

BIOREMEDIASI LOGAM TIMBAL (Pb) DALAM TANAH TERKONTAMINASI LIMBAH *SLUDGE* INDUSTRI KERTAS PROSES *DEINKING*

Henggar Hardiani ^{a*}, Teddy Kardiansyah ^a, Susi Sugesty ^a

^a Balai Besar Pulp dan Kertas

Jl. Raya Dayeuhkolot 132 Bandung 40258 Telp. (022) 5202980 Fax. (022) 5202871

* e-mail : henggarh@yahoo.co.uk

Diterima : 2 Maret 2011, Revisi akhir : 6 Juni 2011

BIOREMEDIATION OF SOIL CONTAMINATED HEAVY METAL PB FROM *DEINKING* PROCESS *SLUDGE* WASTE IN THE PAPER INDUSTRIES

ABSTRACT

Sludge waste of deinking process as toxic and hazardous material from spesific source containing Pb metal from waste water soluble ink. According to regulation of Ministry of Environmental no.33/2009 that all the industries are mandatory to clean up contaminated soil from hazardous waste. Therefore this bioremediation research need to be conducted using consortium microbes. This research was conducted by applying variation of incubation 0 – 60 days and inoculum 5%, 10% and 15% (v/w). Key success parameter of bioremediation is transformation of metal from active to inactive phase in contaminated soil by microbial activity stated by deceases of soluble-exchangeable Pb and increases of residual Pb. The 1:1:1:1 consortium microbes of PG 65-06 (A) : PG 97-02 (B) : MR 1.12-05 (C) : A1 (D) reached an optimum condition with 10% inoculum and 40 days incubation indicated by decrease of coefficient distribution until 21% in soluble-exchangeable Pb from initial 19,36 mg/kg to 15,91 mg/kg and increase of coefficient distribution until 146% in residual Pb from initial 7,77 mg/kg to 17,00 mg/kg. Germination index value 84,3-136,7% means contaminated soil is not toxic to plants.

Key words : bioremediation, soil contaminated, deinking waste paper industries, heavy metal Pb

ABSTRAK

Limbah *sludge* proses *deinking* sebagai B3 dari sumber spesifik karena mengandung logam Pb dari tinta yang larut dalam air limbah. Menurut Kep.Men. LH no. 33/2009 semua industri wajib melakukan pemulihan lahan terkontaminasi limbah B3. Oleh karena itu perlu dilakukan penelitian bioremediasi menggunakan mikroba konsorsium. Penelitian dilakukan dengan variasi waktu inkubasi dari 0 – 60 hari dan jumlah inokulum 5%, 10%, dan 15% (v/w). Keberhasilan bioremediasi adalah mengubah logam aktif dalam tanah menjadi tidak aktif oleh aktifitas mikroba, dinyatakan dengan penurunan nilai koefisien distribusi fase tertukarkan dan peningkatan fase *residual* Pb. Mikroba konsorsium PG 65-06 (A) : PG 97-02 (B) : MR 1.12-05 (C) : A1 (D) dengan perbandingan 1:1:1:1 menghasilkan kondisi optimum untuk penambahan inokulum 10% dan waktu inkubasi 40 hari dengan penurunan koefisien distribusi fase tertukarkan Pb sebesar 21% yang semula 19,3 mg/kg menjadi 15,91 mg/kg dan peningkatan fase *residual* Pb sebesar 146% yang semula 7,77 mg/kg menjadi 17,00 mg/kg. Nilai *germination index* pada kisaran 84,3-136,7% yang berarti tanah tersebut sudah tidak bersifat toksik pada tanaman.

Kata kunci : bioremediasi, tanah terkontaminasi, limbah *deinking* industri kertas, logam berat Pb

PENDAHULUAN

Industri Kertas dengan proses *deinking* adalah salah satu industri yang menghasilkan limbah padat yang 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 tersebut mengandung logam Pb, Cr, Cu, Ni, Zn, Cd dan Hg yang berasal dari tinta yang larut dalam air limbah (Gottsching *et. al*, 2000). Masalah yang seringkali muncul pada saat ini adalah tercemarnya tanah oleh bahan berbahaya dan beracun (B3). Tanah terkontaminasi limbah proses *deinking* mengandung logam berat Cd sebesar 2,30 mg/kg ; Ni : 16,2 dan Pb : 22 mg/kg (Hardiani, 2008) cukup tinggi dibandingkan dengan persyaratan logam dalam tanah tidak berbahaya (Cd 0,08 dan Ni 0,4 mg/kg), sedangkan untuk Pb sebesar 20 mg/kg (Alloway, 1995). Mengacu kepada karakteristik tersebut bahwa kandungan logam Pb cukup besar dibandingkan dengan logam lainnya, maka penelitian dititik beratkan pada Pb. Logam Pb termasuk logam berat yang dikategori ke dalam bahan berbahaya dan beracun (B3). Jumlah logam Pb dalam tanah dapat menggambarkan kondisi tanah telah terjadi kontaminasi atau tidak terkontaminasi. Kontaminasi logam berat di lingkungan merupakan masalah, karena akumulasinya sampai pada rantai makanan dan keberadaannya di alam tidak mengalami transformasi (*persistent*), sehingga menyimpan potensi keracunan yang laten (Notodarmojo, 2005). Keberadaan logam berat dalam tanah perlu mendapatkan perhatian yang serius karena tiga hal, meliputi: 1) bersifat racun dan berpotensi karsinogenik; 2) logam dalam tanah pada umumnya bersifat *mobile* 3) mempunyai sifat akumulatif dalam tubuh manusia (Notodarmojo, 2005).

Pada tahun 90-an, penanganan dan pengelolaan limbah padat di industri kertas umumnya dibuang secara timbunan terbuka (*open dumping*) di lokasi sekitar pabrik. Menurut Peraturan Menteri Negara Lingkungan Hidup No. 33 Tahun 2009 (pasal 3) tentang Tata Cara Pemulihan Lahan Terkontaminasi Limbah Bahan Berbahaya dan Beracun menyatakan bahwa penanggungjawab usaha atau kegiatan wajib melakukan pemulihan lahan terkontaminasi limbah bahan berbahaya dan beracun yang

diakibatkan dari usaha atau kegiatannya. Oleh karena itu perlu dilaksanakan pemulihan lahan terkontaminasi limbah bahan berbahaya dan beracun. Salah satunya limbah bahan berbahaya dan beracun tersebut adalah timbal (Pb) yang dihasilkan oleh kegiatan industri kertas proses *deinking*. Logam Pb merupakan logam berat yang sangat beracun dan tidak dibutuhkan oleh manusia, sehingga bila makanan tercemar oleh logam tersebut, tubuh akan mengeluarkannya. Di dalam tubuh manusia, logam Pb bisa menghambat aktivitas enzim yang terlibat dalam pembentukan hemoglobin (Hb) dan sebagian kecil logam Pb dieksresikan lewat urin atau feses karena sebagian terikat oleh protein, sedangkan sebagian lagi terakumulasi dalam ginjal, hati, kuku, jaringan lemak, dan rambut (Widowati, 2008). Salah satu pilihan untuk mengatasi masalah kontaminasi oleh logam Pb adalah bioremediasi menggunakan mikroba (Suhendrayatna, 2001). Tindakan remediasi perlu dilakukan agar lahan yang tercemar dapat digunakan kembali untuk berbagai kegiatan secara aman.

Bioremediasi merupakan pengembangan dari bidang bioteknologi lingkungan dengan memanfaatkan proses biologi dalam mengendalikan pencemaran dan cukup menarik. Selain hemat biaya, dapat juga dilakukan secara *in situ* langsung di tempat dan prosesnya alamiah (Erman, 2006). Laju degradasi mikroba terhadap logam berat tergantung pada beberapa faktor, yaitu aktivitas mikroba, nutrisi, derajat keasaman dan faktor lingkungan (Donlon, 2006). Teknologi bioremediasi ada dua jenis, yaitu *ex-situ* dan *in situ*. *Ex-situ* adalah pengelolaan yang meliputi pemindahan secara fisik bahan-bahan yang terkontaminasi ke suatu lokasi untuk penanganan lebih lanjut (Vidali, 2001). Penggunaan bioreaktor, pengolahan lahan (*landfarming*), pengkomposan dan beberapa bentuk perlakuan fase padat lainnya adalah contoh dari teknologi *ex-situ*, sedangkan teknologi *in situ* adalah perlakuan yang langsung diterapkan pada bahan-bahan kontaminan di lokasi tercemar (Vidali, 2001).

Atas dasar uraian tersebut di atas, maka perlu dilakukan penelitian pemulihan lahan terkontaminasi logam Pb pada lokasi bekas timbunan limbah padat industri kertas proses *deinking* agar lahan yang tercemar dapat digunakan kembali untuk berbagai kegiatan secara aman.

Ruang lingkup penelitian ini meliputi karakterisasi media tanah terkontaminasi limbah *deinking* dan limbah *sludge*; pembuatan inokulum mikroba dan dilanjutkan dengan percobaan bioremediasi sistem *batch*. Seluruh kegiatan penelitian dilakukan dalam skala Laboratorium. Keberhasilan bioremediasi adalah dapat mengubah logam aktif dalam tanah terkontaminasi menjadi tidak aktif oleh aktivitas mikroba (Huang, 2005).

Dengan melaksanakan penelitian ini diharapkan agar teknologi bioremediasi yang menggunakan mikroba dapat digunakan sebagai metode pemulihan tanah terkontaminasi logam Pb dapat dijadikan sebagai alternatif pengembangan teknologi pengolahan limbah ramah lingkungan. Kemampuan mikroba tersebut dapat dijadikan sebagai informasi bagi industri pulp dan kertas untuk memecahkan permasalahan pemulihan pembuangan limbah padat yang mengandung logam Pb.

BAHAN DAN METODE

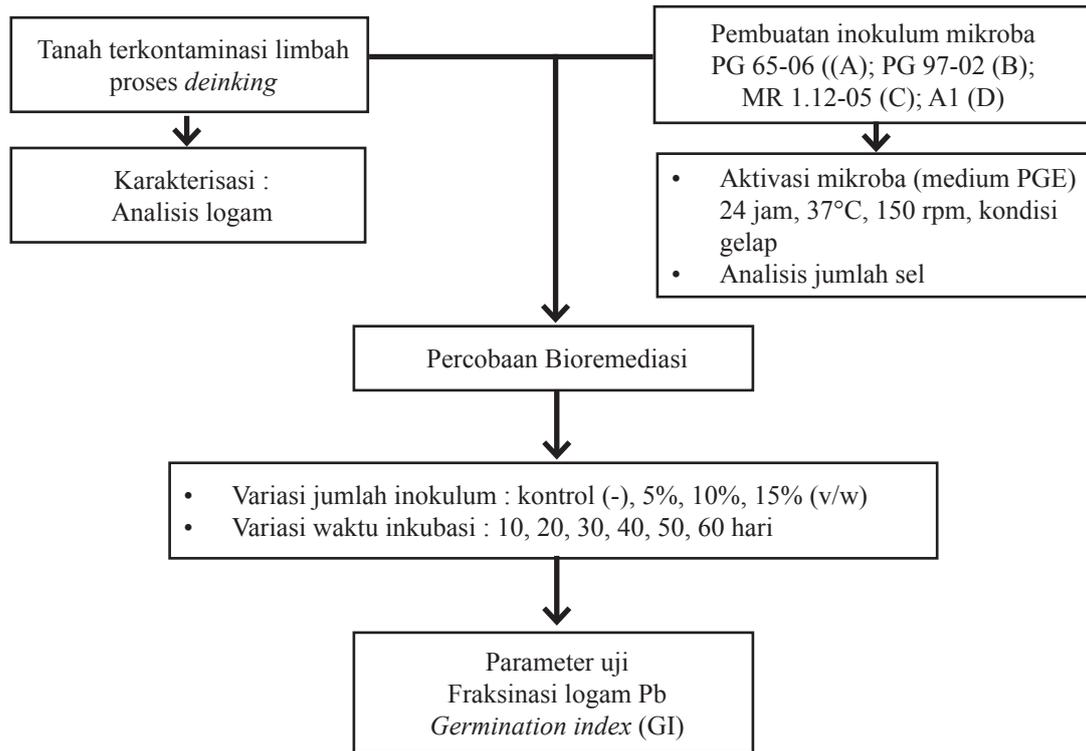
Bahan dan Alat

1. Tanah Percobaan, tanah terkontaminasi diambil dari lahan pembuangan limbah padat pabrik kertas proses *deinking* umur timbunan 3-5 tahun. Cara pengambilan contoh tanah dilakukan secara acak dengan memetak 2 x 2 m pada kedalaman sekitar 1 m. Selanjutnya dicampur dan dikeringkan secara alami, diserbuk dan disaring menggunakan saringan *nylon* 2 mm, serta di inkubasi selama 1 minggu agar tanah yang digunakan relatif stabil (Mamik, 2004).
2. Mikroba yang digunakan adalah mikroba konsorsium, campuran dari beberapa jenis bakteri pengakumulasi logam Pb yaitu PG 65-06 (A) : PG 97-02 (B); MR 1.12-05 (C) dan A1 (D) dengan perbandingan 1:1:1:1. Kultur tersebut diperoleh dari Balai Litbang Bioteknologi dan Sumberdaya Genetika Pertanian (Erny, 2003).
3. Reaktor yang digunakan dalam percobaan ini terdiri dari rangkaian reaktor skala laboratorium dengan ukuran tinggi 30 cm x diameter 10 cm, yang dilengkapi dengan CO₂ *removal trap*, tabung penangkap CO₂.

Metode

Penelitian dilakukan di laboratorium yang meliputi, karakterisasi media tanah terkontaminasi limbah *deinking* ; pembuatan inokulum mikroba dan percobaan bioremediasi. Tahapan percobaan dapat dilihat pada diagram alir penelitian Gambar 1.

1. Karakterisasi tanah terkontaminasi limbah *deinking* dan limbah *sludge*, meliputi parameter kandungan logam dalam tanah yang meliputi Cd, Cr, Cu, Pb, Ni dan Zn. Metode analisa mengacu *Standard Methods for the Examination of Water & Wastewater, APHA, 21st Edition, 2005* diukur dengan *Direct Air Acetylene Flame Method, AAS*.
2. Pembuatan inokulum mikroba. Mikroba konsorsium yang digunakan dalam penelitian dikultur pada medium Pepton glukosa ekstrak (PGE) cair, diaktivasi 3 kali dengan menggunakan medium yang sama selama 24 jam pada suhu 37°C dengan kecepatan pengadukan 150 rpm. Setiap inokulum kultur secara terpisah, satu ose biakan di inokulasi ke dalam 10 mL medium PGE, kemudian diinkubasi 1 hari dan dianalisis jumlah selnya. Inokulan campuran 2,5 mL dari masing-masing inokulan tunggal diinokulasikan ke dalam 2 liter medium PGE, kemudian diinokulasikan hingga mencapai minimum 10⁹ sel/mL (Mamik, 2004). Pembuatan inokulum hasil akhirnya adalah inokulum yang siap dipakai untuk kegiatan bioremediasi.
3. Percobaan dilakukan dengan menggunakan tanah terkontaminasi limbah kertas proses *deinking*. Sebanyak 1,5 kg tanah kering udara ditimbang dan dimasukkan ke dalam reaktor bioremediasi yang dialiri udara untuk aerasi, kemudian diinokulasi dengan suspensi mikroba campuran dan diaduk secara merata. Pengamatan terhadap kadar air dilakukan setiap 3 hari sekali dan dilakukan pengadukan. Kadar air dijaga sekitar 60%, diatur dengan menambahkan air. Percobaan dilakukan dengan variasi perlakuan jumlah inokulum : kontrol; 5; 10 dan 15% (v/w) dan waktu inkubasi : 10; 20; 30; 40; 50; dan 60 hari. Percobaan dilakukan dalam ulangan 3 kali.



Gambar 1. Diagram Alir Penelitian

4. Pengamatan parameter logam Pb meliputi : *Soluble-exchangeable, Bound to carbonates, Bound to Fe-Mn oxides, Bound to organic matter, dan Residual*, Prosedur analisis mengikuti *Sequential Extraction Procedure* (Amanda, 2010). Alat yang digunakan untuk ekstraksi adalah *shaker* dan *sentrifuse*.
5. Penentuan *Germination index* (GI) dengan menggunakan tanaman *Brassica oleracea L.* dan percobaan dilakukan dalam ulangan 3 kali (Gao *et al.*, 2010).
6. Metode evaluasi data
 - Secara statistik dengan ANAVA Uji F
 - Perhitungan koefisien distribusi (Huang, 2005)

HASIL DAN PEMBAHASAN

Karakterisasi Logam Berat

Secara umum hasil analisis total logam dalam limbah *sludge* dan tanah terkontaminasi limbah *sludge* proses *deinking* menunjukkan bahwa parameter logam Cd, Ni, Cr, Zn, Pb dan Cu cukup tinggi dibandingkan dengan persyaratan

logam dalam tanah tidak berbahaya. Hasil analisis tersebut dapat dilihat pada Tabel 1. Konsentrasi logam berat dalam tanah terkontaminasi lebih tinggi dibandingkan dengan limbah *sludge*, terutama logam Cu, Cr dan Zn, sedangkan logam Pb tidak tersedia data persyaratan menurut AMEG. Nilai tersebut melebihi nilai maksimal tanah tidak berbahaya menurut AMEG, sehingga dianggap berbahaya bagi manusia atau populasi biologis.

Meningkatnya kandungan logam dalam tanah terkontaminasi menunjukkan bahwa logam telah terkonsentrasi dalam tanah. Meningkatnya kandungan logam dalam tanah terkontaminasi ini disebabkan karena tanah terkontaminasi sudah cukup lama sekitar 3 tahun lebih, sehingga senyawa organik yang ada telah mengalami degradasi. Oleh karena itu kandungan logam yang ada dalam tanah terjadi peningkatan. Menurut Notohadiprawiro (2006) menuturkan bahwa batasan kadar beracun beberapa logam terhadap ternak, yaitu untuk logam Cr (50-3000 mg/kg); Cu (30-100 mg/kg); Pb (10-30 mg/kg) dan Zn (500 mg/kg).

Dari hasil analisis karakteristik tanah terkontaminasi menunjukkan bahwa logam Pb sebesar 63,1 mg/kg dan menurut batasan kadar

Tabel 1. Hasil Analisis Logam Berat

Parameter	Hasil Analisis (mg/kg)		Nilai maks. dalam tanah tidak berbahaya ¹ (mg/kg)
	Limbah <i>Sludge</i>	Tanah Terkontaminasi	
Kadmium (Cd)	3,8	4,9	0,08
Khrom (Cr)	15,1	57,8	10
Tembaga (Cu)	110	140	2,0
Timah (Pb)	39,0	63,1	22 ²
Nikel (Ni)	13	16	0,4
Seng (Zn)	142	234	4,0

Sumber : ¹ Menurut AMEG (*Ambient Multimedia Environmental Goal*), USA dalam Notodarmojo, 2005

² Alloway, B.J. 1995. *Heavy Metals in Soils*.

beracun yang masih bisa ditoleransi oleh hewan ternak sebesar 10-30 mg/kg, oleh karena itu perlu adanya remediasi logam Pb dalam tanah yang terkontaminasi limbah padat proses *deinking* di industri kertas.

Aktivasi Mikroba

Jumlah inokulum mikroba yang digunakan dalam percobaan bioremediasi adalah $\pm 10^9$ CFU/ml (*log cell density* 9,1). Inokulum tersebut merupakan hasil konsorsium 4 jenis bakteri yaitu PG 65-06 (A), PG 97-02 (B), MP 1.12-05 (C) dan A1 (D) dengan perbandingan 1:1:1:1 (v/v). Jumlah sel dari masing-masing bakteri dan hasil konsorsium dapat dilihat pada Gambar 2.

Inokulum tersebut merupakan hasil konsorsium 4 jenis bakteri yaitu PG 65-06 (A), PG 97-02 (B), MP 1.12-05 (C) dan A1 (D) dengan perbandingan 1:1:1:1 (v/v). Keempat bakteri tersebut digunakan dalam penelitian ini karena diketahui mampu mengakumulasi logam Pb dalam tubuhnya (Erny *et al.*, 2003). Selama percobaan tidak dilakukan variasi perbandingan bakteri yang digunakan karena hanya ingin mengetahui kemampuan keempat jenis bakteri dalam meremediasi logam Pb.

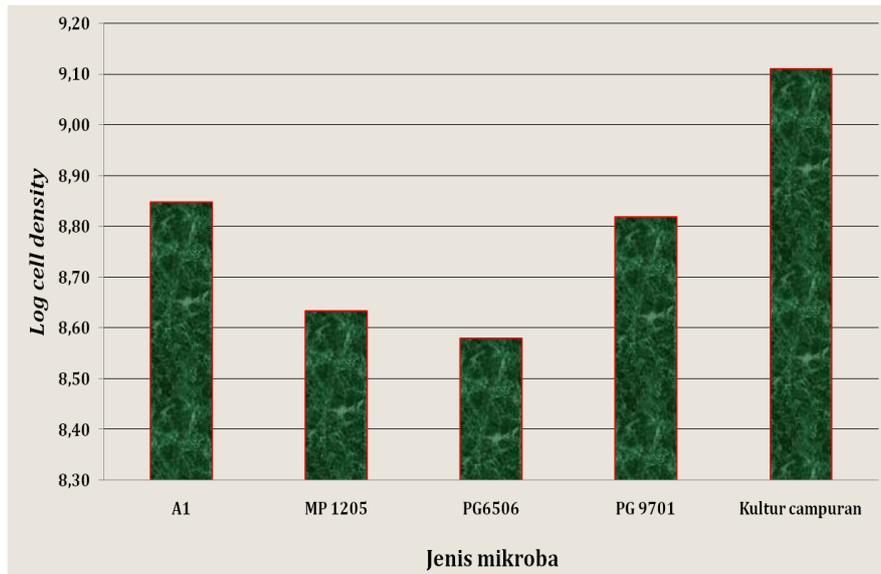
Pengaruh Penambahan Jumlah Inokulum dan Waktu Inkubasi

Proses bioremediasi tanah terkontaminasi logam Pb dari limbah padat industri kertas proses

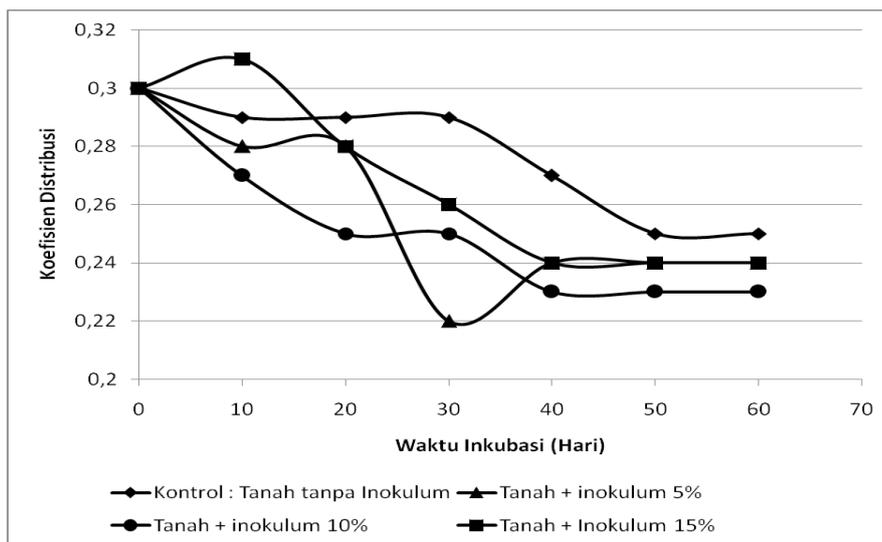
deinking telah menggunakan aktivitas mikroba sebagai sumber energi, sumber karbon atau aseptor elektron untuk metabolisme hidupnya. Masuknya bakteri pada ukuran populasi tertentu terutama bakteri yang adaptif dan resisten terhadap lahan terpolusi, dapat mengikat logam berat karena mikroba memproduksi protein permukaan yang mampu mengikat logam berat.

Keberhasilan bioremediasi adalah mengubah logam aktif dalam tanah terkontaminasi menjadi tidak aktif oleh aktivitas mikroba, dengan melalui analisis fraksinasi dengan cara ekstraksi berurutan. Hal ini ditunjukkan dengan adanya peningkatan kandungan logam dalam fase *residual* dan menurunnya kandungan logam dalam fase tertukarkan. Analisis fraksinasi dengan cara ekstraksi berurutan digunakan secara tidak langsung untuk mengkaji mobilitas potensial dan ketersediaan logam dalam tanah. Fraksi kation yang teradsorpsi pada permukaan logam Pb di dalam tanah menentukan sifat aktif maupun tidak aktif logam dalam tanah. Tujuan dari bioremediasi tanah terkontaminasi logam Pb adalah mereduksi logam Pb aktif dalam tanah menjadi tidak aktif (Huang *et al.*, 2005).

Fraksi kation yang teradsorpsi pada permukaan tanah dapat diklasifikasikan berdasarkan ikatan dengan permukaan partikel tanah yang ditentukan menurut metode ekstraksi berurutan (*Sequential Extraction*). Dalam metoda ini ada lima fraksi kation yang teradsorpsi atau terikat oleh partikel tanah, yaitu dalam bentuk tertukarkan (*Exchangeable*);



Gambar 2. Jumlah Mikroba Hasil Aktivasi yang digunakan untuk Bioremediasi



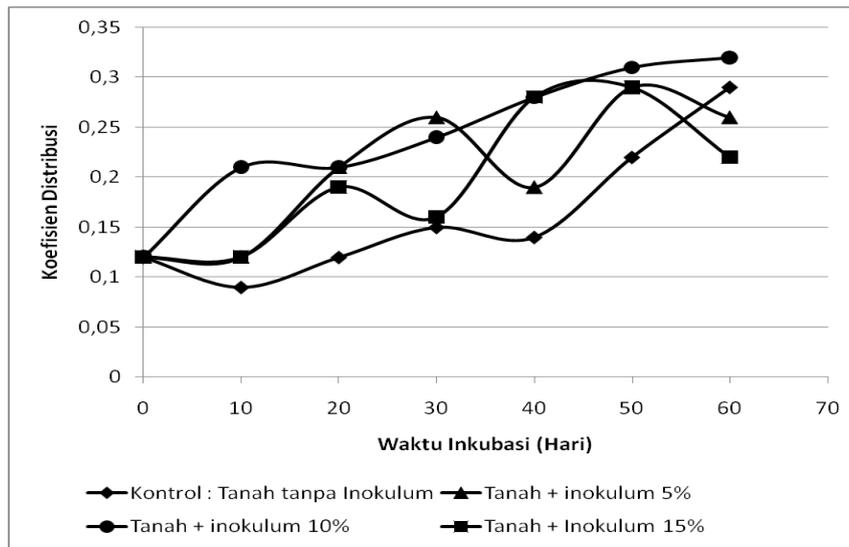
Gambar 3. Kofisien Distribusi Logam Pb dalam Fase Tertukarkan

bentuk yang berasosiasi dengan karbonat (*Bound to carbonates*); bentuk yang berasosiasi dengan oksida logam Fe dan Mn (*Bound to Fe–Mn oxides*), bentuk yang berasosiasi dengan organik (*Bound to organic matter*), dan fraksi residu (*Residual*) (Amanda, 2010).

Pengaruh jumlah inokulum (5%; 10% dan 15%) pada waktu inkubasi terhadap koefisien distribusi logam Pb dalam fase tertukarkan dapat dilihat pada Gambar 3. Koefisien distribusi untuk fase tertukarkan logam dipengaruhi oleh waktu

inkubasi dan jumlah inokulum. Hasil uji ANAVA menunjukkan bahwa perlakuan jumlah inokulum dan waktu inkubasi mempunyai pengaruh yang sangat nyata terhadap respon logam Pb dalam fase tertukarkan. Namun interaksi antara perlakuan jumlah inokulum dan waktu inkubasi tidak memperlihatkan pengaruh nyata terhadap respon logam Pb dalam fase tertukarkan.

Hasil uji F berdasarkan ANAVA untuk perlakuan jumlah inokulum sebesar 13,62 sedangkan nilai F tabel sebesar 3,42 (α 99%).



Gambar 4. Koefisien Distribusi Logam Pb dalam Fase *Residual*

Begitu pula untuk perlakuan waktu inkubasi uji F sebesar 14,708 sedangkan nilai F tabel sebesar 4,22 (α 99%) dan interaksinya memberikan uji F sebesar 0,874 sedangkan nilai F tabel sebesar 2,48 (α 99%).

Hasil perhitungan koefisien distribusi dari fraksi tertukarkan logam Pb pada perlakuan penambahan inokulum 10% menunjukkan kecenderungan yang baik dibandingkan dengan penambahan inokulum 5% dan 15%. Kondisi ini ditunjukkan dengan nilai koefisien distribusi yang paling rendah. Bila ditinjau dari perlakuan waktu inkubasi menunjukkan bahwa waktu inkubasi 40 hari memberikan nilai koefisien distribusi cenderung konstan.

Pola yang sama terjadi pada pengamatan terhadap fase *residual* yang dapat dilihat pada Gambar 4. Hasil uji ANAVA menunjukkan bahwa perlakuan jumlah inokulum dan waktu inkubasi mempunyai pengaruh yang sangat nyata terhadap respon logam Pb dalam fase *residual*, sedangkan interaksi antar kedua perlakuan tersebut tidak memberikan pengaruh yang nyata. Hasil uji F berdasarkan ANAVA untuk perlakuan jumlah inokulum sebesar 21,44 sedangkan nilai F tabel sebesar 3,42 (α 99%). Begitu pula untuk perlakuan waktu inkubasi sebesar 20,71 sedangkan nilai F tabel sebesar 4,22 (α 99%) dan interaksinya adalah sebesar 2,05 sedangkan nilai F tabel sebesar 2,48 (α 99%).

Hasil perhitungan koefisien distribusi dari fraksi *residual* logam Pb pada perlakuan penambahan inokulum 10% menunjukkan kecenderungan yang baik dibandingkan dengan penambahan inokulum 5% dan 15%. Tanah terkontaminasi logam Pb dapat dipulihkan dengan proses bioremediasi. Hal ini ditunjukkan dari kemampuan mikroba untuk mengubah logam, terlihat dari kandungan logam Pb dalam fase tertukarkan semula sebesar 19,36 mg/kg berkurang menjadi 15,91 mg/kg (18%). Selanjutnya ditinjau dari fase *residual* terjadi peningkatan kandungan logam Pb yang semula 7,77 mg/kg menjadi 17,00 mg/kg (118%), hal ini berarti adanya proses bioremediasi mengubah sifat logam yang semula aktif menjadi tidak aktif.

Bila dibandingkan dari penelitian Huang *et al.* (2005) menunjukkan bahwa dengan penambahan jamur *Phanerochaete chrysosporium* sebesar 2% dengan penambahan jerami (rasio 1:6) dalam waktu inkubasi 42 hari dapat mengubah logam Pb dalam fase tertukarkan semula sebesar 258,9 mg/kg berkurang menjadi 12,5 mg/kg (95%), dan dalam fase *residual* dapat meningkatkan kandungan logam Pb yang semula 8,4 mg/kg menjadi 129,6 mg/kg (1443%). Perbedaan hasil penelitian tersebut disebabkan karena berbedanya jenis mikroorganisme yang digunakan dan adanya perlakuan penambahan jerami sebagai *bulking agents*.

Pengamatan terhadap fraksi lainnya, yaitu fase terikat karbonat dan fraksi oksidasi metal (Fe dan Mn) nilainya cukup rendah dibandingkan fraksi lain. Kondisi ini menunjukkan bahwa bentuk Pb ditransfer ke dalam bentuk fraksi lain. Koefisien distribusi logam Pb dalam fase terikat karbonat dan fraksi oksidasi metal (Fe dan Mn) serta fase terikat organik dapat dilihat pada Gambar 5, 6 dan 7. Secara keseluruhan menunjukkan bahwa mikroba konsorsium yang digunakan dalam percobaan mempunyai potensi untuk meremediasi logam Pb dalam tanah yang terkontaminasi limbah *sludge* industri kertas proses *deinking*. Waktu inkubasi mempengaruhi koefisien distribusi logam Pb, selain itu jumlah inokulum juga berpengaruh. Pengamatan sampai waktu inkubasi 40 hari menunjukkan bahwa koefisien distribusi fraksi bertukarkan logam Pb menurun, hal ini menunjukkan bahwa salah satu bentuk logam Pb ditransform ke dalam bentuk fraksi lain hingga terjadi adanya perubahan logam aktif dalam tanah menjadi tidak aktif oleh aktivitas mikroba.

Kondisi optimum diperoleh pada penambahan inokulum 10% (v/w) dengan waktu inkubasi 40 hari, yang ditunjukkan oleh menurunnya koefisien distribusi sebesar 21% (dari 0,29 turun menjadi 0,23) dan meningkatnya koefisien distribusi sebesar 146% (dari 0,13 meningkat menjadi 0,32). Namun kemampuan remediasi logam Pb oleh mikroba dalam penelitian ini masih relatif rendah, untuk meningkatkan kemampuan ini perlu penelitian lebih lanjut tentang kemampuan masing-masing isolat dalam mengikat logam berat Pb sehingga diketahui peran mikroba yang mana yang sangat berperan dalam proses bioremediasi tersebut.

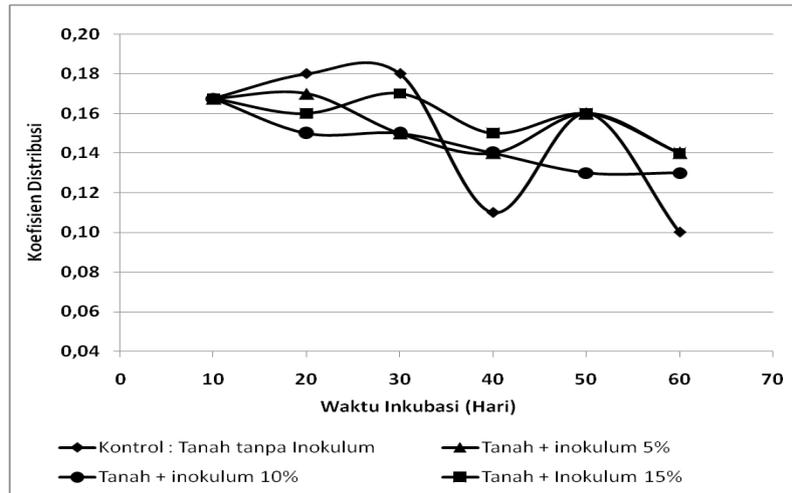
Germination Index

Germination index (GI) adalah parameter yang sangat sensitive yang digunakan untuk mengevaluasi toksisitas suatu tanaman terhadap bahan tertentu. GI dihitung dengan cara mengombinasikan kecambah biji relatif dengan perpanjangan akar relatif. Menurut Zucconi *et al.*, 1981 dalam Gao *et al.*, 2010 menyatakan jika *Germination index* di atas 80% maka tanah dapat dikatakan bebas dari senyawa yang bersifat toksik bagi tanaman.

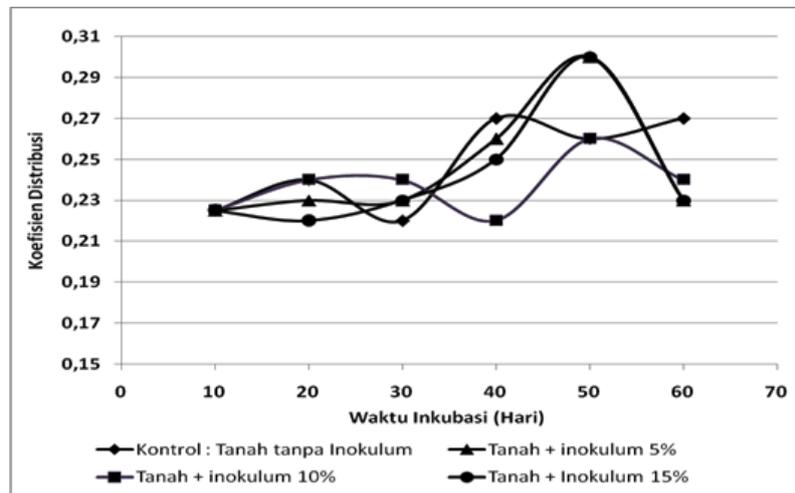
Perhitungan *germination index* dilakukan terhadap tanah yang telah diremediasi pada kondisi remediasi yang optimal, yaitu pada penambahan inokulum 10%. Hasil *Germination index* yang diperoleh dibandingkan dengan kontrol tanpa penambahan inokulum. Pengamatan menunjukkan bahwa GI dari semua perlakuan dari hari ke 10-60 menunjukkan nilai GI di atas 80% artinya tanah yang telah diremediasi tidak lagi mengandung material yang bersifat toksik pada tanaman. Nilai *germination index* dapat dilihat pada Tabel 2. Nilai GI pada perlakuan penambahan inokulum kecenderungannya semakin meningkat pada kisaran 84,3% hingga 136,7% dari waktu inkubasi 10 hari sampai dengan 60 hari, dibandingkan dengan perlakuan kontrol tanpa kecenderungannya cukup berfluktuasi pada kisaran 88,8% hingga 111,7% dari waktu inkubasi 10 hari sampai dengan 60 hari. Walaupun pada perlakuan kontrol sudah menunjukkan bahwa tanah sudah kurang toksik, akan tetapi dengan perlakuan penambahan inokulum menunjukkan bahwa tanah lebih tidak lagi mengandung material yang bersifat toksik.

Tabel 2. *Germination Index* (%)

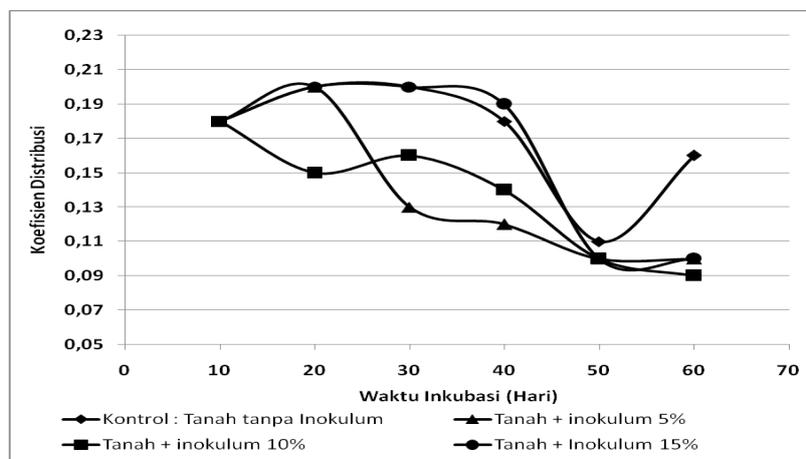
Perlakuan	Waktu Inkubasi (Hari)					
	10	20	30	40	50	60
Kontrol tanpa penambahan inokulum	88,8	104	111,7	108,4	93,1	89,5
Tanah + 10% inokulum	84,3	93,5	123,8	99,0	128,2	136,7



Gambar 5. Koefisien Distribusi Logam Pb dalam Fase Terikat Karbonat



Gambar 6. Koefisien Distribusi Logam Pb dalam Fase Terikat Fe-Mn



Gambar 7. Koefisien Distribusi Logam Pb dalam Fase Terikat Organik

KESIMPULAN

Tanah terkontaminasi logam Pb dapat dipulihkan dengan proses bioremediasi. Hal ini ditunjukkan dari kemampuan mikroba untuk mengubah logam, terlihat dari penurunan koefisien distribusi fase tertukarkan dan peningkatan fase *residual*. Kondisi optimum diperoleh pada penambahan inokulum 10% (v/w) dengan waktu inkubasi 40 hari. Mikroba konsorsium dari campuran PG 65-06 (A) : PG 97-02 (B) : MR 1.12-05 (C) dan A1 (D) dengan perbandingan 1:1:1:1 mempunyai kemampuan untuk meremediasi tanah terkontaminasi logam berat Pb dari limbah padat industri kertas proses *deinking*. Keberhasilan proses bioremediasi ditunjukkan dengan adanya penurunan logam Pb pada fase tertukarkan seiring dengan meningkatnya logam Pb pada fase residu oleh adanya aktifitas mikroba, artinya mengubah sifat logam yang semula aktif menjadi tidak aktif, terlihat dari kandungan logam Pb dalam fase tertukarkan semula sebesar 19,36 mg/kg berkurang menjadi 15,91 mg/kg dan pada fase *residual* terjadi peningkatan kandungan logam Pb yang semula 7,77 mg/kg menjadi 17,00 mg/kg atau menurunnya koefisien distribusi sebesar 21% dalam fase tertukarkan dan meningkatnya koefisien distribusi sebesar 146% dalam fase *residual*. Nilai *germination index* (GI) pada kisaran 84,3 -136,7% berarti tanah yang telah diremediasi tidak lagi mengandung material yang bersifat toksik pada tanaman.

SARAN

Untuk mengetahui peran mikroba dalam proses bioremediasi maka perlu dilakukan penelitian lebih lanjut tentang kemampuan masing-masing isolat dalam mengikat logam Pb.

UCAPAN TERIMA KASIH

Kami menyampaikan terima kasih kepada Kementerian Negara Riset dan Teknologi atas program insentifnya dan PT. Adiprima Suraprinta dalam penyediaan tanah terkontaminasi sehingga penelitian ini dapat berlangsung dengan lancar.

DAFTAR PUSTAKA

- Alloway, B.J. 1995. *Heavy Metals in Soils*. Blackie Academic and Professional, Chapman & Hall, edisi kedua.
- Amanda, J.Z; David. C.W, 2010, Heavy Metal and Trace Metal Analysis in Soil by Sequential Extraction : A Review of Procedures, *International Journal of Analytical Chemistry*, Hindawi Publishing Corporation
- Donlon, D.L. dan Bauder, J.W. *A General Essay on Bioremediation of Contaminated Soil*, <http://waterquality.montana.edu/docs/methane/Donlan.shtml> [6/06/2011]
- Erny, Y.; Dwi, N.S; Rasti, S., 2003. Koleksi, Karakterisasi dan Preservasi Mikroba Remediasi, *Prosiding Seminar Hasil Penelitian Rintisan dan Bioteknologi Tanaman*
- Erman, M. 2006. Pemanfaatan Mikroba dalam Bioremediasi suatu Teknologi Alternatif untuk Pelestarian Lingkungan. *USU Respository*
- Gao, M.; Liang, F.; Yu, A.; Li, B.; Yang, L, 2010. Evaluation of stability and maturity during forced-aeration composting of chicken manure and sawdust at different C/N ratios, Elsevier.
- Gottsching, L; Pakarinen, H, 2000. Recycled Fiber and Deinking, *Papermaking Science and Technology*, penerbit TAPPI.
- Hardiani.H. 2008 "Pemulihan Lahan Terkontaminasi Limbah B3 dari Proses Deinking Industri Kertas Secara Fitoremediasi ", *Jurnal Riset Industri*. Vol. 2. No.2. Agustus 2008, ISSN. 1978-5852, Hal. 64 – 75.
- Huang, D. L., Guang M.Z., Xiao, Y.J., Chong, L.F., Hong, Y.Y., Guo, H.H., Hong, L.L., 2005. "Bioremediation of Pb contaminated soil by incubating with *Phanerochaete chrysosporium* and straw" College of Environmental Science and Engineering, Hunan University, Changsha 410082, Hunan, China.
- Mamik, S. 2004. Pemanfaatan Bakteri Pengakumulasi Logam Berat Pb dan Cd untuk Menurunkan Kandungan Logam Berat Pada Beras Tercemar Limbah Industri, Tesis, Sekolah Pascasarjana, Institut Pertanian Bogor.

- Notodarmojo, S. 2005. *Pencemaran Tanah dan Air Tanah*. Penerbit ITB. ISBN 979-3507-43-8.
- Notohadiprawiro, T., 2006, *Logam Berat dalam Pertanian, Ilmu Tanah*, Universitas Gajah Mada.
- Suhendrayatna. 2001. Bioremoval Logam Berat dengan Menggunakan Mikroorganisme: Suatu Kajian Kepustakaan (Heavy Metal Bioremoval by Microorganisms: *A Literature Study*) *Sinergy Forum - PPI Tokyo Institute of Technology*.
- Vidali, M. 2001. *Bioremediation*. An overview. *Pure Appl. Chem.*, Vol. 73, pp. 1163-1172.
- Widowati, W.; Sastiono, A.; Jusuf, R. 2008. “*Efek Toksik Logam*” Pencegahan dan penanggulangan pencemaran. Penerbit ANDI Yogyakarta.
-