-0,5	0,51-0,75	>0,75
Karbon (C)	<1,00	1,00-2,00	2,0-3,0	3,0-5,0	>5,00
Rasio (C/N)	<0,5	5-10	11-15	16-25	>25
Posfor (P ₂ O ₃)	<10	10-25	26-45	45-60	>60
Kalium (K)	8	12	21	36	58
Kapasitas Tukar Kation (KTK)	<6	6-12	12-25	25-40	>40
Unsur hara					
- Ca	<2	2-5	6-10	11-20	>20
- Mg	0,4	0,4-1,0	1,1-2,0	2,1-8,0	>8,0
- K	0,1	0,1-0,2	0,3-0,5	0,6-1,0	>1,0
- Na	0,1	0,1-0,3	0,4-0,7	0,8-1,0	>1,0

Catatan *) Winarso, 2005
 **) Departemen Pertanian

Ditinjau dari kandungan N, nilai N pada tanah tidak terkontaminasi = 0,06% dikategorikan kelas N sangat rendah (<0,07%), sedangkan pada tanah terkontaminasi di dikategorikan dalam kelas N sedang (>0,11%). Menurut Winarso (2005) kelebihan N akan meningkatkan pertumbuhan vegetatif tanaman, tetapi akan memperpendek masa generatif. Kandungan P dalam tanah terkontaminasi sangat tinggi (>60), sedangkan dalam tanah tidak terkontaminasi sangat rendah (<10). Kelebihan fosfor mendorong terjadinya defisiensi logam Zn sebagai mikro nutrien pada tanah dengan terbentuknya senyawa Zn-fosfat yang tidak dapat diserap tanaman.

Nilai KTK untuk tanah tidak terkontaminasi adalah 50,84 (nilai KTK >40) maka tanah tersebut mempunyai kesuburan sangat tinggi, sedangkan tanah terkontaminasi mempunyai nilai KTK 11,50 nilai tersebut selang KTK nya dibawah 20 sehingga kesuburannya rendah. Nilai KTK tanah mempunyai arti sangat penting dalam hubungannya dengan suplai unsur hara dan juga mempunyai pengaruh terhadap daya sangga tanah. Tanah tidak terkontaminasi mempunyai kemampuan tinggi dalam menyimpan dan melepaskan kation dan kuat daya sangganya.

Ditinjau dari hasil analisis unsur hara menunjukkan bahwa tanah tidak terkontaminasi mengandung unsur hara esensial (K,Ca,Mg,Na) sangat tinggi, sehingga lebih tersedia dan mudah dimanfaatkan tanaman.

Secara umum hasil analisis total logam dalam tanah baik yang tidak terkontaminasi maupun yang terkontaminasi limbah proses *deinking* menunjukkan bahwa parameter kandungan logam berat khususnya Zn dan Cu cukup tinggi dibandingkan dengan persyaratan logam dalam tanah tidak berbahaya. Hasil analisis tersebut dapat dilihat pada Tabel 4.

Kandungan logam Cu dalam tanah tidak terkontaminasi lebih rendah dibandingkan dengan tanah terkontaminasi, tetapi kebalikan dengan logam Zn. Logam Cu dan Zn termasuk sebagai mikro nutrien yang dibutuhkan oleh tanaman tetapi pada batas tertentu, apabila kandungan dalam tanah sangat tinggi, maka akan meracuni tanaman. Konsentrasi Cu dan Zn dalam tanah menunjukkan melebihi nilai maksimal tanah tidak berbahaya menurut AMEG, sehingga dapat dianggap berbahaya bagi manusia atau populasi biologis.

Tabel 4. Hasil analisis total logam

Parameter	Satuan	Media Tanam		Nilai maks tanah tidak berbahaya*
		Tanah Tidak terkontaminasi	Tanah terkontaminasi	
Arsen (As)	mg/kg	2,00	10,0	-
Kadmium (Cd)	mg/kg	1,20	2,30	0,08
Khrom (Cr)	mg/kg	9,30	7,40	10
Kobal (Co)	mg/kg	19,0	10,0	10
Tembaga (Cu)	mg/kg	32,1	65,9	2,0
Timah (Pb)	mg/kg	14,0	22,0	-
Merkuri (Hg)	mg/kg	0,176	2,02	0,002
Nikel (Ni)	mg/kg	15,4	16,2	0,4
Seng (Zn)	mg/kg	89,5	83,7	4,0

Sumber : Pencemaran Tanah dan Air Tanah, 2005

*Menurut AMEG (Ambient Multimedia Environmental Goal), USA

Fraksinasi Logam dalam Tanah

Analisis fraksinasi dengan cara ekstraksi berurutan digunakan secara tidak langsung untuk mengkaji mobilitas potensial dan ketersediaan logam dalam tanah. Bentuk geokimia logam Zn dan Cu di dalam tanah menentukan ketersediaan logam bagi tanaman. Hasil ekstraksi berurutan ditampilkan pada Tabel 5.

Analisis geokimia menunjukkan bahwa Zn dan Cu di dalam tanah terkontaminasi maupun tanah tidak terkontaminasi didominasi oleh fraksi residu. Berarti ketersediaan (*bioavailable*) logam Cu maupun logam Zn bagi tanaman rendah. Menurut Lena (1997) bila logam berada dalam fraksi non residu lebih besar daripada dalam fraksi residu, berarti logam tersebut lebih tersedia bagi tanaman. Jumlah logam dalam fraksi non residu digunakan sebagai indikator potensial ketersediaan yang berhubungan dengan kemampuan tanaman dalam menyerap logam. Keberadaan logam Zn dan Cu dalam tanah terkontaminasi dan tidak terkontaminasi menunjukkan bahwa fraksi bukan residu lebih kecil daripada dalam fraksi residu. Berarti ketersediaan kedua logam tersebut bagi tanaman termasuk rendah. Hal ini dapat mempengaruhi keberhasilan proses fitoremediasi. Namun demikian faktor mobilitas ion logam dalam tanah perlu ditentukan pula untuk mengetahui efektivitas dari fitoremediasi.

Tabel 5. Analisis fraksi logam dalam tanah

	% Total Cu		% Total Zn	
	Tanah Tidak Terkontaminasi	Tanah Terkontaminasi	Tanah Tidak Terkontaminasi	Tanah Terkontaminasi
Terlarut (F1)	0,03	0,03	0,24	0,20
Dapat dipertukarkan (aktual) (F2)	0,53	0,54	0,71	0,53
Karbonat-teradsorpsi (potensial) (F3)	3,35	4,28	1,95	1,06
Oksida Fe-Mn (potensial) (F4)	6,74	8,71	0,24	0,20
Terikat secara organik (F5)	4,91	9,53	15,92	39,14
Residu (F6)	88,45	76,94	80,96	58,86
Total Fraksi	100	100	100	100
Bukan Residu (Non Residual)	11,55	23,06	19,08	41,14

Mobilitas ion logam dalam tanah ditentukan dengan menghitung faktor mobilitas (MF). Nilai MF diinterpretasikan sebagai gejala labilitas logam dan ketersediaan logam dalam tanah. Hasil analisis nilai Faktor Mobilitas (MF) untuk logam Cu adalah 3,91% pada tanah tidak terkontaminasi dan 4,85% pada tanah terkontaminasi, hal ini menunjukkan bahwa tanah tidak terkontaminasi cukup labil dan tersedia dalam tanah. Nilai MF yang tinggi diinterpretasikan sebagai gejala labilitas yang relatif tinggi dan kemampuan ketersediaan dalam tanah juga tinggi, nilai MF pada umumnya untuk semua jenis logam tidak lebih tinggi dari 10% (Kabala, 2001). Berbeda dengan logam Zn cukup stabil nilai MF dalam tanah tidak terkontaminasi adalah 2,90%, sedangkan pada tanah terkontaminasi MF = 1,79%.

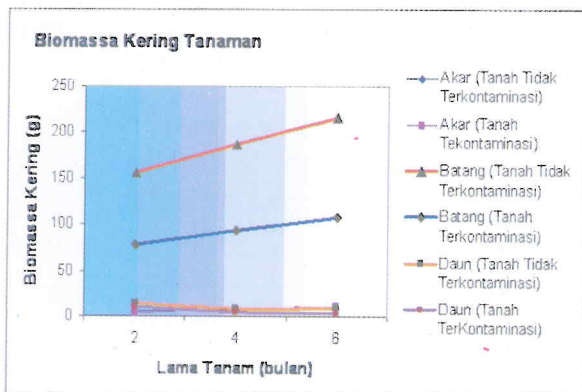
Biomassa Tanaman Jarak

Pertumbuhan tanaman jarak dalam tanah tidak terkontaminasi dan tanah terkontaminasi diperlihatkan pada Tabel 6 dan Gambar 1.

Pada tanah tidak terkontaminasi maupun tanah terkontaminasi, umur tanam meningkatkan berat biomassa kering. Makin lama umur tanam, makin meningkat pertumbuhan vegetatif tanaman, berarti adanya penyerapan logam Cu dan Zn dalam bagian tanaman tersebut masih dapat ditoleransi oleh tanaman. Kandungan Cu dan Zn dalam tanah mempe-

Tabel 6. Biomassa kering tanaman (g)

Perlakuan	Tanah tidak terkontaminasi			Tanah terkontaminasi		
	Umur Tanam (bulan)			Umur Tanam (bulan)		
	2	4	6	2	4	6
Akar	4,7	6,0	7,4	2,5	7,2	10,8
Batang	156	187	217	78	93	108
Daun	8,3	9,6	15,0	2,2	4,2	9,5



Gambar 1. Pengaruh umur tanam terhadap biomassa kering Tanaman

ngaruhi pertumbuhan tanaman, karena ion logam Cu dan Zn diperlukan oleh pertumbuhan tanaman sebagai mikronutrien. Ion Cu dibutuhkan oleh tanaman sangat sedikit, kandungan Cu dalam tanaman pada umumnya sekitar 5-20 mg/kg berat kering (Alloway, 1995).

Tanaman yang teradaptasi ditanah berkadar logam tinggi dan toleran terhadap logam mempunyai sifat tumbuh lambat.

Rasio Shoot-Akar Tanaman

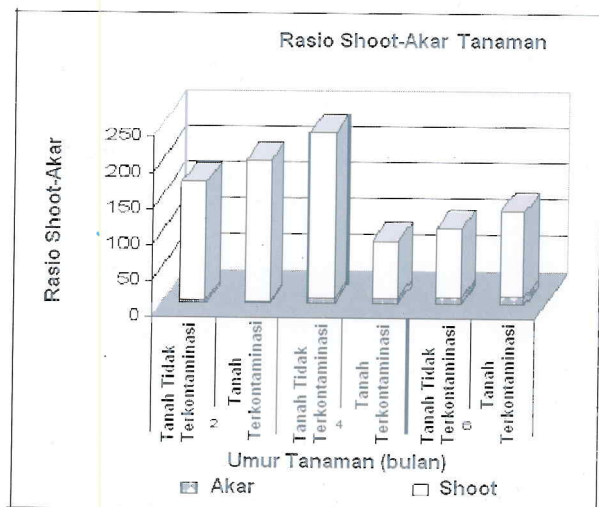
Alometri dari pertumbuhan pucuk dan pertumbuhan akar, biasanya dinyatakan sebagai rasio shoot-akar yang mempunyai kepentingan fisiologi, karena dapat menggambarkan salah satu tipe toleransi terhadap tanaman. Alometri adalah hubungan antara laju pertumbuhan dari bagian-bagian suatu organ tanaman secara terpisah-pisah (Herawati, 1991).

Menurut Chin et.al (2006), nilai rasio shoot-akar menunjukkan tingkat stress tanaman oleh adanya fitotoksik di media tanam. Pada Gambar 2 dan Tabel 7 terlihat bahwa rasio biomassa shoot-akar tanaman jarak yang ditanam di tanah tidak terkontaminasi lebih tinggi dari pada di tanah terkontaminasi.

Nilai rasio shoot-akar dalam tanah terkontaminasi pada umur tanam 2 bulan

Tabel 7. Rasio Shoot-Akar Tanaman

Perlakuan	Umur Tanam (bulan)		
	2	4	6
Tanah Tidak Terkontaminasi	34,7	32,8	31,3
Tanah Terkontaminasi	32,1	13,5	10,9



Gambar 2. Pola pertumbuhan tanaman jarak (Rasio Shoot-Akar)

mencapai sekitar 32,1 dan menurun menjadi 13,5 pada bulan ke 4, dan bulan ke-6 menurun lagi menjadi 10,9. Sedangkan pola pertumbuhan pada tanah tidak terkontaminasi pada umur tanam 2 bulan mencapai sekitar 34,7 dan menurun menjadi 32,8 pada bulan ke 4, dan bulan ke 6 menurun menjadi 31,3. Kondisi ini menunjukkan bahwa adanya ion Zn dan Cu mengganggu pertumbuhan tanaman jarak, yang ditunjukkan menurunnya rasio biomassa *shoot-akar*. Pada tanah terkontaminasi tingkat penurunan lebih tajam, yang berarti tingkat stres tanaman lebih tinggi. Hal ini disebabkan oleh ketidakseimbangan ketersediaan unsur hara yang tersedia bagi tanaman. Kandungan bahan organik dengan nilai C/N yang cukup tinggi dalam tanah terkontaminasi yang berasal dari limbah padat dapat menyebabkan kurang berfungsinya unsur hara bagi tanaman.

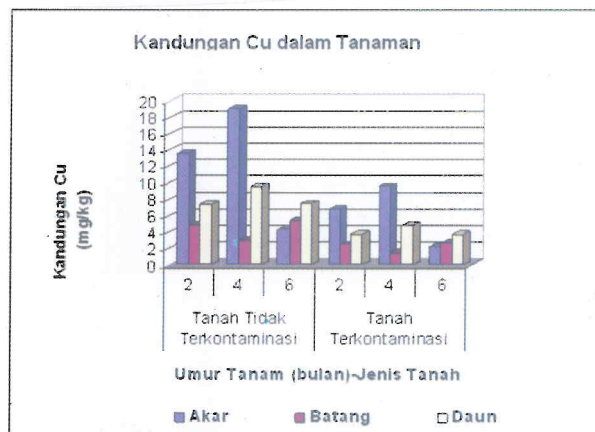
Laju Penyerapan Logam oleh Tanaman

Mekanisme proses penyerapan dan distribusi akumulasi logam Cu oleh tanaman jarak pagar pada tanah terkontaminasi pada umur tanam 2 bulan adalah sebagai berikut : mula-mula penyerapan logam oleh akar 6,8 mg/kg, di bawa masuk ke dalam sel akar, selanjutnya logam tersebut diangkut melalui jaringan pengangkut, yaitu xilem dan floem ke bagian batang. Translokasi logam Cu dari akar ke bagian batang menunjukkan penurunan konsentrasi logam menjadi 2,41 mg/kg. Hal ini disebabkan karena biomassa kering di bagian batang lebih besar dibandingkan dengan bagian akar maupun pada bagian daun, berarti terjadi pengenceran konsentrasi pada bagian batang. Proses selanjutnya lokalisasi logam ke dalam daun, pada kondisi ini terjadi peningkatan konsentrasi menjadi 3,7 mg/kg. Kecenderungan yang sama untuk umur tanam 4 bulan dan 6 bulan, seperti terlihat pada Gambar 3 dan 4.

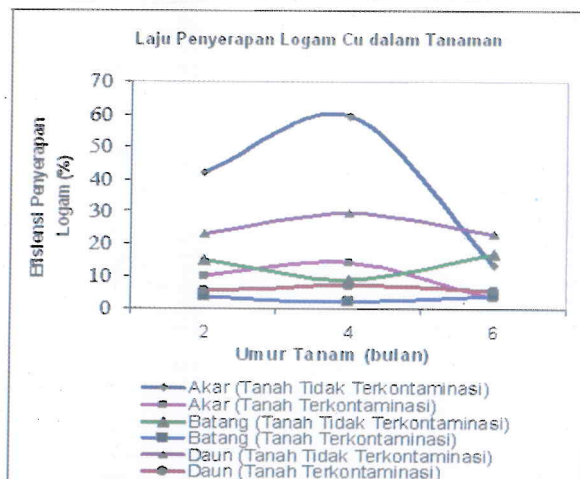
Pada permulaan penanaman, pertumbuhan mengarah ke akar dan distribusi unsur logam selanjutnya sebagian besar ditranslokasikan ke batang dan ke daun. Setelah umur tanam 4 bulan penyerapan logam Cu dalam tanaman menjadi makin rendah. Dari penyajian Gambar 4 terlihat bahwa laju penyerapan tertinggi logam Cu pada umur tanam bulan ke 4, baik pada tanah tidak terkontaminasi maupun tanah terkontaminasi. Laju penyerapan logam Cu ke dalam akar 14,5% dalam batang 2,2% dan dalam daun 7,2%. Hal ini menunjukkan bahwa setelah kandungan Cu menjadi berlebih dalam

tanaman menyebabkan keracunan bagi tanaman. Nilai batas keracunan unsur logam Cu bagi tanaman adalah 15-20 mg/kg (Notohadiprawiro, 2006) dan menurut Faust, 2000, tanaman *Kentucky blue grass* (*Poa pratensis* L) telah mengalami kerusakan dengan adanya kandungan Cu dalam jaringan sebesar 63,5 mg/kg. Ketersediaan logam bagi tanaman berbanding lurus dengan yang diserap maupun yang diekstraksi (Huang, 1997).

Secara umum akumulasi logam Cu dalam tanaman pada tanah tidak terkontaminasi lebih tinggi daripada pada tanah terkontaminasi. Rendahnya tingkat akumulasi logam tersebut dalam tanaman pada tanah terkontaminasi disebabkan karena nilai rasio C/N dalam tanah terkontaminasi masih cukup tinggi (49) diband-dingkan pada tanah tidak terkontaminasi (22). Berarti senyawa organik dalam tanah terkontaminasi mengikat logam membentuk senyawa khelat yang tidak bisa diabsorpsi tanaman.



Gambar 3. Pengaruh umur tanam dan jenis tanah terhadap kandungan Cu dalam tanaman

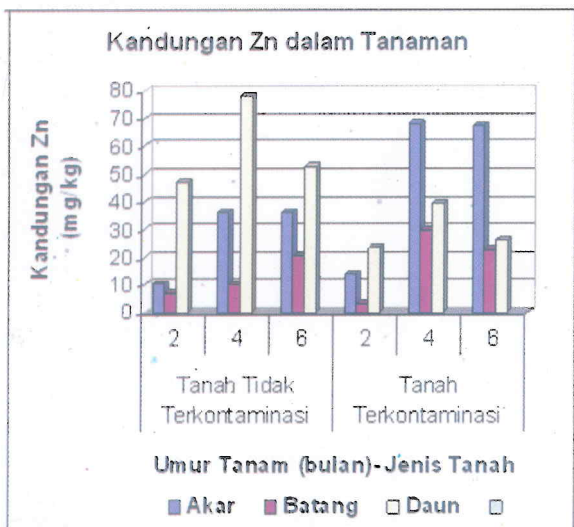


Gambar 4. Pengaruh umur tanam dan jenis tanah terhadap penyerapan Cu dalam tanaman

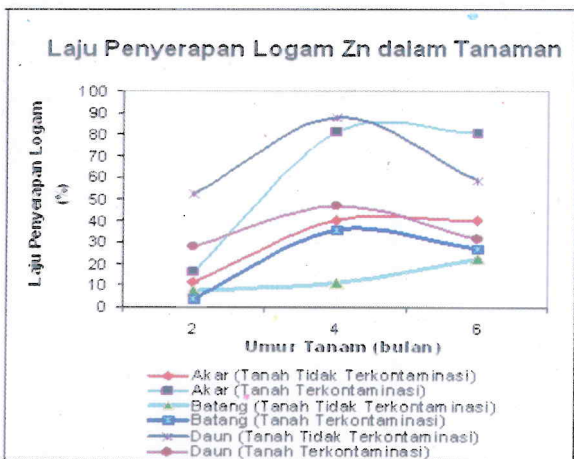
Menurut EPA (2000) terdapat beberapa tanaman yang bersifat akumulator terhadap logam Cu, yaitu tanaman *Amaranth* (= bayam liar) bersifat akumulator logam Cu pada konsentrasi 4,9-12 mg/kg, tanaman *Bent grass* (kelompok rumput-rumputan) pada konsentrasi 7,5-71 mg/kg, tanaman *Pennycress* (kelompok tanaman hortikultur) pada konsentrasi 1,6-16 mg/kg, dan tanaman *Willow* (*Salix viminalis* = jenis pohon) pada konsentrasi 3,7-19 mg/kg, sedangkan tanaman *Indian Mustard* (*Brassica juncea* = jenis kubis) pada konsentrasi 3,0-54 mg/kg.

Berbeda dengan logam Zn, mula-mula penyerapan logam Zn oleh akar tanaman pada umur tanam 2 bulan sebesar 13,8 mg/kg, selanjutnya terjadi penurunan kadar logam setelah ditranslokasi ke bagian batang, yaitu menjadi 3,3 mg/kg dan sampai ke bagian daun hampir tetap 3,45 mg/kg. Kecenderungan yang sama pada umur

tanam bulan ke 4 dan bulan ke 6. Penyerapan logam Zn pada umur tanam bulan ke 4 dan ke 6 relatif tetap, baik pada tanah tidak terkontaminasi maupun tanah terkontaminasi. Laju penyerapan logam Zn kedalam akar 81,1%, dalam batang 35,5% dan dalam daun 46,9%. Hal ini menunjukkan bahwa kandungan Zn yang tinggi dalam tanah dan akumulasi di bagian tanaman masih dapat di toleransi oleh tanaman. Nilai batas keracunan unsur logam Zn bagi tanaman sekitar 150-200 mg/kg (Notohadiprawiro, 2006). Penyerapan Zn dalam tanah tidak terkontaminasi dan tanah terkontaminasi oleh tanaman jarak dapat dilihat pada Gambar 5 dan 6. Dari hasil evaluasi menunjukkan bahwa tanaman jarak pagar mempunyai kemampuan menyerap dan mengakumulasi logam Zn lebih tinggi dibandingkan dengan logam Cu. Menurut Sumadi (2007) bahwa penyerapan Cu dihambat kuat oleh penyerapan Zn dan sebaliknya.



Gambar 5. Pengaruh umur tanam terhadap kandungan Zn dalam tanaman



Gambar 6. Pengaruh umur tanam dan jenis tanah terhadap penyerapan Zn dalam tanaman

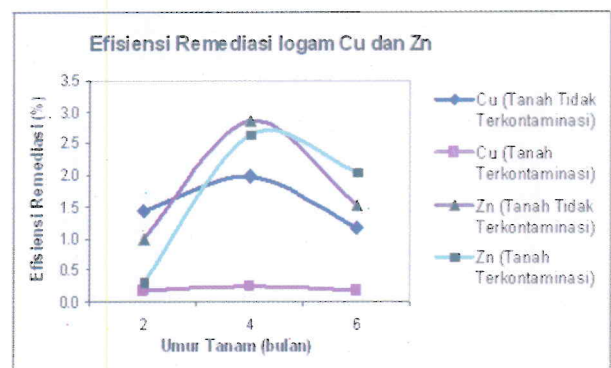
Efisiensi remediasi atau pemulihan

Hasil perhitungan efisiensi remediasi logam oleh tanaman jarak pagar dapat dilihat pada Tabel 8.

Dari data Tabel 8 efisiensi remediasi logam oleh tanaman jarak pagar menunjukkan bahwa efisiensi remediasi total Cu dan Zn pada tanah tidak terkontaminasi lebih tinggi dibandingkan dengan pada tanah terkontaminasi, kecenderungan tersebut dapat dilihat pada Gambar 7.

Tabel 8 . Efisiensi remediasi logam oleh tanaman, %

Parameter	Tanah tidak terkontaminasi			Tanah terkontaminasi		
	Umur Tanam			Umur Tanam		
	2	4	6	2	4	6
Logam Cu	1,43	1,98	1,16	0,18	0,24	0,17
Logam Zn	1,00	2,86	1,51	0,31	2,65	2,05



Gambar 7. Pengaruh umur tanam dan jenis tanah terhadap efisiensi remediasi

Efisiensi remediasi logam Zn tertinggi pada umur tanam 4 bulan, yaitu sebesar 2,86% (pada tanah tidak terkontaminasi), dan sebesar 2,65%. (pada tanah terkontaminasi). Berbeda dengan logam Cu efisiensi remediasi tertinggi hanya sebesar 1,98% (pada tanah tidak terkontaminasi), sedangkan pada tanah terkontaminasi hanya 0,24%.

Pada umur tanam 6 bulan terjadi penurunan, hal ini diduga karena akumulasi logam berat pada tanaman sudah memberikan efek racun sehingga banyak mengalami kerusakan dan tidak terhitung kandungan logamnya pada saat pengamatan. Namun tujuan dari penelitian adalah memulihkan tanah yang terkontaminasi, sehingga perlu peninjauan terhadap kandungan logam dalam tanah setelah dilakukan fitoremediasi.

Secara keseluruhan bahwa tanaman jarak pagar mempunyai kemampuan menyerap dan mengakumulasi logam Zn lebih tinggi dibandingkan dengan logam Cu. Hal ini ditunjukkan dengan rendahnya ketersediaan Cu dalam tanah yang dapat diserap oleh tanaman yaitu sebesar 23,06% dari total Cu (dalam fraksi bukan residu), sedangkan Zn ketersediaannya dalam tanah yang dapat diserap oleh tanaman cukup besar yaitu sebesar 41,14%. Menurut Ebbs (1998) tanaman barley dapat mengakumulasi logam Zn > 2 mg Zn/tanaman, bahkan tanaman indian mustard (B. *Juncea*) 2 – 4 kalinya lebih besar.

Logam Cu merupakan unsur hara mikro yang diperlukan tanaman, namun dalam jumlah yang berlebih akan beracun. Menurut Alloway (1995) batasan lebih dari 1,5-4,5 mg/kg merusak atau membunuh pertumbuhan akar tanaman, sehingga kadar tersebut akan menghambat pertumbuhan tanaman jarak. Pada penelitian ini umur tanam 4 bulan logam Cu terakumulasi di akar sebesar 9,53 mg/kg sehingga diduga sudah ada gejala hambatan dalam pertumbuhan tanaman jarak.

Salah satu upaya yang dilakukan untuk mengatasi kendala tersebut adalah dengan penambahan *chelating agent* ethylenediaminetetraacetic atau EDTA pada media terkontaminasi logam Cu untuk meningkatkan akumulasinya oleh tanaman.

Kandungan logam dalam tanah setelah fitoremediasi

Kandungan Zn dan Cu dalam tanah setelah percobaan fitoremediasi dalam tanah tidak terkontaminasi dan tanah terkonta-

minasi, seperti yang terlihat pada Tabel 9 dan 10. Data analisis menunjukkan bahwa terdapat penurunan kandungan logam Cu dan Zn dalam tanah setelah percobaan fitoremediasi, hal ini karena sebagian logam terbawa atau terakumulasi dalam bagian tanaman (akar, batang dan daun).

Dari data Tabel 10 menunjukkan bahwa kemampuan tanaman jarak dalam menyerap logam Cu meningkat seiring dengan umur tanam. Hal ini ditunjukkan dengan membandingkan selisih nilai kandungan logam Cu dalam tanah tidak terkontaminasi dengan tanah terkontaminasi setelah fitoremediasi, seperti yang terlihat pada Tabel 11, yaitu sebesar - 4,31 (pada umur tanam 2 bulan), meningkat sebesar 6,34 (pada umur tanam 4 bulan), dan meningkat lagi menjadi sebesar 2,78 (pada umur tanam 6 bulan). Penelitian hanya dilakukan hanya sampai 6 bulan, padahal umur panen jarak produksinya akan stabil setelah berumur lebih dari 5 tahun, berarti ada kemungkinan kadar logam dalam tanah terkontaminasi makin rendah sampai memenuhi persyaratan maksimal tanah tidak berbahaya, yaitu sebesar 2,0 mg/kg menurut AMEG.

Berbeda dengan logam Zn kemampuan tanaman jarak dalam menyerap logam Zn terbatas pada umur tanam setelah 4 bulan sudah menunjukkan nilai negatif, hal

Tabel 9. Kandungan logam dalam tanah setelah fitoremediasi, mg/kg

Umur Tanam	Tanah Tidak Terkontaminasi		Tanah Terkontaminasi	
	Logam Cu	Logam Zn	Logam Cu	Logam Zn
0 bulan (awal)	32,1	89,5	65,9	83,7
2 bulan	27,4	52,8	59,1	57,4
4 bulan	22,9	47,9	43,3	32,6
6 bulan	16,3	13,7	23,3	21,2

Tabel 10. Efisiensi penurunan kandungan logam dalam tanah setelah fitoremediasi, %

Umur Tanam	Tanah Tidak Terkontaminasi		Tanah Terkontaminasi	
	Logam Cu (%)	Logam Zn (%)	Logam Cu (%)	Logam Zn (%)
2 bulan	14,6	40,9	10,3	31,4
4 bulan	28,6	50,3	37,1	74,6
6 bulan	49,5	80,7	73,0	78,2

Tabel 11 . Kemampuan tanaman jarak dalam pemulihan logam dalam tanah terkontaminasi

Umur Tanam	Logam Cu	Logam Zn
2 bulan	-4,31	-9,49
4 bulan	6,34	2,32
6 bulan	2,78	-1,50

ini ditunjukkan dari data perhitungan, yaitu sebesar - 9,49 (pada umur tanam 2 bulan), meningkat sebesar 24,32 (pada umur tanam 4 bulan), dan menurun menjadi -2,50 (pada umur tanam 6 bulan). Berarti kandungan logam Zn dalam tanah sudah rendah dan dapat memenuhi persyaratan yang ditetapkan, yaitu sebesar 4,0 mg/kg menurut AMEG.

KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan

1. Fitoremediasi menggunakan tanaman jarak (*Jatropha curcas* L) pada umur tanam 4 bulan merupakan kondisi penyerapan tertinggi untuk logam Cu dan Zn dalam tanah terkontaminasi limbah padat proses *deinking*. Makin bertambah umur tanam laju penyerapan menurun.
2. Tanaman jarak bersifat toleran terhadap logam Cu dan Zn dengan kemampuan mengakumulasi logam Cu ke dalam akar 14,5% dalam batang 2,2% dan dalam daun 7,2%, sedangkan akumulasi logam Zn kedalam akar 81,1%, dalam batang 35,5% dan dalam daun 46,9%.
3. Tanaman jarak mampu menyerap logam Zn lebih besar dibandingkan dengan logam Cu, yaitu efisiensi serapan logam Zn 2,65% dan logam Cu 0,24%. Penurunan kandungan logam dalam tanah terkontaminasi limbah padat industri kertas dengan proses *deinking* mencapai 73,0% untuk logam Cu dan 78,2% untuk Zn.

Saran

- Upaya untuk meningkatkan efisiensi penyerapan logam oleh tanaman jarak dalam tanah terkontaminasi logam Cu dan Zn dapat dilakukan dengan penambahan *chelating agent* ethylenediaminetetraacetic atau EDTA
- Fitoremediasi dapat dikembangkan dengan menggunakan tanaman hiperakumulator yang sesuai untuk meningkatkan daya akumulasi logamnya dan dipadukan dengan menerapkan teknik budidaya dengan manipulasi genetika untuk meningkatkan biomassa serta agronomi

Ucapan Terimakasih

Terimakasih penulis sampaikan kepada PT. Adiprima Suraprinta atas kesempatan

penggunaan fasilitas *greenhouse* (rumah kaca) yang ada di perusahaan untuk kepentingan penelitian ini dan kepada Bapak Prof. Yayat Dhahiyat, MSc.,Ph.D dan Drs. Dadan Sumiarsa, MS atas kerjasamanya.

DAFTAR PUSTAKA

1. R Alloway, B.J. 1995. *Heavy Metals in Soils*. 2nd ed. Published by Blackie Academic and Professional.
2. -----,2007. Search To Google *Jatropha curcas*. Melalui <http://id.wikipedia.org>. [10/24/2007]
3. -----, 2006. *Progress report* PT. Adi Prima, 2000-2005
4. -----, 2006. Kajian Alternatif Teknologi Penanganan Limbah Padat pada Industri Pulp dan Kertas. Direktorat Industri Hasil Hutan dan Perkebunan, Dirjen IAK, Departemen Perindustrian.
5. Budhi, P.; Joko, P. *Fitoremediasi sebagai Sebuah Teknologi Pemulihan Pencemaran, Khusus Logam Berat*. Melalui <http://lil.bppt.tripod.com/sublab/lflora.htm>. [8/28/2007]
6. Chaney, R.L; et al. 1997. *Phytoremediation of soil metals*. Current Opinions in Biotechnology 8:279-284.
7. Darmono.1995. *Logam Dalam Sistem Biologi Mahkluk Hidup*, Jakarta: UI - Press.
8. Ebbs, S.D.& Leon, V. Kochian. 1998. *Phytoextraction of Zinc by Oat (Avena sativa), Barley (Hordeum vulgare) and Indian Mustard (Brassica juncea)* Environmental Science & Technology, Vol.32. No. 6.
9. Gaspar, G.M. & Attila, A. 2005. *Phytoremediation study : Factors influencing heavy metal uptake of plants*. *Proceedings of the 8th Hungarian Congress on Plant physiology*.
10. Gatliff, G.E. 1996. *Phytoremediation using green plants to clean up contaminated soil, groundwater and wastewater*. Applied natural Science, Inc.
11. Ghosh, M.& Singh,S.P. 2005. *A Review on Phytoremediation of Heavy Metals and Utilization of its Byproducts*. Applied Ecology and Environmental Research 3 (1): 1 -18.
12. Gottsching, L. & Pakarinen,H.. 2000. *Recycled Fiber and Deinking*. Finland :

- Papermaking Science and Technology.
13. Hambali, E. dkk. 2006. *Jarak pagar tanaman penghasil biodiesel*. Jakarta : Penerbit Penebar Swadaya.
 14. Heddy, S. 2002. *Ekofisiologi Tanaman. Suatu Kajian kuantitatif Pertumbuhan Tanaman*. Jakarta : Penerbit PT.Raja Grafindo Persada.
 15. Herawati, S; Subiyanto. 1991. *Fisiologi Tanaman Budidaya*. Jakarta : Penerbit Universitas Indonesia.
 16. Kabala, C.; Bal Ram, S. 2001
 17. *Fractionation and Mobility of Copper, Lead and Zinc in Soil Profiles in the Vicinity of a Copper Smelter*. Journal of Environmental
 18. Kusrijadi, A. 2001. *Studi Penggunaan Biomassa Brassica Campestris L. (Sawi Putih) Pada Ekstraksi Logam Cu. Penelitian Mandiri*, UPI Bandung.
 19. Lahudin. 2007. *Aspek Unsur Makro dalam Kesuburan Tanah*. Universitas Sumatera Utara.
 20. Lakatos, G. *Heavy Metal Content of Plant Living on Contaminated sediment*, <lbewww.epfl.ch/COST837/WG4 ablisbons.html> [11/ 30/2005]
 21. Lakitan, B. 2004. *Dasar-dasar fisiologi Tumbuhan*. Jakarta : Penerbit PT. Raja Grafindo Persada.
 22. Lasat, M.M. 2003. *The Use of Plants for the Removal of Toxic Metals from Contaminated Soil*. American Association for the Advancement of Science Environmental Science and Engineering Fellow
 23. Lena, Q., M.; Gade N.R. 1997. *Chemical Fractionation of Cadmium, Copper, Nickel and Zinc in Contaminated Soils*. Journal of Environmental Quality, Volume 26, No.1. ASA, CSSA, SSSA.
 24. Lepp, N.W. 1981. *Effect of Heavy metal Pollution on Plants*. Applied Science Publishers, Volume 1.
 25. Lukman, D. & Sumaryono, 1995. *Fisiologi Tumbuhan*. Penerbit ITB, Jilid 1, 2 dan 3.
 26. Notohadiprawiro, T. 2006. *Logam Berat Dalam Pertanian*, Ilmu Tanah Universitas gajah Mada.
 27. Notodarmojo, S. 2005. *Pencemaran Tanah dan Air Tanah*. Penerbit ITB
 28. Nugroho, B. *Ekologi Mikroba pada Tanah Terkontaminasi Logam Berat*. Melalui http://www.ekologi_mikroba.html [8/28/2007].
 29. Palar, H. 1994. *Pencemaran dan Toksikologi Logam Berat*, Jakarta : Penerbit Renika Cipta.
 30. Poerwowidodo, M. 1993. *Telaah Kesuburan Tanah*. Bandung : Penerbit Angkasa.
 31. Prasad. M.N.V. 2003. *Metal hyperaccumulation in plants - Biodiversity prospecting for phytoremediation technology*. Journal of Biotechnology, Vol.6 No.3. 285 – 300.
 32. Rufus, L.1997. *Phytoremediation of Soil Metals*. Current Opinion in Biotechnology, 8 : 279-284.
 33. Winarso, S. 2005. *Kesuburan Tanah. Dasar Kesehatan dan Kualitas Tanah*. Yogyakarta : Penerbit Gava Media.
 34. Widianarko, B. 2004. *Prospek Fito-remediasi Logam Berat*, majalah Tekno Limbah, Vol. 10.