

## Fitoekstraksi Merkuri dari Tanah Tercemar Limbah Tambang Emas Skala Kecil dan Pengaruhnya pada Pertumbuhan Tanaman Jagung

*Phytoextraction of Mercury from Small-scale Gold Mine Tailing Contaminated Soils and Its Effects on Maize Growth*

Nurul Muddarisna\*)<sup>1</sup>, B.D. Krisnayanti<sup>1,2</sup> dan E. Handayanto<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Universitas Wisnuwardhana, Jl. Danau Setani No 99, Malang 65139

<sup>2</sup>Fakultas Pertanian, Universitas Mataram, Jl. Pendidikan No. 37, Mataram

<sup>3</sup>IRC-MEDMIND, Universitas Brawijaya, Jl. Veteran No1, Malang 65145, Indonesia

\*)Penulis untuk korespondensi: [nurulmuddarisna@yahoo.co.id](mailto:nurulmuddarisna@yahoo.co.id)

### ABSTRACT

In West Lombok, gold amalgamation tailings are commonly discharged to agricultural lands resulting in reduced maize yield in the area. Phytoremediation can represent a low-cost alternative to traditional techniques such as soil removal. This study was aimed to elucidate the potential of *Lindernia crustacea* (L.) F., *Paspalum conjugatum* L., and *Cyperus kyllingia* Endl., for phytoremediation of mercury-contaminated soils in conjunction with the ammonium thiosulphate to phytoextract mercury and its effect on maize growth. Each of the plant seedlings was planted in a plastic pot containing 15 kg of mercury-contaminated soil for 9 weeks. Treatments tested were three plant species, and two rates of ammonium thiosulphate application, i.e. 0 and 8 g / kg of soil. Ammonium thiosulphate was applied one week before harvesting the plants. At harvest (9 weeks) shoots and roots were analyzed for mercury concentration. The remaining soils in the pots were used to grow maize for 8 weeks. The results showed that on average, the addition of ammonium thiosulphate increased the accumulation of mercury in plant shoots and roots by 82% and 47%, respectively, compared to the media without addition of ammonium thiosulphate. In comparison to the control treatment, the average increase of dry weight of maize (shoot+root) grown on media previously remediated with three plant species with addition of ammonium thiosulphate was 40%, while that grown on media previously remediated with three plant species without addition of ammonium thiosulphate was 62%.

Keywords: Ammonium thiosulphate, gold amalgamation. phytoremediation, wild plants

### ABSTRAK

Di Lombok Barat, limbah amalgamasi emas biasanya dibuang ke lahan pertanian sehingga mengurangi hasil jagung di daerah tersebut. Fitoremediasi dapat diterapkan sebagai teknologi murah untuk memperbaiki produktivitas tanah. Penelitian ini bertujuan untuk mempelajari potensi *Lindernia crustacea* (L.) F., *Paspalum conjugatum* L., dan *Cyperus kyllingia* Endl., untuk fitoekstraksi merkuri pada tanah tercemar limbah amalgamasi emas yang mengandung merkuri. dan dampaknya terhadap jagung pertumbuhan. Bibit tanaman ditanam dalam pot plastik berisi 15 kg tanah yang tercemar merkuri selama 9 minggu. Perlakuan yang diuji adalah tiga spesies tanaman, dan dua tingkat aplikasi tiosulfat amonium, yaitu 0 dan 8 g/kg tanah. Amonium tiosulfat diaplikasikan satu minggu sebelum panen tanaman. Pada panen (9 minggu) tajuk dan akar dianalisis untuk konsentrasi merkuri. Tanah yang tersisa di pot yang digunakan untuk menanam jagung selama 8 minggu. Hasil penelitian menunjukkan bahwa rata-rata, aplikasi amonium tiosulfat fmasing-masing, dibandingkan dengan media tanpa penambahan amonium tiosulfat. Dibandingkan dengan perlakuan kontrol, kenaikan rata-rata berat

kering jagung (tajuk+akar) tumbuh pada media yang sebelumnya diremediasi dengan tiga spesies tanaman dengan aplikasi amonium tiosulfat adalah 40%, sedangkan yang ditanam pada media yang sebelumnya diremediasi dengan tiga spesies tanaman tanpa aplikasi amonium tiosulfat adalah 62%.

Kata kunci: Amalgamasi emas, amonium tiosulfat, fitoremediasi, tanaman liar

## PENDAHULUAN

Indonesia dikenal sebagai Negara yang banyak dijumpai pertambangan emas skala kecil (PESK). Aspinall (2001) melaporkan bahwa ada 713 lokasi pertambangan skala kecil di seluruh Indonesia, termasuk di Lombok Barat. Penambang umumnya menggunakan metode amalgamasi merkuri karena dianggap efisien dan hanya membutuhkan investasi kecil. Meskipun demikian efisiensi amalgamasi merkuri diragukan karena kemampuan merkuri untuk mengikat emas dari bijih sangat tergantung pada ukuran dan geokimia dari partikel emas (Viega et al. 2006). Hasil penelitian yang telah dilakukan di lokasi PESK di Filipina menunjukkan bahwa emas yang diperoleh dari amalgamasi hanya 10% (Hylander et al. 2007). Sebagian merkuri juga ada yang tercecer ke lingkungan melalui pembuangan air yang digunakan dalam proses penggelondongan, dan limbah amalgamasi. Di Lombok Barat pembuangan limbah amalgamasi emas ke lahan pertanian memberikan dampak negatif pada pertumbuhan dan tanaman jagung sebagai tanaman pangan utama di daerah tersebut. Klorosis adalah gejala utama dari toksisitas merkuri pada tanaman. Oleh karena itu, diperlukan teknik remediasi tanah tercemar logam berat yang mencemari lahan pertanian (Wuana dan Okieimen 2011).

Selama sepuluh tahun terakhir, telah banyak penelitian tentang penggunaan terjadi vegetasi untuk remediasi tanah yang tercemar logam berat. Teknik dikenal fitoremediasi tersebut, merupakan alternatif teknologi yang lebih murah dibandingkan dengan teknik tradisional seperti pembuangan dan penimbunan tanah (Fasani 2012). Di antara berbagai teknologi fitoremediasi, teknik fitoekstraksi paling banyak diterapkan untuk remediasi tanah

tercemar logam berat. Pemanenan dan pembuangan biomasa tanaman dapat menyingkirkan logam dari tanah (Banuelos dan Dhillon 2011; Pedron et al. 2011). Muddarisna et al. (2013) melaporkan bahwa dari enam spesies tanaman liar yang dievaluasi potensinya fitoremediasi ada tiga spesies, yaitu *Lindernia crustacea* (L.) F., *Paspalum conjugatum* L., dan *Cyperus kyllingia* Endl., yang potensial untuk fitoekstraksi Hg karena efisien menyerap dan mentranslokasi merkuri dari akar ke tajuk.

Keberhasilan fitoekstraksi tergantung pada ketersediaan logam dalam tanah untuk penyerapan oleh tanaman (Lin et al. 2010). Sebagai contoh, Hg yang kebanyakan ditemukan di tanah dalam bentuk kompleks memiliki keterbatasan kelarutan dalam tanah (Baya and Van Heyst 2010), sehingga akar sulit untuk bias diserap tanaman. Oleh karena itu, penyerapan Hg oleh tanaman akan tergantung pada kemampuan tanaman untuk mengendalikan proses yang dapat meningkatkan konsentrasi Hg dalam larutan tanah (Lomonte et al. 2010). Partisi Hg dari fase padat ke dalam larutan tanah dapat terjadi sebagai akibat dari reaksi koordinatif dimana ion Hg dipertukarkan dengan molekul air untuk beberapa ligan (Bhargava et al. 2012). Merkuri akan mengendap sebagai cinnabar larut (HgS) oleh adanya sulfida logam lainnya atau kelompok sulfhydryl (Slowey 2010). Afinitas Hg yang kuat terhadap bahan organik yang mempengaruhi spesiasi Hg fase padat merupakan sebagai salah satu sebab kekuatan Hg diserap oleh partikel tanah (Hooda 2010). Penelitian ini bertujuan untuk mempelajari potensi tiga spesies tumbuhan liar untuk fitoremediasi tanah tercemar merkuri dalam hubungannya dengan tiosulfat untuk fitoekstraksi merkuri

dan dampaknya terhadap pertumbuhan tanaman jagung.

## BAHAN DAN METODE

Penelitian dilakukan di lahan pertanian yang tercemar limbah amalgamasi emas terkontaminasi limbah amalgamasi emas dari kegiatan pertambangan emas skala kecil di Kecamatan Sekotong Kabupaten Lombok Barat (1150,46 ' - 1.160,20' BT dan 80,25 ' - 80,55' LS), dari bulan Juli hingga Desember 2012. Sampel tanah yang terkontaminasi dengan limbah amalgamasi emas diambil pada kedalaman 0-30 cm. Sampel tanah dan limbah amalgamasi kemudiasn di kerin udarakan pada suhu kamar selama dua minggu, ditumbuh dan diayak lolos ayakan 2 mm. Analisis dasar meliputi tekstur, pH, N, P, C organik dan Hg. Hasil analisis sampel tanah menunjukkan karakteristik tanah sebagai berikut: tekstur lempung berpasir, pH 7,1, 1,3% C organik, 0,2% N, 20,5 mg P/kg, dan 88,9 mg Hg/ kg. Konsentrasi merkuri dalam tanah jauh lebih tinggi dari ambang batas merkuri 0,002 mg/kg berdasarkan Kementerian Lingkungan Hidup. *Lindernia crustacea* L., *Paspalum conjugatum* L., dan *Cyperus kyllingia* Endl., yang digunakan untuk penelitian adalah bibit yang sudah diaklimatisasi dua minggu yang diperoleh dari lokasi di sekitar proses amalgamasi emas di Kecamatan Sekotong, Kabupaten Lombok Barat.

### Percobaan 1: Fitoekstraksi Merkuri

Tiga bibit masing-masing tumbuhan ditanam dalam pot plastik berisi 15 kg tanah tercemar limbah amalgamasi emas selama 9 minggu. Perlakuan yang diuji adalah spesies tumbuhan (tiga spesies), dan dosis aplikasi amonium tiosulfat (0 dan 8 g amonium tiosulfat/kg tanah) (Wang *et al.* 2012). Untuk memastikan pertumbuhan, semua pot diberi pupuk dasar 100 kg N/ha, 50 kg P/ha dan 20 kg K/ha. Ammonium tiosulfat ( $[\text{NH}_4]_2\text{S}_2\text{O}_3$ ) diaplikasikan pada 8 minggu setelah tanam. Enam perlakuan (kombinasi dari tiga spesies tumbuhan dan dua dosis aplikasi ammonium tiosulfat

disusun dalam rancangan acak kelompok dengan tiga ulangan. Selama percobaan berlangsung, air secara teratur dipasok untuk memastikan bahwa air tidak membatasi pertumbuhan. Pada saat panen (9 minggu), tajuk dan akar dipisahkan, dicuci, ditimbang dan dikeringkan dalam oven pada 40 °C selama 48 jam untuk analisis merkuri. Konsentrasi merkuri ditentukan dengan menggunakan F732-S Cold Atomic Absorption Mercury Vapor analyzer (Shanghai Huaguang Instrument Company) berdasarkan reduksi merkuri oleh stannum klorida ( $\text{SnCl}_2$ ). Analisis varian yang dilanjutkan dengan uji beda pada taraf 5% dilakukan pada data yang diperoleh.

### Percobaan 2: Pertumbuhan dan Biomasa Tanaman Jagung

Setelah panen tumbuhan fitoekstraktor, tanah yang tersisa di pot digunakan untuk menanam jagung. Enam perlakuan yang sama dengan percobaan 1 dan satu perlakuan kontrol (tanah tercemar limbah amalgamasi tanpa fitoremediasi) disusun dalam rancangan acak kelompok dengan tiga ulangan. Setiap pot diberi pupuk dasar dengan 100kg N/ha (Urea), 50 kg P/ha (SP36), 50 kg K/ha (KCl), dan 10 kg kompos/ha. Selama percobaan berlangsung, kelembaban tanah dipertahankan pada 80% dari kapasitas lapang dengan menambahkan air secara berkala. Jagung dipanen pada periode vegetatif maksimum (70 hari). Tajuk dan akar tanaman jagung dipisahkan, dicuci, ditimbang dan dikeringkan dalam oven pada 40 °C selama 48 jam untuk analisis merkuri. Konsentrasi merkuri dalam tajuk dan akar tanaman jagung dianalisis menggunakan metode sama dengan percobaan 1. Analisis varian yang dilanjutkan dengan uji beda pada taraf 5% dilakukan pada data yang diperoleh.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

### Biomasa Tanaman Fitoekstraktor

Hasil pengujian dari tiga tanaman spesies menyarankan bahwa semua tanaman menunjukkan toleransi yang tinggi

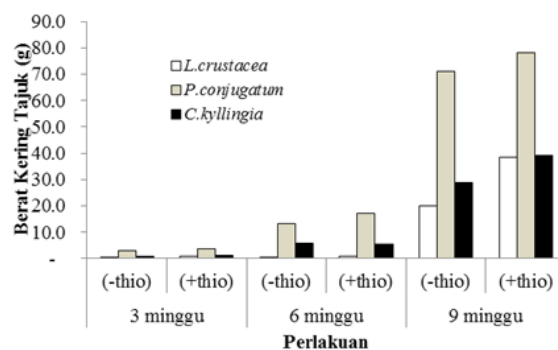
terhadap tanah yang tercemar limbah tambang emas yang mengandung merkuri. Tidak terjadi penghambatan pertumbuhan tanaman dan tidak terjadi kerusakan fisik yang menunjukkan gejala keracunan pada semua tanaman. Berat kering tajuk dan akar *P.conjugatum* tidak berbeda nyata dengan *C.kyllingia* dan *L.crustacea* (Gambar 1 dan 2). Aplikasi amonium tiosulfat berpengaruh nyata ( $p < 0,05$ ) terhadap berat kering tajuk semua tanaman, tetapi tidak berpengaruh nyata terhadap berat kering akar.

Suatu spesies tanaman untuk dapat akan diklasifikasikan sebagai kelompok akumulator logam berat harus memenuhi kriteria selain memiliki kemampuan untuk menahan konsentrasi tinggi logam dalam tanah, tingkat penyerapan dan translokasi logam dalam jaringan dengan tingkat tinggi idealnya juga memiliki potensi tinggi untuk produksi biomassa (Rascio dan Navari-Izzo, 2011). Gambar 1 dan 2 menunjukkan bahwa pada 9 minggu, *P.conjugatum* memiliki potensi tertinggi untuk memproduksi biomassa diikuti oleh *L.crustacea* dan *C.kyllingia*. Dalam hal produksi biomassa, *P. conjugatum* tampaknya merupakan spesies tanaman yang terbaik untuk fitoremediasi tanah tercemar merkuri.

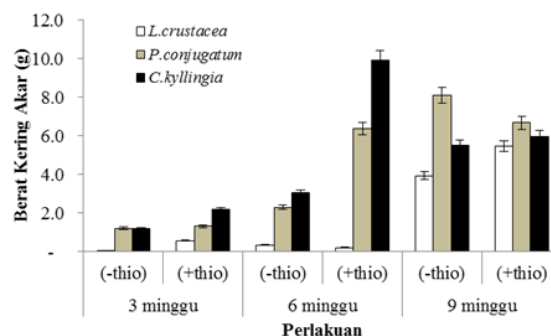
### Akumulasi Merkuri pada Tanaman

Konsentrasi tertinggi merkuri dijumpai pada *P.conjugatum* diikuti oleh *L.crustacea* dan *C.kyllingia*, baik dengan maupun tanpa aplikasi amonium tiosulfat. Aplikasi amonium tiosulfat tidak nyata meningkatkan konsentrasi Hg dalam tajuk dari semua tanaman yang diuji, tetapi nyata meningkatkan konsentrasi Hg dalam akar. Tanaman mengembangkan beberapa mekanisme yang efektif untuk mentolerir konsentrasi unsur logam yang tinggi dalam tanah (Nagajyoti et al. 2010). Tanaman akumulator tidak mencegah logam ke dalam akar, tetapi mengembangkan mekanisme khusus untuk detoksifikasi logam berat dalam tanah dengan konsentrasi tinggi dalam sel yang memungkinkan bioakumulasi logam

(Fasani 2012). Tanaman secara alami dapat mengakumulasi logam melebihi nilai ambang 1% (Zn, Mn), 0,1% (Ni, Co, Cr, Pb dan Al), 0,01% (Cd dan Se), 0,001% (Hg) atau 0,0001% (Au) dari berat biomassa kering tanpa menunjukkan gejala keracunan (Rascio dan Navari-Izzo 2011).



Gambar 1. Berat kering tajuk tiga tumbuhan lokal yang ditumbuhkan selama 9 weeks pada tanah tercemar limbah amalgamasi emas.



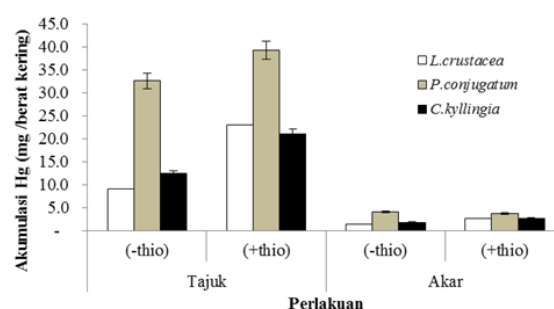
Gambar 2. Berat kering akar tiga tumbuhan lokal yang ditumbuhkan selama 9 weeks pada tanah tercemar limbah amalgamasi emas.

Hasil perhitungan konsentrasi atau akumulasi Hg dan perbandingan akumulasi Hg pada setiap spesies tanaman yang disajikan pada Gambar 3 menunjukkan perbedaan kemampuan tanaman dalam mengakumulasi Hg. Akumulasi Hg tertinggi pada *P. conjugatum*, diikuti oleh *L. crustacea* dan *C. kyllingia*. Akumulasi Hg tertinggi dalam akar dijumpai pada *L. crustacea* diikuti oleh *P. conjugatum*, dan *C. kyllingia*. Produksi biomassa yang tinggi berpengaruh pada akumulasi Hg (Hg hasil per berat kering tanaman). Aplikasi

amonium tiosulfat nyata meningkatkan akumulasi Hg pada tajuk dan akar tanaman. Tanpa aplikasi ammonium tiosulfat, akumulasi merkuri oleh tajuk *L. crustacea*, *P. conjugatum*, dan *C.kyllingia* pada umur 9 minggu berkisar dari 9,0 mg/kg (*L. crustacea*) sampai dengan 32,5 mg/kg (*P. conjugatum*). akumulasi tersebut lebih rendah ( $<p0,05$ ) daripada perlakuan amonium tiosulfat yang berkisar dari 21,0 mg/kg (*C. kyllingia*) sampai dengan 39,1 mg/kg (*P. conjugatum*) (Gambar 3). Hasil penelitian yang dilakukan sebelumnya pada tanah yang terkontaminasi dengan limbah sianidasi emas menunjukkan bahwa masing-masing dari tiga spesies tanaman tersebut mengakumulasi 9,06; 10,36; dan 15,65 mg Hg/kg (Muddarisna *et al.* 2013). Akumulasi Hg ini melebihi nilai ambang batas konsentrasi merkuri sebesar 0,001% atau 10 mg/kg dari total berat kering (Pedron *et al.* 2011). Peneliti lainnya menunjukkan bahwa terdapat hubungan antara tingkat pencemaran logam berat dalam tanah dengan penyerapan logam berat oleh tanaman (Nagajyoti *et al.* 2009). Akumulasi terjadi karena ada kecenderungan logam berat membentuk senyawa kompleks dengan senyawa anorganik yang ditemukan dalam tubuh organisme (Selin 2009). Penambahan amonium tiosulfat juga mempengaruhi akumulasi merkuri dalam akar yang berkisar dari 2,6 mg/kg (*L. crustacea*) sampai dengan 3,7 mg/kg (*P. conjugatum*) (Gambar 3). Tanpa aplikasi amonium tiosulfat akumulasi Hg dalam akar berkisar dari 1,3 mg/kg (*L. crustacea*) sampai dengan 4,0 mg/kg (*P. conjugatum*) (Gambar 3).

Rata-rata penambahan tiosulfat meningkatkan akumulasi Hg pada tajuk sebesar 82% pada sebesar 47%, dibandingkan dengan tanpa aplikasi amonium tiosulfat. Hal ini terjadi karena merkuri memiliki afinitas yang kuat dengan kelompok tiol, terutama kompleks sulfida dan bisulfida (Moreno *et al.* 2004; Selin 2009). *B. juncea* telah terbukti dapat mengakumulasi Hg sampai 40 mg/kg dalam

jaringan tanaman setelah aplikasi amonium tiosulfat dalam limbah pertambangan terkontaminasi dengan 2,8 mg Hg/kg (Moreno *et al.* 2004).



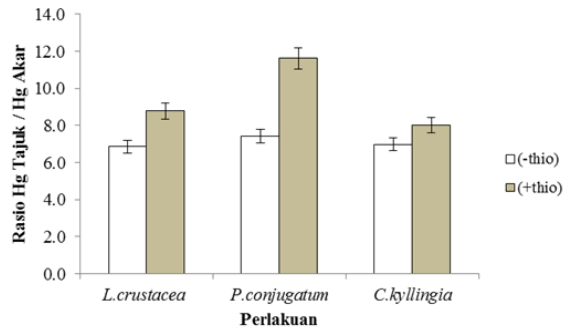
Gambar 3. Akumulasi merkuri dalam tajuk dan akar *P. conjugatum*, *L. crustacean* dan *C. kyllingia* yang ditumbuhkan selama 9 weeks pada tanah tercemar limbah amalgamasi emas.

Semua tanaman memiliki rasio Hg tajuk/akar lebih dari satu, baik untuk perlakuan amonium tiosulfat dan tanpa aplikasi ammonium tiosulfat (Gambar 4). Rasio Hg pucuk/akar *L. crustacea* dengan aplikasi amonium tiosulfat adalah yang terbesar, diikuti oleh *P. conjugatum*, dan *C. kyllingia*. Namun demikian, tanpa aplikasi amonium tiosulfat, rasio terbesar dijumpai pada *P. conjugatum* diikuti oleh *L. Crustace* dan *C. kyllingia* (Gambar 4). Perbedaan rasio Hg tajuk/akar pada semua tanaman menunjukkan perbedaan efektivitas setiap spesies tanaman dalam mengangkut merkuri dari sistem akar tajuk (sebagai tempat akumulasi) (Selin 2009).

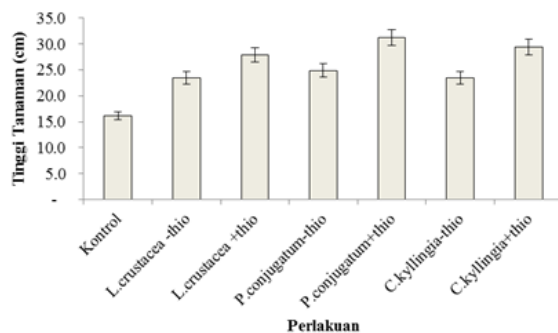
### Pertumbuhan dan Biomasa Hasil Jagung

Pada saat panen (umur 8 minggu), tinggi tanaman jagung bervariasi dari 16,13 cm (kontrol) sampai dengan 24,90 cm (perlakuan *P.conjugatum*) dalam media tanpa aplikasi amonium tiosulfat (Gambar 5). Pada media dengan aplikasi amonium tiosulfat, tinggi tanaman bervariasi dari 16,13 cm (kontrol) untuk 31,21 cm (perlakuan *P. conjugatum*) (Gambar 5). Secara keseluruhan, dibandingkan dengan perlakuan kontrol, peningkatan tinggi tanaman jagung yang ditanam pada media yang sebelumnya diremediasi dengan tiga

spesies tanaman tanpa aplikasi amonium tiosulfat adalah 75%, sedangkan yang ditanam pada media yang sebelumnya diremediasi dengan tiga spesies tanaman dengan aplikasi amonium tiosulfat adalah 83%.



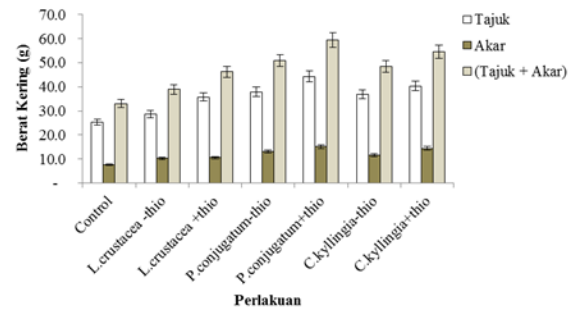
Gambar 4. Rasio akumulasi Hg dalam tajuk dan akar tiga spesies tumbuhan lokal yang ditumbuhkan selama 9 weeks pada tanah tercemar limbah amalgamasi emas.



Gambar 5. Tinggi tanaman jagung yang ditanam pada tanah pasca-fitoremediasi selama 8 minggu.

Berat kering tajuk dan akar jagung juga meningkat (dibandingkan dengan kontrol) setelah fitoremediasi tanah tercemar merkuri dengan tiga spesies tanaman. Sesuai dengan kemampuan tertinggi *P. conjugatum* dalam mengakumulasi Hg, peningkatan tertinggi berat kering tajuk dan akar tanaman jagung terjadi pada perlakuan *P. conjugatum* (Gambar 6). Rata-rata kenaikan berat kering biomasa tanaman jagung (tajuk + akar) yang ditanam pada media yang sebelumnya diremediasi dengan tiga spesies tanaman tanpa aplikasi amonium tiosulfat adalah 40%, sedangkan yang ditanam pada media yang sebelumnya diremediasi dengan tiga spesies tanaman dengan aplikasi

amonium tiosulfat ini 62%. Lebih rendahnya pertumbuhan tanaman dan produksi biomasa jagung yang ditanam pada media pasca-fitoremediasi tanpa aplikasi amonium tiosulfat dibandingkan dengan yang ditanam pada media pasca-fitoremediasi dengan aplikasi amonium tiosulfat terkait dengan penyerapan merkuri oleh tiga spesies tanaman liar (Gambar 3).



Gambar 6. Tinggi tanaman jagung yang ditanam pada tanah pasca-fitoremediasi selama 8 minggu.

Sisa merkuri dalam media tanpa tanpa aplikasi amonium sulfat lebih tinggi dibandingkan dengan sisa merkuri pada media dengan aplikasi amonium tiosulfat, sehingga menghambat pertumbuhan tanaman. Dalam tanaman tanaman, merkuri menyebabkan kerusakan enzim, polinukleotida, sistem transportasi hara dan mengganggu integritas membran sel (Nagajyoti *et al.* 2010). Perpanjangan akar sering digunakan sebagai indikasi pertama bahwa tanaman mengalami keracunan unsur Hg (Moldovan *et al.* 2013). Gejala keracunan merkuri pada umumnya adalah pertumbuhan benih dan akar yang terhambat dan terhambatnya fotosintesis, yang pada gilirannya menurunkan produksi tanaman. Selain itu merkuri yang diakumulasi dalam jaringan akar dapat menghambat serapan K oleh tanaman (Hooda 2010). Hg yang diserap oleh tanaman dapat menyebabkan tidak aktifnya beberapa enzim karena penggabungan merkuri ke dalam sulfhydryl peroksida melalui pembentukan senyawa oksigen reaktif, seperti superoksida ( $O_2^-$ ), radikal hidroksil ( $OH^-$ ) dan hidrogen peroksida ( $H_2O_2$ ) (Chen dan Yang 2012).



## KESIMPULAN

*P.conjugatum*, *C.kylingia* dan *L.crustacea* berpotensi untuk fitoremediasi tanah tercemar merkuri. Aplikasi amonium tiosulfat pada tanah yang tercemar merkuri meningkatkan akumulasi merkuri pada tanaman. Pertumbuhan dan produksi biomasa tanaman jagung yang ditanam pada tanah pasca-fitoremediasi meningkat 79% dan 51%, terutama setelah fitoremediasi dengan *P.conjugatum*.

## UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Universitas Brawijaya dan Direktorat Jenderal Pendidikan Tinggi atas dukungan dana penelitian. Ucapan terima kasih juga penulis sampaikan kepada Fakultas Pertanian, Universitas Mataram yang menyediakan fasilitas laboratorium.

## DAFTAR PUSTAKA

- Aspinall C. 2001. *Small-scale mining in Indonesia*. International Institute for Environment and Development and the World Business Council for Sustainable Development, England.
- Banuelos GS, Dhillon KS. 2011. Developing a sustainable phytomanagement strategy for excessive selenium in Western United States and India. *International Journal of Phytoremediation* 13:208-228.
- Baya AP dan Van Heyst B. 2010. Assessing the trends and effects of environmental parameters on the behaviour of mercury in the lower atmosphere over cropped land over four seasons. *Atmospheric Chemistry and Physics* 10: 8617-8628.
- Bhargava A, Carmona FF, Bhargava M, Srivastava S. 2012. Approaches for enhanced phytoextraction of heavy metals. *Journal of Environmental Management* 105: 103-120.
- Chen J, Yang ZM. 2012. Mercury toxicity, molecular response and tolerance in higher plants. *BioMetals* 25 (5):847-857.
- Fasani E. 2011. Plants that hyperaccumulate Heavy Metals. In. *Plants and Heavy Metals*. A. Furini (ed). Springer Briefs in Biometals. 55-74 p.
- Hooda PS. 2010. *Trace Elements in Soils*. Blackwell Publishing Ltd.
- Hylander LD, Plath D, Miranda CR, Lucke S, Ohlander J, Rivera ATF. 2007. Comparison of different gold recovery methods with regard to pollution control and efficiency. *Clean* 35: 52-61.
- Lin C, Zhu T, Liu T, Wang D. 2010. Influences of major nutrient elements on Pb accumulation of two crops from a Pb-contaminated soil. *Journal of Hazardous Materials* 174(1-3): 2002-2008.
- Lomonte C, Doronila AI, Gregory D, Baker AJM, Kolev SD. 2010. Phytotoxicity of biosolids and screening of selected plant species with potential for mercury phytoextraction. *Journal of Hazardous Materials* 173(1-3): 494-501.
- Moldovan OT, Meleg IN, Levei E, Terente M. 2013. A simple method for assessing biotic indicators and predicting biodiversity in the hyporheic zone of a river polluted with metals. *Ecological Indicators* 24: 412-420.
- Moreno FN, Anderson CWN, Robinson BH, Stewart RB. 2004. Phytoremediation of mercury-contaminated mine tailings by induced plant-Hg accumulation. *Environmental Practice* 6(2):165-175.
- Muddarisna N, Krisnayanti BD, Utami SR, Handayanto E. 2013. The potential of wild plants for phytoremediation of soil contaminated with mercury of gold cyanidation tailings. *Journal of Environmental Science, Toxicology and Food Technology* 4 (1):15-19.
- Nagajyoti PC, Lee KD, Sreekanth TVM. 2010. Heavy metals, occurrence and toxicity for plants: a review.

- Environmental Chemistry Letters* 8(3):199-216.
- Pedron F, Petruzzelli G, Barbafieri M, Tassi E, Ambrosini P, Patata L. 2011. Mercury mobilization in a contaminated industrial soil for phytoremediation. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 42(22):2767-2777.
- Rascio N, Navari-Izzo F. 2011. Heavy metal hyperaccumulating plants: How and why do they do it? And what makes them so interesting?. *Plant Science* 180(2):169-181.
- Selin NE. 2009. Global Biogeochemical Cycling of Mercury: A Review. *Annual Review of Environment and Resources* 34:43-63.
- Slowey AJ. 2010. Rate of formation and dissolution of mercury sulfide nanoparticles: The dual role of natural organic matter. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 74(16):4683-4708.
- Veiga MM, Maxson, PA, Hylander LD. 2006. Origin and consumption of mercury in small-scale gold mining. *Journal of Cleaner Production* 14: 436-447.
- Wang J, Feng X, Anderson CWN. 2012. Thiosulphate assisted phytoextraction of mercury (Hg) contaminated soils at the Wanshan mercury mining district, Southwest China” in *Environmental, Socio-economic, and Health Impact of Artisanal and Small-Scale Minings*. E. Handayanto, B.D. Krisnayanti and Suhartini (eds). p 67-76. Malang, Indonesia: UB Press.
- Wuana RA, Okieimen FE. 2011. Heavy metals in contaminated soils: a review of sources, chemistry, risks and best available strategies for remediation. *ISRN Ecology* 11:1-19.