

EFEKTIVITAS ISOLAT-ISOLAT MIKROB RIZOSFER TERHADAP PERTUMBUHAN SEMAI *Paraserianthes falcataria* DAN *Enterolobium cyclocarpum* DI TAILING YANG TERKONTAMINASI MERKURI

Hanna Artuti Ekamawanti dan Wiwik Ekyastuti

Fakultas Kehutanan Universitas Tanjungpura, Jalan Imam Bonjol, Pontianak

ABSTRACT

THE EFFECTIVENESS OF RHIZOSPHERE MICROBE ISOLATES ON PARASERIANTHES FALCATARIA AND ENTEROLOBIUM CYCLOCARPUM SEEDLINGS GROWTH IN MERCURY-CONTAMINATED TAILINGS. Utilization of rhizosphere microbes such as arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) and mercury-resistant bacteria (MRB) is one of the alternative technologies that can be used synergistically to overcome the main problem in biologically rehabilitation of marginal and mercury (Hg) contaminated tailings in ex gold mining area. The research was aimed to get an effective combination of AMF isolates (*Glomus* sp. SS11, *Glomus* sp. SS15, *Glomus* sp. SS18) with MRB isolates (*Bacillus* sp. HgTA1 and *Pseudomonas* HgRA) in supporting seedlings growth of sengon laut (*Paraserianthes falcataria* (L.) Nielsen) and sengon buto (*Enterolobium cyclocarpum* Griseb) in mercury-contaminated tailings. Dual inoculation of *Glomus* sp. SS15 with *Bacillus* sp. HgTA1 or *Pseudomonas* sp. HgRA isolates; dual inoculation of *Glomus* sp. SS18 with *Bacillus* sp. HgTA1 or *Pseudomonas* sp. HgRA isolates; single inoculation or dual inoculation of *Glomus* sp. SS11 with *Pseudomonas* sp. HgRA isolates were proven to be very effective in increasing *P. falcataria* seedlings height. However, only single inoculation of *Bacillus* sp. HgTA1 isolate was effective in increasing *E. cyclocarpum* seedlings height. Hg accumulation in plant tissue of *P. falcataria* and *E. cyclocarpum*, either with or without rhizosphere microbial inoculation, indicated that both plants were highly potential as Hg phytoextraction or phytostabilization agents. **Key words:** arbuscular mycorrhizal fungi, *Enterolobium cyclocarpum* Griseb, mercury, mercury-resistant bacteria, *Paraserianthes falcataria* (L.) Nielsen, tailings

PENDAHULUAN

Mengingat dampak negatif yang sangat serius berupa rendahnya kualitas lingkungan dan potensi bahaya jangka panjang akibat penambangan emas di Mandor, maka rehabilitasi areal tersebut menjadi sangat urgen untuk segera dilakukan. Kendala utama apabila rehabilitasi areal bekas penambangan emas akan dilakukan adalah rendahnya kandungan bahan organik dan unsur hara, rendahnya aktivitas mikrob tanah, dan adanya kandungan merkuri (Hg) dalam air tanah (Widiastuti dan Astiani, 2001; Ekamawanti *et al.*, 2005). Oleh karena itu, rehabilitasi secara biologi dengan memanfaatkan kerja mikrob rizosfer potensial, seperti FMA dan BRM dalam mendukung pertumbuhan tanaman di lahan yang sangat marjinal dan tercemari Hg merupakan salah satu alternatif bioteknologi yang ramah lingkungan dan mudah diaplikasikan. Selain itu, kendala rendahnya kandungan bahan organik dapat diatasi dengan menggunakan tanaman *cover crop* (*Pueraria javanica* dan *Centrosema pubescens*) dan kompos.

Mengingat adanya kandungan Hg dalam air tanah di areal bekas penambangan emas, Ekamawanti *et al.* (2006) meneliti potensi kultur campuran FMA dan satu isolat BRM (*Pseudomonas* HgTL2) dalam mendukung pertumbuhan serta toleransi dan akumulasi Hg dalam jaringan *P. falcataria*, *E. cyclocarpum*, *P. javanica* dan *C. pubescens*. Hasil penelitian

menunjukkan bahwa keempat jenis tanaman tersebut memiliki toleransi yang tinggi terhadap Hg (konsentrasi $HgCl_2$ hingga 10 ppm), baik tanpa atau dengan inokulasi mikrob rizosfer. Kultur campuran FMA selanjutnya dibuat kultur murni (monosenik) dengan teknik spora tunggal dan diperoleh 19 isolat FMA (Ekamawanti and Astiani, 2007). Dari 19 isolat tersebut terpilih tiga isolat yang untuk diuji efektivitasnya pada skala lapang, yaitu *Glomus* sp. SS11, *Glomus* sp. SS15 dan *Glomus* sp. SS18. Beberapa isolat BRM hasil isolasi dari rizosfer beberapa tumbuhan pionir yang tumbuh di areal bekas penambangan emas (Ekamawanti *et al.*, 2005) diuji efektivitasnya secara *in vitro* dan diperoleh dua isolat (*Bacillus* sp. HgTA₁ dan *Pseudomonas* HgRA) yang efektif dalam mengakumulasi Hg (Ekyastuti and Ekamawanti, 2007).

Sebelum isolat-isolat mikrob rizosfer tersebut siap digunakan dalam skala lapang secara sinergis dengan beberapa tanaman inang, penting sekali dilakukan pengujian lanjutan untuk menyeleksi isolat-isolat yang unggul dan efektif. Hal ini mengingat adanya spesifisitas FMA dengan tanaman inangnya (Bever, 2002) sehingga dapat berpengaruh pada efektivitasnya dalam memacu pertumbuhan tanaman inang yang berbeda, serta belum terujinya efektivitas dua isolat BRM secara *in vivo*. Inokulasi ganda kedua jenis mikrob rizosfer pada semai *P. falcataria* dan *E. cyclocarpum* untuk ditanam di lapang (lahan *tailing*) yang tercemari Hg merupakan teknologi hayati

yang masih baru. Tujuan penelitian ini adalah untuk mendapatkan kombinasi isolat FMA (*Glomus* sp. SS11, *Glomus* sp. SS15, *Glomus* sp. SS18) dan isolat BRM (*Bacillus* sp. HgTA₁ dan *Pseudomonas* HgRA) yang efektif dalam mendukung pertumbuhan jenis pohon legum (*P. falcata* dan *E. cyclocarpum*) di lahan *tailing* yang marjinal dan tercemari Hg.

BAHAN DAN METODE

Tempat dan Waktu

Penelitian dilaksanakan di rumah kaca dan laboratorium Silvikultur Fakultas Kehutanan Universitas Tanjungpura, dan areal bekas penambangan emas Mandor, Kabupaten Landak Kalimantan Barat. Penelitian dilaksanakan selama sembilan bulan, sejak Maret sampai dengan November 2010.

Bahan dan Alat

Benih-benih *P. falcata* dan *E. cyclocarpum*, pasir sungai steril untuk pengecambahan benih, campuran tanah bakar dan kompos untuk media semai, air suling steril, inokulum FMA (*Glomus* sp. SS11, *Glomus* sp. SS15, *Glomus* sp. SS18), isolat BRM (*Bacillus* sp. HgTA₁ dan *Pseudomonas* HgRA), media cair Canstein (Canstein dkk. 2000) steril, benih *C. pubescens* dan *P. javanica*, bahan kimia untuk pewarnaan akar.

Alat-alat yang digunakan berupa bak pengecambahan, *polybag*, cangkul, mistar untuk mengukur tinggi semai, kaliper untuk mengukur diameter, ajir, oven, mikroskop stereo dan mikroskop slide, gelas objek dan kaca penutup.

Persiapan semai di rumah kaca

Benih-benih *P. falcata* dan *E. cyclocarpum* disterilisasi dalam larutan NaOCl 5,25% selama 1 menit, dicuci dengan air suling steril tiga kali dan direndam dalam air suling hangat selama 15 menit kemudian dalam air dingin selama 1 jam. Benih-benih yang diinokulasi FMA dikecambahkan dalam bak-bak perkecambahan yang telah diisi dengan pasir sungai steril dan inokulum FMA (*Glomus* sp. SS11, *Glomus* sp. SS15, *Glomus* sp. SS18), sedangkan yang tidak diinokulasi dikecambahkan dalam bak perkecambahan yang telah diisi dengan pasir sungai steril.

Setelah terjadi infeksi awal (setelah 2 minggu), semai yang berukuran seragam disapih dalam *polybag* yang telah diisi media campuran tanah bakar dan kompos. Semai bermikoriza disapih pada media yang telah diberi inokulum FMA 5 g/*polybag* sesuai perlakuan, dan yang tidak diinokulasi diberi inokulum FMA yang sudah disterilkan 5 g/*polybag* dan filtrat inokulum FMA (500 gram inokulum FMA dicampur dengan 2 liter air suling dan disaring dengan kertas saring). Inokulasi isolat BRM (*Bacillus* sp. HgTA₁ dan *Pseudomonas* HgRA) 10 ml/*polybag* sesuai perlakuan dilakukan 2 minggu setelah semai disapih dengan cara injeksi di perakaran pada 5 titik, sedangkan yang tidak diinokulasi BRM diberi media cair Canstein (Canstein dkk. 2000) steril 10 ml/*polybag*.

Rancangan percobaan yang digunakan adalah rancangan acak lengkap. Setiap satu set penelitian (satu jenis tanaman) ada 12 perlakuan, yaitu tanpa inokulasi mikrob rizosfer, inokulasi tunggal isolat *Glomus* sp. SS11, *Glomus* sp. SS15, *Glomus* sp. SS18, *Bacillus* sp. HgTA₁, *Pseudomonas* sp. HgRA, inokulasi ganda isolat *Glomus* sp. SS11+*Bacillus* sp. HgTA₁, *Glomus* sp. SS15+*Bacillus* sp. HgTA₁, *Glomus* sp. SS18+*Bacillus* sp. HgTA₁, *Glomus* sp. SS11+*Pseudomonas* sp. HgRA, *Glomus* sp. SS15+*Pseudomonas* sp. HgRA, *Glomus* sp. SS18+*Pseudomonas* sp. HgRA. Selama 11 minggu, pemeliharaan semai dilakukan dengan pemupukan NPK sebagai *starter* untuk membantu pertumbuhan awal tanaman dan penyiraman air suling kapasitas lapang, di rumah kaca Laboratorium Silvikultur Fakultas Kehutanan Universitas Tanjungpura.

Persiapan lokasi penanaman dan penanaman semai di lapang

Lokasi penanaman di areal bekas penambangan emas Mandor, Kabupaten Landak Kalimantan Barat berupa lahan *tailing* (pasir 94,52%); dengan sifat kimia tanah yang buruk dengan pH H₂O 3,69; kandungan C-organik sangat rendah (0,32%), kandungan hara makro dan mikro sangat rendah (N total 0,05%; P tersedia 29,20 ppm; K 0,02 cmol/kg; Na 0,03 cmol/kg, Ca 0,09 cmol/kg; Mg 0,02 cmol/kg); kapasitas tukar kation dan kejenuhan basah yang sangat rendah (3,49 cmol/kg dan 4,58%). Persiapan lokasi tanam di lapangan, meliputi pemasangan ajir di lubang tanam dengan jarak 3 m x 4 m; pembuatan lubang tanam; pemberian kompos di lubang tanam 1 bulan sebelum penanaman, sehingga memberikan waktu inkubasi bagi lubang tanam tersebut sebelum ditanami; penaburan benih *C. pubescens* dan *P. javanica* (3:1) sebanyak 3 g per lubang sebagai *cover crop*.

Penanaman semai dilakukan pada lubang tanam yang telah dipersiapkan sesuai dengan perlakuan. Inokulasi FMA yang kedua dilakukan bersamaan dengan penanaman semai. Setiap perlakuan ditanam sebanyak sepuluh semai. Pemeliharaan dilakukan dengan penyiraman air setiap hari dan pemberian pupuk organik (campuran tera buster dan bioremedy) pada minggu ke-6, ke-8 dan ke-10. Tanaman dipanen pada minggu ke-12 setelah penanaman di lapang.

Variabel Pengamatan dan Analisis Data

Pengukuran tinggi (cm) dan diameter (mm) semai dilakukan selama 12 minggu sejak semai ditanam di lapang. Bobot kering akar dan tajuk (g/tan) diukur pada akhir minggu ke-12 setelah dikeringovenkan pada suhu 60°C hingga bobot konstan dengan neraca analitik.

Analisis data pertambahan tinggi, diameter, dan bobot kering tajuk dan akar dilakukan dengan bantuan program CoStat. Kadar Hg total (mg/kg) tajuk dan akar dilakukan dengan mengacu pada metode SM Ed. 20 Th. 1998 (AOAC) di laboratorium Balai Riset Standarisasi Industri Pontianak.

Pendekatan kelas efektivitas dilakukan den-

gan menggunakan pendekatan nilai tanaman kontrol (tanpa inokulasi isolat mikrob rizosfer) dan nilai tengah percobaan (rerata dari semua percobaan termasuk kontrol) sebagai standar untuk setiap variabel (modifikasi Sieverding 1991). Kelas efektivitas tersebut ditentukan dari hasil analisis ragamnya sebagai berikut: tidak efektif, bila variabel yang diuji tidak berbeda dengan kontrol; efektivitas rendah, bila variabel yang diuji berbeda nyata lebih tinggi dari kontrol, tetapi lebih rendah dari rerata percobaan; efektivitas sedang, bila variabel yang diuji berbeda nyata lebih tinggi dari kontrol, tetapi sama dengan rerata percobaan; efektivitas tinggi (sangat efektif), bila variabel yang diuji berbeda nyata lebih tinggi dari kontrol maupun rerata percobaan.

Selanjutnya, untuk mengetahui translokasi internal Hg di dalam jaringan tanaman, dilakukan dengan menghitung faktor translokasi (FT) = kadar Hg tajuk/kadar Hg akar, dan bila nilai FT < 1 berarti logam berat lebih banyak ditahan di bagian akar dari pada yang ditranslokasi ke bagian tajuk (Stoltz & Greger 2002). Penentuan kolonisasi mikoriza arbuskula (%) ditentukan dengan melakukan pewarnaan contoh akar semai dengan pewarna biru Trypan (mengacu Koske and Gemma, 1989) dan perhitungannya dengan metode *slide* (mengacu McGonigle et al., 1990).

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pertumbuhan semai *P. falcataria*

Pada Tabel 1 diketahui bahwa inokulasi ganda isolat *Glomus* sp. SS15 baik dengan *Bacillus* sp. HgTA1 maupun *Pseudomonas* sp. HgRA; inokulasi ganda isolat *Glomus* sp. SS18 baik dengan *Bacillus* sp. HgTA1 maupun *Pseudomonas* sp. HgRA; dan inokulasi ganda isolat *Glomus* sp. SS11 dengan *Pseudomonas* sp. HgRA; serta inokulasi tunggal *Glomus* sp. SS11 nyata meningkatkan pertambahan tinggi semai *P. falcataria* bila dibandingkan dengan pertambahan semai yang tidak diinokulasi mikrob rizosfer selama 12 minggu setelah penanaman di lapang.

Tabel 1. Pertambahan tinggi, diameter, bobot kering tajuk dan akar semai *P. falcataria* yang diinokulasi isolat mikrob rizosfer (umur 12 mst)

Mikrob Rizosfer	Rataan Pertambahan Tinggi* (cm)	Rataan Pertambahan Diameter* (mm)	Rataan Bobot Kering **		Kelas Efektivitas
			Tajuk (mg)	Akar (mg)	
Tanpa	7,53 f	7,5	21,23	23,6	Tidak efektif
SS11	10,93 abcde	7,4	23,33	6,87	Sangat efektif
SS15	7,97 ef	6,1	15,53	6,07	Tidak efektif
SS18	9,29 cdef	7,9	23,97	8,23	Tidak efektif
HgTA1	8,61 def	6,9	19,37	8,43	Tidak efektif
HgRA	7,70 f	6,4	18,43	7,1	Tidak efektif
SS11+ HgTA1	9,73 bcdef	6,1	17,40	8,03	Tidak efektif
SS15+ HgTA1	11,30 abcd	6,9	20,63	11,03	Sangat efektif
SS18+ HgTA1	12,79 a	8,1	36,7	12,33	Sangat efektif
SS11+ HgRA	12,06 abc	7,4	23,17	6,7	Sangat efektif
SS15+ HgRA	10,93 abcde	6,5	29,40	17,87	Sangat efektif
SS18+ HgRA	12,56 ab	7,1	25,53	14,43	Sangat efektif

Keterangan: SS11 = *Glomus* sp. SS11; SS15 = *Glomus* sp. SS15; SS18 = *Glomus* sp. SS18; HgTA1 = *Bacillus* sp. HgTA1 HgRA = *Pseudomonas* sp. HgRA. *) = Rerata dari 7 ulangan; **) = Rerata dari 3 ulangan mst = minggu setelah tanam

Berdasarkan kriteria kelas efektivitas, kelima kombinasi inokulasi ganda isolat-isolat mikrob rizosfer maupun secara tunggal (isolat *Glomus* sp. SS11) sangat efektif dalam meningkatkan pertambahan tinggi semai *P. falcataria*. Namun perlakuan inokulasi mikrob rizosfer belum mampu meningkatkan pertambahan diameter dan bobot kering semai *P. falcataria*.

Dari hasil pemeriksaan contoh akar semai *P. falcataria*, ada kecenderungan kolonisasi MA lebih meningkat bila diinokulasi ganda dengan BRM. Hal ini terjadi pada inokulasi ganda *Glomus* sp. SS11 dengan *Bacillus* sp. HgTA1 (43,3%) dibanding bila *Glomus* sp. SS11 diinokulasi tunggal (20%), dan pada inokulasi ganda *Glomus* sp. SS15 dengan *Pseudomonas* sp. HgRA (46,7%) dibanding bila *Glomus* sp. SS15 diinokulasi tunggal (23,3%). Namun, hal ini tidak terjadi pada *Glomus* sp. SS18, kolonisasi MA baik dengan atau tanpa BRM sama saja (33,3%). Dikaitkan dengan pertambahan tinggi tanaman, peningkatan kolonisasi MA tidak selalu diikuti dengan peningkatan pertambahan tinggi tanaman. Hasil penelusuran kembali BRM di perakaran semai *P. falcataria* dari lapang di akhir penelitian menunjukkan bahwa morfologi bakteri sama dengan yang diberikan sebelum inokulasi. Dengan demikian disimpulkan bahwa bakteri yang tumbuh adalah *Bacillus* sp. HgTA1 dan *Pseudomonas* sp. HgRA yang diinokulasi di awal penelitian.

Pertumbuhan semai *E. cyclocarpum*

Pada Tabel 2 diketahui bahwa pertambahan tinggi semai *E. cyclocarpum* yang diinokulasi tunggal *Bacillus* sp. HgTA1 dan *Pseudomonas* sp. HgRA berbeda nyata dibandingkan dengan pertambahan tinggi semai yang tidak diinokulasi mikrob rizosfer atau perlakuan inokulasi lainnya. Meskipun pertambahan tinggi semai yang diinokulasi tunggal *Pseudomonas* sp. HgRA berbeda tidak nyata dengan pertambahan

tinggi semai yang diinokulasi tunggal isolat *Bacillus* sp. HgTA1, isolat *Pseudomonas* sp. HgRA termasuk kelas tidak efektif. Inokulasi mikrob rizosfer, meningkatkan pertambahan diameter dan bobot kering semai *E. cyclocarpum* selama 12 minggu setelah penanaman.

Kolonisasi mikoriza arbuskula pada akar semai *E. cyclocarpum* juga mengalami peningkatan bila isolat FMA diinokulasi ganda dengan isolat BRM dibanding hanya diinokulasi tunggal. Hal ini terjadi pada *Glomus* sp. SS11 dan *Glomus* sp. SS15 yang masing-masing diinokulasi ganda dengan isolat *Pseudomonas* sp. HgRA (berturut-turut (persentase kolonisasi MA 50% dan 33,3%). Sama halnya pada *P. falcata*, hasil penelusuran kembali BRM di perakaran semai *E. cyclocarpum* menunjukkan bahwa

morfologi bakteri sama dengan yang diinokulasi di awal penelitian, yaitu *Bacillus* sp. HgTA1 dan *Pseudomonas* sp. HgRA.

Kadar Hg total tajuk dan akar semai

Hasil analisis kadar Hg pada contoh tajuk dan akar semai menunjukkan bahwa *P. falcata* mengakumulasi Hg di jaringan tanaman, baik pada semai yang diinokulasi mikrob rizosfer maupun yang tidak diinokulasi (Tabel 3). Ada kecenderungan bahwa translokasi internal Hg lebih besar ke bagian tajuk dari pada yang ditahan di akar (FT > 1) semai *P. falcata*, baik yang tidak diinokulasi maupun yang diinokulasi mikrob rizosfer. Namun, ada juga Hg yang lebih banyak ditahan di bagian akar yaitu pada semai yang diinokulasi tunggal isolat *Glomus* sp. SS11 dan

Tabel 2. Pertambahan tinggi, diameter, bobot kering tajuk dan akar semai *E. cyclocarpum* yang diinokulasi isolat mikrob rizosfer (umur 12 mst)

Mikrob Rizosfer	Rataan Pertambahan Tinggi* (cm)	Rataan Pertambahan Diameter* (mm)	Rataan Bobot Kering **)		Kelas Efektivitas
			Tajuk (mg)	Akar (mg)	
Tanpa	16,94 bc	6,44	42,57	31,07	Tidak efektif
SS11	15,20 cd	7,00	41,77	35,53	Tidak efektif
SS15	12,14 d	7,75	26,40	26,00	Tidak efektif
SS18	15,58 cd	7,06	32,37	21,30	Tidak efektif
HgTA1	21,75 a	7,13	39,97	19,40	Sangat efektif
HgRA	19,21 ab	6,65	51,4	40,87	Tidak efektif
SS11+ HgTA1	14,18 cd	6,88	28,83	24,63	Tidak efektif
SS15+ HgTA1	14,18 cd	7,25	49,23	32,93	Tidak efektif
SS18+ HgTA1	14,26 cd	7,56	29,07	16,97	Tidak efektif
SS11+ HgRA	13,34 cd	7,28	44,10	26,23	Tidak efektif
SS15+ HgRA	14,74 cd	6,30	46,40	27,40	Tidak efektif
SS18+ HgRA	15,20 cd	7,00	44,47	23,20	Tidak efektif

Keterangan: SS11 = *Glomus* sp. SS11; SS15 = *Glomus* sp. SS15; SS18 = *Glomus* sp. SS18; HgTA1 = *Bacillus* sp. HgTA1; HgRA = *Pseudomonas* sp. HgRA *) = Rerata dari 8 ulangan; **) = Rerata dari 3 ulangan mst = minggu setelah tanam

Tabel 3. Kadar Hg total tajuk dan akar semai *P. falcata* yang diinokulasi isolat mikrob rizosfer (umur 12 mst)

Mikrob Rizosfer	Kadar Hg total		Faktor Translokasi (FT)
	Tajuk (mg/kg)	Akar (mg/kg)	
Tanpa	1,111	0,948	1,172
SS11	0,493	0,786	0,672
SS15	0,029	0,951	0,030
SS18	1,065	0,579	1,839
HgTA1	0,849	0,784	1,082
HgRA	0,184	0,094	1,957
SS11+ HgTA1	0,828	0,346	2,393
SS15+ HgTA1	2,750	0,683	4,026
SS18+ HgTA1	0,687	0,561	1,225
SS11+ HgRA	1,752	1,136	1,542
SS15+ HgRA	0,370	0,921	0,402
SS18+ HgRA	1,175	0,278	4,226

Keterangan: SS11 = *Glomus* sp. SS11; SS15 = *Glomus* sp. SS15; SS18 = *Glomus* sp. SS18; HgTA1 = *Bacillus* sp. HgTA1; HgRA = *Pseudomonas* sp. HgRA mst = minggu setelah tanam

pada semai yang diinokulasi baik tunggal isolat *Glomus* sp. SS15 maupun ganda dengan isolat *Pseudomonas* sp. HgRA.

taria dari pada bila hanya inokulasi tunggal mikrob rizosfer. Sebaliknya, inokulasi ganda mikrob rizosfer belum cukup efektif dalam membantu pertambahan tinggi semai *E. cyclocarpum*. Bever (2002) membuk-

Tabel 4. Kadar Hg total tajuk dan akar semai *E. cyclocarpum* yang diinokulasi isolat mikrob rizosfer (umur 12 mst)

Mikrob Rizosfer	Kadar Hg total		Faktor Translokasi (FT)
	Tajuk (mg/kg)	Akar (mg/kg)	
Tanpa	0,427	0,935	0,457
SS11	1,127	0,137	8,226
SS15	2,101	0,413	5,087
SS18	0,291	1,559	0,251
HgTA1	0,534	0,154	3,468
HgRA	0,085	0,248	0,343
SS11+ HgTA1	0,520	0,348	1,494
SS15+ HgTA1	0,955	0,353	2,705
SS18+ HgTA1	0,174	0,128	1,359
SS11+ HgRA	0,893	0,141	6,333
SS15+ HgRA	0,725	0,494	1,468
SS18+ HgRA	1,156	0,358	3,229

Keterangan: SS11 = *Glomus* sp. SS11; SS15 = *Glomus* sp. SS15; SS18 = *Glomus* sp. SS18; HgTA1 = *Bacillus* sp. HgTA₁; HgRA = *Pseudomonas* sp. HgRA mst = minggu setelah tanam

Hasil analisis kadar Hg pada contoh tajuk dan akar semai juga menunjukkan bahwa *E. cyclocarpum* mengakumulasi Hg di jaringan tanaman (Tabel 4). Berbeda dengan *P. falcata*, translokasi internal Hg pada semai *E. cyclocarpum* yang tidak diinokulasi mikrob rizosfer cenderung lebih besar ke bagian akar ($FT < 1$). Namun, dengan inokulasi mikrob rizosfer baik secara tunggal maupun ganda, translokasi internal Hg lebih meningkat ke bagian tajuk ($FT > 1$).

Rehabilitasi secara biologi areal bekas penambangan emas yang tercemari Hg memerlukan bibit-bibit tanaman yang mampu tumbuh pada lahan yang marginal dan tercemari Hg. Bibit tanaman yang digunakan harus dapat mengatasi cekaman hara sekaligus cekaman Hg. Untuk meningkatkan kemampuan tanaman dalam menyerap unsur hara yang sangat terbatas, FMA berpotensi membantu tanaman dalam mengeksplorasi unsur hara yang ada di larutan tanah, khususnya fosfor. Toleransi tanaman terhadap Hg merupakan hal yang esensial jika perakaran tanaman menembus dan mengekstrak Hg secara efisien dari tanah yang terkontaminasi (Meagher & Heaton 2005). Hanya perakaran tanaman yang toleran Hg yang secara efisien kontak dengan substrat yang tercemari unsur ini. Penggunaan BRM diharapkan dapat mengurangi tingkat toksisitas Hg terhadap tanaman dan secara tidak langsung membantu pertumbuhan tanaman.

Pada semai *P. falcata* dan *E. cyclocarpum*, inokulasi ganda maupun inokulasi tunggal FMA dan BRM terbukti dapat meningkatkan pertambahan tinggi semai selama 12 minggu setelah semai ditanam di areal *tailing* yang tercemari Hg. Ada kecenderungan bahwa inokulasi ganda mikrob rizosfer lebih efektif memacu pertumbuhan awal semai *P. falca-*

taria bahwa jenis inang yang berbeda menyebabkan adanya variasi respon pertumbuhan tanaman yang diinokulasi FMA dan juga perkembangan FMA itu sendiri. Beberapa penelitian lain yang telah dilakukan juga membuktikan peranan FMA dalam membantu meningkatkan pertumbuhan tanaman yang diinfeksi pada media yang tercemari logam berat Pb, Cu, Cd dan Zn (Diaz dkk. 1996; Huang dkk. 2000). Pada semai *E. cyclocarpum*, inokulasi tunggal BRM terbukti efektif meningkatkan pertambahan tinggi semai. Pengaruh BRM secara tidak langsung pada pertumbuhan awal semai tanaman diduga karena BRM (seperti genus *Bacillus*, *Pseudomonas*) berperan penting dalam mereduksi Hg^{2+} menjadi Hg^0 melalui mekanisme detoksifikasi (Nakamura dkk. 1990; Andrea 2003) di lingkungan yang tercemari Hg sehingga tidak bersifat racun bagi tanaman. Hal ini menunjukkan adanya potensi mikrob rizosfer dalam membantu pertumbuhan awal semai *P. falcata* dan *E. cyclocarpum* di lahan yang marginal dan tercemari Hg, meskipun untuk variabel pertumbuhan lainnya belum menunjukkan hasil yang optimal. Bobot kering yang belum dipengaruhi oleh mikrob rizosfer yang diinokulasikan menunjukkan bahwa mikrob rizosfer tersebut belum memberikan kontribusi yang nyata pada serapan hara yang menyusun biomassa semai *P. falcata* dan *E. cyclocarpum* selama 12 minggu setelah semai ditanam di lapang.

Adanya kolonisasi MA pada perakaran semai *P. falcata* dan *E. cyclocarpum* mengindikasikan bahwa FMA yang diinokulasi dapat menginfeksi akar semai yang tumbuh di *tailing* yang tercemari merkuri. Ada kecenderungan bahwa kolonisasi MA meningkat dengan keberadaan BRM yang juga diinokulasi pada

perakaran kedua semai tersebut. Hal ini mengindikasikan adanya sinergisme antara kedua mikrob rizosfer tersebut dalam kolonisasi pada akar semai tanaman inang. Hasil penelusuran kembali isolat BRM yang diinokulasi pada perakaran semai *P. falcatoria* dan *E. cyclocarpum* di *tailing* yang tercemari Hg menunjukkan bahwa bakteri tersebut mampu bertahan hidup (tumbuh dan berkembang biak) di lingkungan yang tercemari Hg. Hal ini sangat penting artinya karena untuk dapat berperan di lingkungan, suatu mikrob harus memiliki kemampuan tumbuh dan berkembang biak.

Kemampuan tumbuh *P. falcatoria* dan *E. cyclocarpum* pada lahan *tailing* yang tercemari Hg menunjukkan adanya toleransi jenis tersebut terhadap kandungan Hg yang terdapat di air tanah di lahan *tailing*. Adanya kandungan Hg pada tajuk dan akar semai kedua jenis tanaman yang diuji menunjukkan adanya mekanisme toleransi tanaman terhadap Hg dengan menyerap dan mengakumulasi Hg di jaringan tanaman. Hg merupakan salah satu logam paling beracun bagi tanaman dan umumnya tanaman mengendapkan ion-ion yang bersifat toksik dalam kompleks di sitoplasma untuk melindungi ancaman fitotoksitasnya (Wang & Greger 2004). Menurut Meagher & Heaton (2005), mekanisme fisiologi tanaman terhadap cekaman Hg, secara garis besar meliputi: (1) toleransi tanaman; (2) aktivitas rizosfer; (3) sistem angkutan jarak pendek dan jarak jauh merkuri; (4) keadaan elektrokimia dan spesiasi kimia merkuri; (5) tangkapan kimia untuk akumulasi merkuri; dan (6) tangkapan fisik untuk akumulasi merkuri.

Translokasi internal Hg di dalam jaringan tanaman sangat ditentukan oleh interaksi antara tanaman dan mikrob tanah yang ada di rizosfer maupun yang bersimbiosis dengan tanaman. Yu dkk. (2010) yang menunjukkan bahwa inokulasi MA mengurangi ketersediaan fraksi Hg di tanah dan serapan Hg oleh akar, dan selanjutnya menyebabkan akumulasinya di jagung lebih rendah dari pada yang tidak diinokulasi MA. Hal ini berbeda dengan hasil dalam penelitian ini. Pada semai *P. falcatoria* yang tidak diinokulasi mikrob rizosfer, Hg yang diserap selanjutnya ditranslokasikan dan diakumulasi lebih banyak di tajuk dari pada di akar. Demikian juga pada semai yang diinokulasi tunggal maupun ganda dengan mikrob rizosfer, cenderung meningkatkan translokasi internal Hg dari akar ke tajuk meskipun ada beberapa isolat yang diinokulasikan menyebabkan Hg lebih banyak ditahan di akar. Pada semai *E. cyclocarpum* yang tidak diinokulasi mikrob rizosfer, Hg yang diserap lebih banyak ditranslokasikan dan ditahan di akar dari pada ke tajuk, dengan FT 0,457. Hasil ini sejalan dengan hasil penelitian Esteban dkk. (2008), bahwa tanaman dapat menyerap Hg yang diberikan di larutan hara tetapi hanya sekitar 30-40% Hg yang diakumulasi dalam tanaman, dan sekitar 0,48-0,62% Hg yang diserap kemudian ditranslokasikan ke tajuk dengan FT sekitar 0,5. Namun, pada saat semai *E. cyclocarpum* diinokulasi ganda mikrob rizosfer, Hg lebih banyak ditranslokasikan dari akar ke bagian tajuk.

Dang dkk. (2004) menyatakan bahwa jenis tanaman yang dapat mengakumulasi kadar logam berat relatif tinggi di bagian atas tanaman (batang/tajuk) menjadi kandidat yang bagus untuk agen fitoekstraksi, dan jenis tanaman yang memiliki kemampuan kuat untuk mengurangi translokasi logam berat dari akar ke tajuk layak sebagai agen fitostabilisasi untuk revegetasi tanah yang tercemari logam berat. Fitoekstraksi adalah pemanfaatan tumbuhan untuk mengangkut dan mengkonsentrasikan logam-logam dari tanah ke bagian akar dan tajuk di bagian atas tanah yang dapat dipanen (Garbisu dkk. 2002). Fitostabilisasi, yaitu menggunakan tanaman untuk menstabilkan matriks tanah dan imobilisasi pencemar dari migrasi berikutnya, dan berfungsi mencegah terjadinya erosi tanah (McIntyre 2003). Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa isolat-isolat mikrob rizosfer yang diinokulasikan pada semai *P. falcatoria* dan *E. cyclocarpum* dapat digunakan secara efektif sebagai agen hayati yang mendukung pertumbuhan tanaman di lahan *tailing* yang marjinal. Selain itu juga, isolat-isolat tersebut juga memungkinkan kedua tanaman sangat berpotensi sebagai kandidat agen fitoekstraksi dan fitostabilisasi dalam rehabilitasi areal bekas penambangan emas berupa lahan *tailing* yang tercemari Hg.

KESIMPULAN

Hingga umur semai 12 minggu setelah tanam di lapang, inokulasi ganda *Glomus* sp. SS15 baik dengan *Bacillus* sp. HgTA1 maupun *Pseudomonas* sp. HgRA; inokulasi ganda *Glomus* sp. SS18 baik dengan *Bacillus* sp. HgTA1 maupun *Pseudomonas* sp. HgRA; dan inokulasi ganda *Glomus* sp. SS11 dengan *Pseudomonas* sp. HgRA; serta inokulasi tunggal *Glomus* sp. SS11 terbukti sangat efektif dalam memacu pertumbuhan tinggi semai *P. falcatoria*. Inokulasi tunggal *Bacillus* sp. HgTA1 terbukti sangat efektif dalam memacu pertumbuhan tinggi semai *E. cyclocarpum*. Akumulasi Hg di tajuk semai *P. falcatoria* yang tidak maupun yang diinokulasi mikrob rizosfer menunjukkan tanaman berpotensi sebagai agen fitoekstraksi. Akumulasi Hg di akar semai *E. cyclocarpum* yang tidak diinokulasi mikrob rizosfer berpotensi sebagai agen fitostabilisasi dan jika diinokulasi mikrob rizosfer Hg lebih banyak diakumulasi di tajuk menunjukkan tanaman berpotensi sebagai agen fitoekstraksi di lahan *tailing* yang tercemari Hg. Implikasi dari penelitian ini adalah bahwa *P. falcatoria* dan *E. cyclocarpum* dapat digunakan bersamaan dengan aplikasi mikrob rizosfer dalam rehabilitasi secara biologis lahan *tailing* yang marjinal dan tercemari Hg.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Direktorat Penelitian dan Pengabdian Kepada Masyarakat, Direktorat Jenderal Pendidikan Tinggi Departemen Pendidikan Nasional yang telah mendanai penelitian ini, pada tahun anggaran 2010. Tulisan ini merupakan bagian dari hasil penelitian yang berjudul

“Uji Efektivitas Isolat-isolat Mikrob Rizosfer Terhadap Pertumbuhan Beberapa Jenis Tanaman di Media Tailing yang Tercemar Merkuri (Tahun ke-2)”

DAFTAR PUSTAKA

- Andrea MA, N. Cimento, E.C. Souza. 2003. Operon mer: Bacterial resistance to mercury and potential for bioremediation of contaminated environments; <http://funpecrp.com.br/gmr/year2003/vol1-2/pdf/sim0005.pdf>
- Astiani, D., H.A. Ekamawanti, E. Susanti. 2001. Studi keanekaragaman cendawan mikoriza arbuskula (CMA) pada tumbuhan pionir di areal bekas pertambangan emas kawasan hutan alam Mandor kabupaten Landak. Laporan Penelitian. Fakultas Kehutanan Universitas Tanjungpura. Pontianak.
- Astiani, D. and H.A. Ekamawanti. 2002. Studi potensi inokulum fungi Glomalean lokal dari areal bekas pertambangan emas rakyat. Laporan Penelitian. Fakultas Kehutanan Universitas Tanjungpura. Pontianak.
- Bever. 2002. Host-specificity of AM fungal population growth rates can generate feedback on plant growth. *Plant and Soil* 244 (1-2):281-290.
- Canstein, H.V., Y. Li, J. Leonhauser, E. Haase, A. Feiske, W.D. Deckwer, I.W. Dobler. 2002. Spatially oscillating activity and microbial succession of mercury-reducing biofilms in a technical-scale bioremediation system. *Appl. Environ. Microbiol.* 68: 1938-1946.
- Dang, H., Z.H. Ye, M.H. Wong. 2004. Accumulation of lead, zinc, copper and cadmium by 12 wetland plant species thriving in metal-contaminated sites in China. *Environ Pollut.* 132: 29-40.
- Diaz, G., C. Azcon-Aguilar and M. Honrubia. 1996. Influence of arbuscular mycorrhizae on heavy metal (Zn and Pb) uptake and growth of *Lygeum spartum* and *Anthyllis cytisoides*. *Plant and Soil* 180: 241-249.
- Ekamawanti, H.A. and D. Astiani. 2005. Uji kesesuaian fungi Glomalean lokal dari areal bekas pertambangan emas dengan beberapa jenis tanaman inang untuk perbanyakan inokulum. Laporan Akhir Penelitian Dosen Muda. Fakultas Kehutanan Universitas Tanjungpura. Pontianak.
- Ekamawanti, H.A., R.S. Utomo, Liwono. 2005. Restorasi terrestrial, riparian, dan perairan areal bekas penambangan emas dengan teknologi bioremediasi di kecamatan Mandor kabupaten Landak Kalimantan Barat. Laporan Akhir Penelitian Kegiatan Insentif Riset Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Fakultas Kehutanan Universitas Tanjungpura. Pontianak.
- Ekamawanti, H.A., Liwono, D. Wahyuasti. 2006. Restorasi terrestrial, riparian, dan perairan areal bekas penambangan emas dengan teknologi bioremediasi di kecamatan Mandor kabupaten Landak Kalimantan Barat (Tahun II). Laporan Akhir Penelitian Kegiatan Insentif Riset Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Fakultas Kehutanan Universitas Tanjungpura. Pontianak.
- Ekamawanti, H.A. and D. Astiani. 2007. Produksi inokulum mikoriza arbuskula indigen dari areal bekas penambangan emas dengan beberapa jenis tanaman inang. Makalah dalam Seminar Nasional Mikoriza pada Kongres Mikoriza Indonesia II. Bogor, Jawa Barat.
- Ekyastuti, W., T.R. Setyawati, Rafdinal. 2004. Pemanfaatan isolat bakteri rhizosfer untuk memperbaiki kualitas lahan bekas penambangan emas (*tailing*) di kecamatan Mandor kabupaten Pontianak dalam usaha reklamasi secara biologi. Laporan akhir Hasil Penelitian Hibah Bersaing X. Fakultas Kehutanan Universitas Tanjungpura. Pontianak.
- Ekyastuti, W. and H. Artuti. 2007. Isolasi dan efektivitas *in vitro* bakteri resisten merkuri lokal sebagai agen bioremediasi lahan bekas penambangan emas. Makalah dalam Seminar Nasional Pertemuan Ilmiah Tahunan Perhimpunan Mikrobiologi Indonesia. Banjarmasin, Kalimantan Selatan.
- Esteban, E, E. Moreno, J. Peñalosa, J.I. Cabrero, R. Millán, P. Zornoza. 2008. Short and long-term uptake of Hg in white lupin plants: kinetics and stress indicators. *Environ Exp Bot* 62:316–322.
- Garbisu, C., J. Hernandez-Allica, O. Barrutia, I. Alkorta, J.M. Becerril. 2002. Phytoremediation: a technology using green plants to remove contaminants from polluted areas. *Rev. Environ Health* 17(3):173-188.
- Huang Y., Y. Chen and S. Tao. 2000. Effect of rhizospheric environment of VA-mycorrhizal plants on forms of Cu, Zn, Pb and Cd in polluted soil. *Ying Yong Sheng Tai Xue Bao* 11(3): 431-434.
- Koske, R.E. and J.N. Gemma. 1989. A modified procedure for staining roots to detect VA mycorrhizas. *Mycol. Res.* 92 (4):486-505.
- McGonigle, T.P., M.H. Miller, D.G. Evans, G.L. Fairchild, J.A. Swan. 1990. A new method which gives objective measure of colonisation of roots by vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi. *New Phytol.* 115:495-501.
- McIntyre, T. 2003. Phytoremediation of heavy metals from soils. *Adv. Biochem. Eng. Biotechnol.* 78:97-123.
- Meagher, R.B. and A.C.P. Heaton. 2005. Strategies for the engineered phytoremediation of toxic element pollution: Mercury and arsenic. *J. Ind. Microbiol Biotechnol.* 32: 502–513
- Nakamura, S.K.M., F. Uchiyama, O. Yagi. 1990. Organomercurial-Volatilizing Bacteria in The Mercury-Polluted Sediment of Minamata Bay, Japan. *Appl. Environ. Microbiol* 50:304-305.
- Rabie, G.H. 2005. Contribution of arbuscular mycorrhizal fungus to red kidney and wheat plants tolerance grown in heavy metal-polluted soil. *African Journal of Biotechnology* 4(4): 332-345.
- Sieverding, E. 1991. Vesicular-Arbuscular Mycorrhiza Management in Tropical Agrosystems.

- Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ) GmbH, Eschborn.
- Stoltz, E., and M. Greger M. Accumulation properties of As, Cd, Cu, Pb and Zn by four wetland plant species growing on submerged mine tailings. *Environ. Exp. Bot.* 47: 271-280.
- Wang, Y. and M. Greger. 2004. Clonal differences in mercury tolerance, accumulation, and distribution in willow. *J. Environ. Qual.* 33:1779–1785.
- Widiastuti, T. and D. Astiani. 2001. Studi karakteristik tanah bekas pertambangan emas rakyat dan suksesi vegetasinya di sekitar hutan kerangas kecamatan Mandor kabupaten Landak. Laporan Penelitian Dosen Muda DIKTI. Pontianak.
- Yu, Y., S. Zhang, H. Huang. 2010. Behavior of mercury in a soil–plant system as affected by inoculation with the arbuscular mycorrhizal fungus *Glomus mosseae*. *Mycorrhiza* 20:407–414.

————— 0 —————