

PHITORHIZOREMEDIASI UNTUK LAHAN PASCA TAMBANG NIKEL



Konsentrasi logam nikel di lahan pasca tambang Sorowako mencapai konsentrasi 14.200 ppm dan menjadi faktor pembatas untuk pertumbuhan tanaman. Tanaman fitoakumulator *Canavalia ensiformis* dapat diinokulasi mikoriza arbuskula untuk mempercepat proses rehabilitasi. Tujuan penelitian adalah mengetahui tingkat infeksi akar tanaman *C. ensiformis* yang diintroduksi mikoriza arbuskula di lahan pasca tambang nikel. Mengetahui jumlah akumulasi dan konsentrasi nikel pada organ tanaman *C. ensiformis* yang diintroduksi mikoriza arbuskula. Mengetahui kemampuan *C. ensiformis* yang diintroduksi mikoriza arbuskula dalam rehabilitasi lahan pasca tambang nikel.

Penelitian disusun berdasarkan Rancangan Acak Kelompok dengan perlakuan *Acaulospora* sp, yaitu: Tanpa *Acaulospora* sp (kontrol); *Acaulospora denticulata* indiginous dan *Acaulospora tuberculata* eksoginuous. Penelitian ini diawali dengan Prapenelitian di Laboratorium Mikrobiologi Balai Penelitian dan Pengembangan Lingkungan Hidup dan Kehutanan Makassar, sedangkan penelitian aplikasi *Acaulospora* sp berlangsung di Nursery Vale Indonesia, Sorowako.

Hasil penelitian di laboratorim dan di lapangan dapat disimpulkan bahwa: *Acaulospora denticulata* indigenous dapat menginfeksi akar dan membantu pertumbuhan akar tanaman *C. ensiformis* di lahan pasca tambang nikel, selain itu juga membantu mengakumulasi logam nikel di seluruh organ tanaman, hal ini menunjukkan bahwa tanaman *C. ensiformis* yang diintroduksi *A. denticulata* indiginous mampu merehabilitasi lahan pasca tambang nikel.

UMPAR Press
Kampus II UM Parepare
Jl. Jend. Ahmad Yani Km. 6 Parepare
Sulawesi Selatan, 91131
Telp. (0421) 22757 Parepare
Email: umparpress@gmail.com



PHITORHIZOREMEDIASI UNTUK LAHAN PASCATAMBANG NIKEL

MUH. AKHSAN AKIB



MONOGRAF



**PHITORHIZOREMEDIASI
UNTUK LAHAN PASCATAMBANG
NIKEL**

Muh. Akhsan Akib

UMPAR Press

PHITORHIZOREMEDIASI UNTUK LAHAN PASCATAMBANG NIKEL

Penulis:
Muh. Akhsan Akib

ISBN: 978-602-50695-7-4

Penyunting:
Suherman

Penerbit:
UMPAR Press

Redaksi:
Kampus II UM Parepare
Jl. Jend. Ahmad Yani Km. 6 Parepare
Sulawesi Selatan, 91131
Telp. (0421) 22757 Parepare
Email: umparpress@gmail.com

Cetakan Pertama, Maret 2019

Hak cipta dilindungi oleh undang-undang
Dilarang memperbanyak karya tulis ini dalam bentuk dan dengan cara apapun
tanpa ijin tertulis dari penerbit

PRAKATA

Bismillahirrahmanirrahim

Serulah (manusia) kejalan tuhanmu dengan hikmah dan pelajaran yang baik, dan bantalah mereka dengan cara yang baik pula

(Q.s. An. Nahl: 125)

Apabila engkau memiliki sebiji kurma di tanganmu maka tanamlah, meskipun besok akan kiamat, semoga engkau mendapatkan pahala

(Al – Hadits)

Segala puji dan syukur kepada sumber dari suara-suara hati yang bersifat mulia, sumber ilmu pengetahuan, sumber segala kebenaran, Sang Maha Cahaya, Penabur Cahaya Ilham, Pilar nalar kebenaran dan kebaikan yang terindah, Sang Kekasih tercinta yang tak terbatas pencahayaan cinta-Nya bagi umat-Nya, Allah Subhanahu Wa Ta'ala.

Penulisan monograf ini diusahakan karena mengingat bahwa ilmu yang titipkan Allah kepada saya, harus dan wajib disampaikan kepada hamba-hambanya yang lain, khususnya kepada pemerhati lingkungan hidup di lahan-lahan pascatambang. Monograf ini merupakan bagian dari penelitian Disertasi yang berjudul "Pemanfaatan Kacang Koro Pedang (*Canavalia ensiformis* L) yang Diintroduksi Mikoriza Arbuskula untuk Proses Rehabilitasi Lahan Pasca Tambang Nikel.

Dengan penuh kesadaran diri dan dengan segala kerendahan hati, saya menyadari bahwa hanya Allah-lah yang memiliki segala kesempurnaan, sehingga tentu masih banyak lagi rahasi-Nya yang belum tergali dan belum kita ketahui. Oleh karena itu saya senantiasa mengharapkan kritik dan saran membangun dari berbagai pihak, sehingga terjadi suatu sinergi yang pada akhirnya akan membuat pemikiran ini bisa disempurnakan lagi di masa yang akan datang untuk kemajuan umat manusia. Amin.

Bukanlah sebaik-baik kamu orang yang bekerja untuk dunianya saja tanpa akhiratnya, dan tidak pula orang-orang yang bekerja untuk akhiratnya saja dan meninggalkan dunianya. Dan sesungguhnya, sebaik-baiknya kamu adalah orang yang bekerja untuk (akhirat) dan untuk (dunia)

(Hadits Rasullullah SAW)

Parepare, Januari 2019

DAFTAR ISI

Prakata	iv
Daftar Isi	v
Daftar Tabel	vi
Daftar Gambar	vii
Ringkasan	viii
BAB 1 Pendahuluan	1
BAB 2 Tinjauan Pustaka	6
BAB 3 Tujuan dan Manfaat Penelitian	39
BAB 4 Metode Penelitian	41
BAB 5 Hasil dan Pembahasan	45
Kinerja Mikoriza pada Lahan Pasca Tambang Nikel	45
Fenomena pertumbuhan Akar Tanaman	49
Phitorhizoremediasi	55
BAB 6 Kesimpulan dan Saran	63
Daftar Pustaka	65
Lampiran	
Glosarium	
Indeks	

DAFTAR TABEL

1.	Luas lahan terganggu, area rehabilitasi dan penambangan	2
2.	Taksonomi mikoriza arbuskula	29
3.	Beberapa jenis mikoriza yang telah dimanfaatkan dalam pertumbuhan tanaman	29

DAFTAR GAMBAR

1.	Morfologi tanaman kacang koro pedang (<i>Canavalia ensiformis</i>)	20
2.	Penampang akar <i>C. ensiformis</i> yang terinfeksi <i>Acaulospora</i> sp.	46
3.	Persentase akar <i>C. ensiformis</i> yang terinfeksi oleh <i>Acaulospora</i> sp	47
4.	Rata-rata Kelimpahan spora <i>Acaulospora</i> sp per 100 gr sampel media tanam <i>C. ensiformis</i> setelah penanaman.	48
5.	Rata-rata jumlah akar lateral tanaman <i>C. ensiformis</i> yang diintroduksi <i>Acaulospora</i> sp.	51
6.	Rata-rata panjang akar tanaman <i>C. ensiformis</i> yang diintroduksi <i>Acaulospora</i> sp.	52
7.	Peran pitohormon di zona akar.	52
8.	Rata-rata volume akar dan berat kering akar <i>C. ensiformis</i> yang diintroduksi <i>Acaulospora</i> sp.	53
9.	Rata-rata berat kering akar tanaman <i>C. ensiformis</i> yang diintroduksi <i>Acaulospora</i> sp.	55
10.	Rata-rata ratio tajuk akar <i>C. ensiformis</i> yang diintroduksi <i>Acaulospora</i> sp	55
11.	Rata-rata akumulasi logam nikel oleh <i>C. ensiformis</i> yang diintroduksi <i>Acaulospora</i> sp.	56
12.	Konsentrasi logam nikel pada organ akar <i>C. ensiformis</i> yang diintroduksi <i>Acaulospora</i> sp.	57
13.	Konsentrasi logam nikel pada organ batang <i>C. ensiformis</i> yang diintroduksi <i>Acaulospora</i> sp.	57
14.	Konsentrasi logam nikel pada organ daun <i>C. ensiformis</i> yang diintroduksi <i>Acaulospora</i> sp.	59
15.	Konsentrasi logam nikel pada organ vegetatif <i>C. ensiformis</i> yang diintroduksi <i>Acaulospora</i> sp.	59
16.	Rata-rata efisiensi penyerapan logam nikel oleh <i>C. ensiformis</i> yang diintroduksi <i>Acaulospora</i> sp.	60
17.	Rata-rata laju reduksi logam nikel oleh <i>C. ensiformis</i> yang diintroduksi <i>Acaulospora</i> sp.	60
18.	Ringkasan mekanisme penghindaran dan toleransi logam berat	62

RINGKASAN

Konsentrasi logam nikel di lahan pasca tambang Sorowako mencapai konsentrasi 14.200 ppm dan menjadi faktor pembatas untuk pertumbuhan tanaman. Tanaman fitoakumulator *Canavalia ensiformis* dapat diinokulasi mikoriza arbuskula untuk mempercepat proses rehabilitasi. Tujuan penelitian adalah mengetahui tingkat infeksi akar tanaman *C. ensiformis* yang diintroduksi mikoriza arbuskula di lahan pasca tambang nikel. Mengetahui pertumbuhan akar tanaman *C. ensiformis* yang diintroduksi mikoriza arbuskula di lahan pasca tambang nikel. Mengetahui jumlah akumulasi dan konsentrasi nikel pada organ tanaman *C. ensiformis* yang diintroduksi mikoriza arbuskula. Mengetahui kemampuan *C. ensiformis* yang diintroduksi mikoriza arbuskula dalam rehabilitasi lahan pasca tambang nikel.

Penelitian disusun berdasarkan Rancangan Acak Kelompok dengan perlakuan *Acaulospora* sp, yaitu: Tanpa *Acaulospora* sp (kontrol); *Acaulospora denticulata* indiginous dan *Acaulospora tuberculata* eksoginous. Penelitian ini diawali dengan Prapenelitian di Laboratorium Mikrobiologi Balai Penelitian dan Pengembangan Lingkungan Hidup dan Kehutanan Makassar, sedangkan penelitian aplikasi *Acaulospora* sp berlangsung di Nursery Vale Indonesia, Sorowako.

Hasil penelitian di lapangan dan di laboratorium dapat disimpulkan bahwa: *Acaulospora denticulata* indiginous dapat menginfeksi dan membantu pertumbuhan akar untuk mengakumulasi logam berat (nikel) pada organ akar, batang, daun, bunga, polong, dan biji tanaman *C. ensiformis*. Hal ini menunjukkan bahwa tanaman *C. ensiformis* yang diintroduksi *A. denticulata* indiginous mampu merehabilitasi lahan pasca tambang nikel.

PENDAHULUAN



Industri pertambangan di Indonesia telah menjadi salah satu sumber utama devisa dan penggerak ekonomi kawasan di sekitar lokasi pertambangan. Pertambangan merupakan suatu rangkaian kegiatan dalam upaya mencari, menggali (menambang), mengolah, memanfaatkan dan menjual bahan tambang. Bahan tambang yang telah ditemukan di Indonesia berupa minyak bumi, gas bumi, batu bara, timah, bijih besi, tembaga, mangan, bauksit (bijih aluminium), nikel, emas, perak, aspal alam, belerang, fosfat, batu gamping, batu pualam, intan, kaolin, dan pasir kuarsa. Industri pertambangan selain mendatangkan dampak positif juga memberikan dampak negatif berupa kerusakan biofisik lingkungan yang sangat besar dan mengkhawatirkan, khususnya bagi penambang yang tidak memiliki atau tidak peduli terhadap analisis dampak lingkungan

(AMDAL). Beberapa hasil penelitian telah dilaporkan bahwa akibat penambangan menyebabkan dampak pengrusakan lingkungan berupa longsor akibat pengerutan, rusaknya struktur tanah akibat penggalian (Yudhistira et al., 2011), terjadi pemadatan tanah akibat aktivitas alat berat (Achmad dan Mulyadi, 2013), menurunnya populasi organisme tanah akibat pengrusakan habitat (Iwan dan Handayani, 2013), dan meningkatnya pencemaran logam dari sisa hasil tambang (Triadriani et al., 2014).

Vale Indonesia merupakan perusahaan tambang nikel yang berlokasi di Sorowako, Kecamatan Nuha, Kabupaten Luwu Timur, Provinsi Sulawesi Selatan. Kegiatan penambangan dilakukan di darat dengan menerapkan teknik penambangan terbuka (*open pit mining*), dimana kegiatan pembukaan dan pengupasan hutan alami tidak dapat dihindarkan. Hal ini menyebabkan perubahan bentang alam, seperti topografi, vegetasi penutup, pola hidrologi, dan kerusakan tubuh tanah.

Luas area kontrak karya Vale Indonesia seluas 218.528,99 hektare yang terbagi 118.387,45 hektare di Sorowako (Sulawesi Selatan), 63.506,18 hektare di Pomalaa (Sulawesi Tenggara), dan 36.635,36 hektare di Bahodopi (Sulawesi Tengah) (Maruto, 2013; Fachrul, 2013). Dari luas lahan yang dimiliki di Sulawesi Selatan, luas lahan yang difungsikan Vale Indonesia dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Luas Lahan Terganggu, Areal Rehabilitasi dan Penambangan.

Tahun	Luas lahan Terganggu (ha)	Luas Areal Rehabilitasi (ha)	Luas Areal Penambangan (ha)
2012	4.780,90	3.821,80	959,10
2013	4.901,90	3.973,90	964,00
2014	4.973,15	3.975,91	997,24
2015	5.176,10	3.983,50	1.192,60

Sumber: Vale, 2012; 2014; 2015; 2016; Yasid, 2015.

Jika kita memperhatikan data tersebut, maka luas area penambangan dan fasilitas pendukung operasional yang belum direhabilitasi dan direklamasi terjadi peningkatan setiap tahun, dan pada tahun 2015 telah melebihi Peraturan Internal Vale Global, yaitu Vale Environmental Management System (EMS), bahwa total luasan lahan tambang terbuka tidak boleh lebih dari 1.100 hektar (Vale, 2015).

Hasil penelitian Abubakar (2009), menunjukkan persentase pertumbuhan tanaman pohon pada areal revegetasi Vale Indonesia mencapai 90% sampai 95%. Komposisi tumbuhan yang ditanam adalah jenis pioner seperti sengon (*Paraserianthes falcataria*), eukaliptus (*Eucalytus eurograndis*), sengon buto (*Enterolobium macrocarpum*) serta jenis lokal seperti trema (*Melochiaumbellata*), sandro (*Sandoricum kacappeae*) dan uru (*Elmerelia* sp), dan menyarankan perlunya penanaman tanaman legume sebagai penambat nitrogen untuk menambah kerapatan serta mempercepat penutupan tajuk pada areal revegetasi. Hasil revegetasi selama 12 tahun menunjukkan semua variabel fisik tanah (tekstur, berat volume, porositas total, kadar air dan resistensi penetrasi) dan variabel kimia tanah (pH, karbon organik, unsur hara, kation dapat ditukar, dan kapasitas tukar kation) telah meningkat ke level yang sesuai untuk pertumbuhan tanaman (Hermawan, 2011), namun dalam penelitian tersebut tidak memberikan informasi berapa kandungan nikel yang tereduksi selama revegetasi 12 tahun.

Tanaman legume yang dapat dimanfaatkan dalam program rehabilitasi, salah satunya adalah tanaman koro pedang (*Canavalia ensiformis*= *C. ensiformis*). Salah satu keunggulan tanaman *C. ensiformis* yaitu dapat tumbuh dan berproduksi pada lahan kritis dan memiliki produktivitas 7 ton per hektar (Laksono, 2015). Dalam program bioremediasi, tanaman *C. ensiformis* dapat dijadikan sebagai tanaman fitoakumulator. Penelitian Romeiro et al. (2007) menyimpulkan bahwa tanaman *C. ensiformis* terbukti baik sebagai tanaman akumulator yang toleran terhadap timbal (Pb), sehingga menunjukkan potensinya sebagai suatu tanaman phytoextraction.

Kandungan nikel (Ni) pada lahan pasca tambang memiliki variasi yang cukup signifikan dan masih menunjukkan konsentrasi yang tinggi (Sriwahyuni, 2012), Widiatmaka et al. (2010) mengemukakan bahwa konsentrasi logam berat Ni pada lahan pasca tambang nikel di Pomala, Sulawesi Tenggara, berkisar 265 - 272 ppm, sedangkan batas toksisitas Ni untuk tanaman adalah 100 ppm. Jadi apabila lahan tersebut dikembangkan untuk pertanian maka akan menjadi faktor pembatas dan kemungkinan menjadi hambatan dalam proses berproduksi. Percobaan pendahuluan yang telah dilakukan menunjukkan bahwa tanaman *C. ensiformis* yang di tanam pada tanah pasca tambang nikel mampu tumbuh

dengan baik dan mampu menyerap logam berat Ni yang diakulasi pada bagian akar (data tidak dipublikasikan). Selain tanaman *C. ensiformis* yang mampu tumbuh dan menyerap logam nikel juga terdapat beberapa tanaman fitoakulator lainnya, antara lain *Phyllanthus serpentines* (Juhaeti et al., 2005), *Alyssum bertolonii*, *Alyssum lesbiacum*, *Berkheya coddii*, *Hybanthus floribundus*, *Thlaspi goesingense*, *Thlaspi montanum*, *Senesio coronatus*, *Lolium miscanthus*, *Phyllanthus serpentines* (Hidayati, 2005), *Ipomea reptana* (Muliadi et al., 2013), *Salvinia molesta* (Viobeth et al., 2013), *Rinorea niccolifera* (Fernando et al., 2014), *Panicum maximum* (Rahman, 2015), *Glicine max* yang ditanam dengan tanaman akumulator *Sarcotheca celebica* dan *Melastoma malabathricum* (Netty et al., 2016). Tanaman tersebut umumnya berupa tanaman hias, sayuran, buah, dan hijauan makanan ternak, sedangkan *C. ensiformis* selain dapat berfungsi sebagai akumulator, juga mempunyai peluang sebagai bahan baku etanol.

Pengembangan *C. ensiformis* berpeluang untuk dikembangkan di lahan yang terkontaminasi logam berat Ni. Penyerapan dan akumulasi logam berat oleh tumbuhan menurut Priyanto dan Prayitno (2007) dibagi menjadi 3 tahap, yaitu: (1) penyerapan oleh akar, logam dibawa ke dalam larutan di sekitar akar (rhizosfer), (2) translokasi logam dari akar ke bagian tubuh tanaman, (3) lokalisasi logam pada sel dan jaringan, misalnya dengan menimbun logam di dalam organ tertentu seperti akar, daun dan vakuola. Namun untuk meningkatkan pertumbuhan dan produksi tanaman dibutuhkan suatu teknologi yang ramah lingkungan, salah satu teknologi yang dapat diterapkan adalah pemanfaatan mikroba. Widyati (2008) mengemukakan bahwa dalam hal ini mikroba menghalangi tanaman menyerap logam dengan cara menahan logam di akar, mikroba menghasilkan enzim tertentu yang dapat mengurangi toksisitas logam atau mikroba bahkan membantu tanaman mengakumulasi logam dalam jumlah yang lebih besar tetapi tanaman tidak keracunan. Hasil penelitian Setiadi dan Setiawan (2011) disimpulkan bahwa terdapat tiga genus Mikoriza Arbuskula (MA) yang mendominasi areal rehabilitasi pasca penambangan nikel di PT INCO Tbk (sekarang PT. Vale Indonesia Tbk), yaitu: *Glomus* sp; *Acaulospora* sp; dan *Gigaspora* sp, namun belum dimanfaatkan sebagai agen hayati pada budidaya tanaman pertanian.

Salah satu cara yang dapat dilakukan adalah dengan mengaplikasikan peran mikoriza arbuskula (MA) sebagai inokulum. MA merupakan komponen esensial yang dibutuhkan untuk membantu meningkatkan daya hidup (Suharno et al., 2014) dan pertumbuhan tanaman (Idham dan Nursjamsi, 2016), khususnya pada lokasi pasca tambang (Setiadi dan Setiawan, 2011). Mikoriza dapat membantu proses revegetasi (Saputri et al., 2016) dengan meningkatkan daya larut mineral (Sufardi et al., 2013), meningkatkan pengambilan nutrisi (Ayu et al., 2015), mengikat partikel tanah menjadi agregat yang stabil (Fuady, 2013) dan meningkatkan toleransi terhadap kekeringan (Amina et al., 2014) dan keracunan logam (Setiadi dan Setiawan, 2011). Hasil penelitian Prayudyaningsih dan Ramdana (2016) menunjukkan bahwa inokulasi MA *Acaulospora* sp. dan kompos 15% menghasilkan biomassa tanaman tertinggi.

Informasi diatas memberikan dorongan untuk melakukan suatu penelitian untuk menjawab beberapa pertanyaan yang dirumuskan dalam bentuk permasalahan penelitian, antara lain (1) Apakah MA mampu menginfeksi dan membantu pertumbuhan akar tanaman *C. ensiformis* di lahan pasca tambang nikel? (2) Berapakah jumlah akumulasi dan konsentrasi nikel pada setiap organ tanaman *C. ensiformis* yang diintroduksi MA? (3). Apakah *C. ensiformis* yang diintroduksi MA mampu merehabilitasi lahan pasca tambang Ni. Permasalahan tersebut harus jawaban untuk meningkatkan produktivitas lahan marginal pasca tambang Ni dengan pengembangan tanaman fitoakumulator tanaman *C. ensiformis* dengan penerapan teknologi MA.

TINJAUAN PUSTAKA



Sumber daya mineral ekonomi yang terletak di bumi merupakan bahan penting untuk semua kenyamanan modern kita. Penambangan menghasilkan keuntungan yang besar bagi pemilik perusahaan, sumber pendapatan bagi pemerintah, dan menyediakan lapangan kerja bagi para pencari kerja. Namun, dari pendapatan mereka, mereka dituntut biaya lingkungan yang telah rusak seperti polusi, erosi dan kerusakan ekosistem alam. Menurut Rock et al. (2015) bahwa kerusakan komponen lingkungan akibat kegiatan penambangan, mustahil untuk dikembalikan seperti semula.

Kegiatan penambangan bahan galian berharga seperti penambangan emas, batubara, nikel, bijih besi, tembaga dari lapisan bumi telah berlangsung sejak lama. Selama kurun waktu 50 tahun, konsep dasar pengolahan relatif tidak berubah, yang berubah adalah skala kegiatannya. Mekanisasi peralatan penambangan telah menyebabkan skala penambangan semakin membesar. Perkembangan teknologi pengolahan menyebabkan ekstraksi bijih kadar rendah menjadi lebih ekonomis, sehingga semakin luas dan semakin dalam mencapai lapisan jauh di bawah permukaan bumi. Pengaruh kegiatan penambangan mempunyai dampak yang sangat signifikan terutama berupa pencemaran air permukaan dan air tanah sehingga meningkatkan lahan-lahan kritis pasca penambangan (Suprpto, 2012 dan Sittadewi et al., 2013), Anastasis et al. (2017) menambahkan bahwa tailing tambang Limni dan situs sekitarnya sangat tercemar, terutama dengan Mg, S, Zn, Cu dan Pb; sehingga aktivitas pertanian di daerah yang diteliti harus dilarang dan penanganan yang sesuai harus dilakukan dengan segera.

Penambangan terbuka (*open cast*) di wilayah Raniganj dan Jharia di India telah menyebabkan kerusakan alam yang berat dan lapisan penutup (*overburden*) terdiri dari batuan pasir dan serpihan karbon. Bahan berbatu ini memiliki sedikit bahan organik dan dibutuhkan penanganan khusus sebelum direklamasi dan direvegetasi. Penambangan terbuka, kini telah menjadi agen terbesar untuk membuka lahan dan memisahkan batu bara di wilayah Raniganj dan Jharia. Menurut laporan CMP DIL (2010) bahwa terdapat sekitar 55,5 km² lahan telah ditinggalkan oleh masyarakat setempat karena lahan mereka telah menjadi area penambangan yang dalam, air tergenang dimusim hujan dan menjadi sumber perkembangan nyamuk penyebab penyakit malaria, atau kekurangan air di musim panas. Area pembuangan sisa bahan tambang menjadi jebakan kematian bagi anak-anak lokal yang mencari sisa-sisa batubara. Penambangan terbuka juga telah menyebabkan perubahan proses geomorfologi, hidrologi dan biotik baik di tingkat lokal maupun regional, yang menyebabkan terganggunya pengembangan ekosistem. Dengan demikian jelas bahwa pertambangan batubara mengarah pada kerusakan lingkungan, sementara pembangunan dan kemandirian ekonomi menuntut peningkatan kegiatan penambangan sumber daya mineral yang ada. Meski tidak ada alternatif lain untuk lokasi operasi

penambangan, pilihan mengenai lokasi dan teknologi pengolahan, adaptasi proses penambangan batubara ramah lingkungan dan hutan di lokasi penambangan dapat benar-benar meminimalkan kerusakan pada lingkungan (Sribas, 2013)

Penambangan *opencast* di Eastern Coalfields menunjukkan penurunan sifat biologi khususnya pada jumlah populasi mikrobiologi. Penurunan jumlah populasi terjadi pada bakteri, actinomicetes dan cendawan (Mrinal, 2004). Lebih lanjut dijelaskan bahwa reklamasi biologis, jika tidak dilakukan dalam masa simpan (periode sampai tanah akan mempertahankan status kesuburannya untuk mendukung pertumbuhan tanaman), maka unsur hara mengalami pencucian dan erosi, siklus hara terputus, dan tanah menjadi tidak produktif. Sufian dan Jha (2015) menambahkan bahwa pertambangan batubara *opencast* yang tidak ilmiah dan praktek pasca tambang yang buruk mengubah sifat tanah asli secara nyata. Tanah menjadi sangat asam dan kekurangan unsur hara yang merugikan pertumbuhan dan perkembangan tanaman. Kondisi keasaman tanah yang sangat asam meningkatkan bioavailabilitas logam berat. Akibatnya, tanah menjadi beracun dan menyebabkan tekanan oksidatif pada tanaman. Bersamaan, hal itu berdampak negatif terhadap pertumbuhan dan aktivitas mikroorganisme yang berperan penting dalam dinamika tanah. Dengan demikian, penambangan terbuka menghancurkan struktur tanah, meningkatkan keasaman tanah, membuat kekurangan nutrisi tanah dan meningkatkan toksisitas logam berat.

Penambangan timah di Pulau Bangka dan Singkep menyebabkan penurunan kualitas tanah dan jumlah jenis vegetasi alami. Jumlah jenis vegetasi menurun 100 %, sifat fisik tanah khususnya pada kadar pasir mengalami peningkatan 21 % sedangkan pada kadar debu dan liat menurun masing-masing 100 % dan 94 % yang menyebabkan terjadinya perubahan kelas tekstur tanah, dari liat ke pasir. Sifat kimia tanah juga mengalami penurunan, pH 18 %, KTK 0.95 %, Kadar basa-basa 45 %, N total 85 %, Kadar C Organik 90 %, K tersedia 89 %, Cadd 40%, Mg 30%, Na 63%, Fe 93 %, Mn 81%, Cu 90%, Pb 73 %, Sn 0 % (Santun et al., 2008).

Erosi yang terjadi pada pasca penambangan batu bara di Kutai Kartanegara, Kalimantan Timur adalah akibat pemadatan tanah yang menyebabkan permeabilitas tanah lebih lambat dan tanaman penutup

yang lebih lambat tumbuh. Kondisi ini membuat tanah terkikis akibat tetesan air dan air hujan. Lebih lanjut dijelaskan bahwa beberapa faktor yang menyebabkan terjadinya erosi di lahan pasca tambang adalah: (1) Struktur tanah telah rusak saat pembukaan lahan; (2). Restoring solum tanah dilakukan tanpa mempertimbangkan stabilitas tanah; (3). Lahan tetap terbuka selama kegiatan revegetasi; (4). Lahan tidak ditutupi saat kanopi tanaman belum mampu menutup secara keseluruhan (Zulkarnain et al., 2014). Selain terjadinya erosi juga terjadi peningkatan suhu lingkungan, Sholihah dan Sjarmidi (2014) melaporkan bahwa pada lahan pasca tambang pasir di Cimalaka, Sumedang, menunjukkan rata-rata intensitas cahaya $15,2 \times 10^3 \pm 7,3 \times 10^3$ lux, suhu udara $29,1 \pm 1,02^\circ\text{C}$ dan kelembaban $69,7 \pm 7,5\%$. Intensitas cahaya yang tinggi membuat suhu udara naik lebih tinggi dari biasanya, yaitu antara 17.1°C sampai 22°C . Hal ini akan meningkatkan polusi udara khususnya debu, yang menyebabkan meningkatnya penyakit paru-paru dan gangguan pernapasan (Rock et al., 2015).

Lahan Jharia Coal di Jharkhand mengandung batubara dengan kadar tinggi. Siklus bahan bakar batubara konvensional merupakan salah satu kegiatan yang paling merusak, mengancam kesehatan, mencemari udara dan air, merusak lahan, dan berkontribusi terhadap pemanasan global. Konsentrasi sulphur dioksida (SO_2) dan nitrogen dioksida (NO_2) paling tinggi di dekat daerah pertambangan batubara. Konsentrasi logam berat di sekitar area pertambangan batubara ditemukan pada urutan $\text{Fe} > \text{Cu} > \text{Zn} > \text{Mn} > \text{Pb} > \text{Cr} > \text{Cd} > \text{Ni}$. Sumber utama yang berkontribusi terhadap polusi udara di Jharia adalah kegiatan yang terkait pertambangan batubara dan pembakaran tambang aktif, kendaraan, dan debu (Pandey et al., 2013).

Hasil analisis yang diperoleh oleh Garbah et al. (2015) menunjukkan dengan jelas bahwa kontaminan pertambangan utama seperti Nitrat, Klorida, Fosfat, Sianida, Fluorida, Besi, Mangan terganggu dengan kualitas air di daerah Nigeria. Ini juga menunjukkan bahwa air sungai yang terkontaminasi diserap oleh tumbuhan dan dapat dengan mudah masuk ke dalam sistem aliran darah manusia. Meskipun lubang bor disediakan untuk mengajukan argumen pasokan air ke masyarakat namun pertimbangan tidak diberikan kepada aliran debit air yang digunakan oleh tumbuhan dan hewan dan kadang-kadang untuk

kebutuhan air minum. Oleh karena itu, ada kebutuhan untuk mengolah air tambang terlebih dahulu sebelum dibuang ke sungai.

Akibat eksplorasi batu bara yang ekstensif di Raniganj coal fields India, termasuk topografi tanah sebagian besar menciptakan kondisi yang tidak menguntungkan untuk habitat tanaman di daerah tambang. Penambangan batubara juga menyebabkan kerusakan yang besar pada lansekap dan komunitas biologis. Telah ditemukan bahwa ada sejumlah spesies pohon dan semak belukar, namun jumlahnya sangat berkurang akibat aktivitas penambangan. Perubahan kualitas tanah dari silty loam ke sandy loam tidak hanya mempengaruhi vegetasi tetapi juga memainkan peran penting dalam mengubah iklim lokal. Sifat fisik lainnya yaitu daya dukung air dan kelembaban tanah lebih rendah di daerah pertambangan dibanding tanah yang belum ditambang. Nutrisi tanah seperti nitrogen, fosfor dan potasium dalam bentuk tersedia, juga lebih rendah di daerah pertambangan dibanding dengan tanah yang belum ditambang. Di tanah yang belum ditambang, nilai rata-rata karbon organik jauh lebih tinggi daripada daerah penambangan yang menunjukkan bahwa kegiatan penambangan telah benar-benar merusak kualitas tanah. Kapasitas tukar tukar juga terganggu oleh aktivitas penambangan dibandingkan dengan tanah yang belum ditambang yang ada di sekitarnya (Koushik et al., 2012).

Analisis dampak lingkungan sekitar tambang nikel kabupaten Halmahera Timur, Maluku Utara telah dilakukan oleh Gunawan et al. (2015), dan melaporkan bahwa pada tanah di sekitar tambang mengandung logam berat Pb (1.1397 ± 0.301 ppm) dan Hg (17.8725 ± 1.511 ppb) melebihi ambang batas (Pb: 2.60 ppm dan Hg: 0.3 ppb), pada air mengalir kandungan Pb (0.1367 ± 0.023 ppm) melebihi ambang batas (0.01 ppm), pada rumput kandungan Hg (6.6925 ± 2.802 ppb) ambang batas (2.00 ppb), pada organ hati sapi pedaging mengandung Hg (7.4910 ± 1.514 ppb), pada daging sapi pedaging mengandung Hg (4.7210 ± 3.021 ppb) ambang batas (0.05 ppb).

Widiatmaka et al. (2010) juga telah melakukan penelitian untuk memberikan informasi karakteristik pedologi lahan pasca tambang di Pomalaa, Sulawesi Tenggara, hasil penelitiannya menunjukkan bahwa tanah-tanah di daerah virgin di lokasi bekas pertambangan nikel Pomalaa terklasifikasi dalam Typic Bapludox, berliat, campuran, isohipertermik dan

Typic Bapludalfs, berlempung, campuran, isohipertermik. Tanah di lokasi bekas penambangannya sendiri merupakan overburden. Tanah virgin di Pomalaa telah mengalami pelapukan dan perkembangan yang cukup lanjut. Cadangan kesuburan alami, baik pada tanah daerah virgin maupun bekas tambang, rendah dan memiliki sifat fisik yang memerlukan perbaikan. Rendahnya kesuburan dicirikan oleh kadar bahan organik rendah, kadar P-tersedia sangat rendah, kapasitas tukar kation rendah. Kompleks basa-basa dicirikan oleh kadar Ca-dd sangat rendah, K-dd rendah, tetapi Mg-dd tinggi. Diantara unsur mikro, kadar Fe-tersedia dan Mn-tersedia tergolong cukup, sedangkan Zn-tersedia dan Cu-tersedia tergolong kurang. Hasil analisis unsur hara tanaman dalam daun mengindikasikan bahwa beberapa jenis tanaman yang pertumbuhannya kurang baik di lahan revegetasi disebabkan oleh defisiensi Ca, Fe, Cu, atau Mn.

Yesy (2009) menjelaskan karakteristik tanah pada lahan bekas tambang nikel di desa Sorowako, Sulawesi Selatan, bahwa penimbunan dan pemadatan tanah dalam kegiatan rekonstruksi lahan, menyebabkan rusaknya struktur, porositas, dan massa tanah (*bulk density*) sebagai karakter fisik tanah yang penting bagi pertumbuhan tanaman. Kondisi tanah karena pemadatan menyebabkan buruknya sistem tata air (*water infiltration and percolation*) dan aerasi (peredaran udara) yang secara langsung dapat membawa dampak negatif terhadap fungsi dan perkembangan akar. Akar tidak dapat berkembang dengan sempurna dan fungsinya sebagai alat absorpsi unsur hara akan terganggu. Rusaknya struktur juga menyebabkan tanah tidak mampu untuk menyimpan dan meresapkan air pada musim hujan, sehingga aliran permukaan (*surface run off*) menjadi tinggi dan sebaliknya, tanah menjadi padat dan keras pada musim kering, sehingga sangat berat untuk diolah, yang secara tidak langsung berdampak pada peningkatan kebutuhan tenaga kerja. Selanjutnya dikatakan bahwa dalam profil tanah yang normal lapisan tanah atas merupakan sumber unsur-unsur hara makro dan mikro esensial bagi pertumbuhan tanaman dan juga sebagai sumber bahan organik untuk menyokong kehidupan mikroba tanah. Hilangnya lapisan tanah atas (*top soil*) akibat kegiatan penambangan dianggap sebagai penyebab buruknya tingkat kesuburan tanah pada lahan-lahan bekas tambang. Tanah bekas tambang yang akan ditanami biasanya berupa

“campuran” dari berbagai bentuk bahan galian yang ditimbun satu sama lainnya secara tidak beraturan dengan komposisi campurannya sangat berbeda dari satu tapak ke tapak lainnya. Hal ini tentunya menyebabkan sangat bervariasinya reaksi tanah (pH) dan kandungan unsur hara pada areal-areal yang akan ditanami. Lebih lanjut dikatakan bahwa hilangnya lapisan top soil dan serasah (*litter layer*) sebagai sumber karbon untuk menyokong kehidupan mikroba potensial, merupakan penyebab utama buruknya kondisi populasi mikroba tanah. Hal ini secara tidak langsung akan sangat berpengaruh terhadap kelanjutan pertumbuhan tanaman. Keberadaan mikroba potensial dapat memainkan peranan yang sangat penting bagi perkembangan dan kelangsungan hidup tanaman. Aktifitasnya tidak saja terbatas pada penyediaan unsur hara, tetapi juga aktif dalam dekomposisi serasah dan bahkan dapat memperbaiki struktur tanah.

Efek pertambangan terhadap lingkungan mungkin tidak segera terlihat, namun akan terlihat setelah beberapa tahun. Mengingat hal ini, perhatian khusus adalah memahami persyaratan dan spesifikasi system untuk mengatasi masalah konflik, memperbaiki reliabilitas komponen dan sistem, serta meminimalkan terjadinya bencana lingkungan yang tidak terencana. Pertambangan dapat menjadi lebih ramah lingkungan dengan mengembangkan dan mengintegrasikan praktik yang mengurangi dampak negatif dari operasi penambangan. Praktek-praktek ini mencakup langkah-langkah pengurangan konsumsi air dan energi, meminimalkan gangguan lahan dan produksi limbah, mencegah polusi tanah, air, dan udara di tempat-tempat tambang, dan melakukan penutupan tambang dan kegiatan reklamasi yang berhasil (Rock et al., 2015).

Pengelolaan lahan pasca tambang secara baik merupakan salah satu kewajiban dalam kegiatan usaha pertambangan. Pengelolaan antara lain dapat berupa reklamasi dan rehabilitasi lahan sehingga tanah yang terbuka dapat dihijaukan kembali. Usaha revegetasi lahan pasca penambangan tidaklah mudah. Upaya tersebut perlu dilakukan dengan trietment khusus dan menyeluruh meliputi perbaikan sifat fisik, kimia dan biologis tanah sebagai media tumbuh, sehingga tanaman yang diintroduksi dapat beradaptasi dan tumbuh dengan baik.

Rehabilitasi Lahan Pasca Tambang

KEPUTUSAN MENTERI KEHUTANAN DAN PERKEBUNAN (1999) menjelaskan bahwa rehabilitasi lahan adalah usaha memperbaiki, memulihkan kembali dan meningkatkan kondisi lahan yang rusak dan kritis agar dapat berfungsi secara optimal, baik sebagai unsur produksi, media pengatur tata air, maupun sebagai unsur perlindungan alam lingkungan. Dalam makalah Nebiyou dan Menamo (2016) dijelaskan bahwa beberapa solusi untuk membuat situasi dalam program rehabilitasi lahan berhasil, antara lain: (a) Harus ada beberapa keuntungan jangka pendek, baik moneter maupun material, selain mengantisipasi dampak yang menguntungkan di masa depan; (b). Sikap, perilaku, dan persepsi masyarakat setempat harus sejalan dengan asas program rehabilitasi - masyarakat harus menerima dan menginternalisasi perubahan tersebut dalam jangka panjang sesuai keuntungannya; (C). Pemahaman komprehensif tentang keterkaitan, kekhasan dan kompleksitas ekosistem lahan, terutama hutan lahan kering dan hutan; (d). Rehabilitasi harus mengarah pada perbaikan kesuburan tanah, proses hidrologi, dan sebagainya; (e). Penggunaan lahan yang ada, harus dianalisis dan atribut tanah harus disesuaikan dengan penggunaan lahan sehingga dapat menentukan pendorong degradasi.

Keberhasilan program rehabilitasi lahan akan dapat meningkatkan produktivitas lahan dan kualitas lingkungan terutama dalam aspek: *Penghasil O²* (Sepriana et al., 2004; Rauf et al., 2013). Kurniawan dan Surono (2013) menyatakan bahwa keberhasilan reklamasi lahan bekas tambang Batu Apung Ijobalit, Lombok Timur, Nusa Tenggara Barat dapat diukur berdasarkan parameter kualitas lingkungan biogeofisik yang meliputi kualitas tanah, air dan udara serta tingkat pemberdayaan potensi masyarakat setempat kualitas udara dari hasil pengukuran kadar SO², NO² dan debu di lokasi tambang dan bekas tambang yang direklamasi, masih berada di bawah ambang batas peraturan yang berlaku. Flora dan fauna pada area reklamasi terlihat lebih memiliki tingkat keragaman yang semakin berkembang sesuai dengan peningkatan mutu lingkungan. Keinginan masyarakat terhadap kegiatan reklamasi terukur sangat tinggi, didominasi oleh model reklamasi *social forestry*. Model reklamasi yang telah dijalankan di Lembah Hijau yang merupakan salah satu lokasi lahan

bekas tambang di wilayah Ijobalit, menjadi model reklamasi berwawasan lingkungan dan memberikan manfaat untuk masyarakat sekitar.

Mereduksi konsentasi CO² (Rooyen, 2013). Upaya penanaman mangrove di sepanjang wilayah pesisir pantai secara ekologis, fisik, sosial dan ekonomi mampu mencegah dan melindungi kawasan pesisir pantai. Secara ekonomi dan ekologis perairan mangrove berperansebagai tempat asuhan (*nursery ground*) bagi berbagai jenis hewan *aquatic* yang mempunyai nilai ekonomis tinggi seperti ikan, udang, kepiting dan kekerangan. Secara fisik berperan sebagai penahan abrasi pantai, intrusi air laut, penahan badai dan angin yang bermuatan garam, serta menurunkan kandungan arbondioksida (CO²) di udara dan penambat bahan-bahan pencemar di perairan pantai (Muharram, 2014), Rosari et al. (2017) menambahkan bahwa keberadaan hutan rakyat di sekitar pemukiman berfungsi sebagai penyerap zat-zat beracun. Hutan rakyat memiliki pola tanam agroforestry yang berperan dalam menyerap (CO²). Pola Agroforestry menghasilkan strata tajuk yang beragam sehingga penyerapan(CO²) merata pada setiap stratanya.

Penyediaan fasilitas pendidikan dan penelitian (Kusmana et al., 2004). Hasil penelitian Mamuko et al. (2016), tentang persepsi dan partisipasi masyarakat dalam upaya rehabilitasi hutan dan lahan menunjukkan bahwa masyarakat Kabupaten Bolaang Mongondow Timur mempunyai persepsi tinggi sebesar tinggi 48%, sedang 45,1% dan persepsi rendah 6,9%. Selanjutnya tingkat persepsi terhadap program rehabilitasi hutan dan lahan terbagi atas tinggi 51%, sedang 35% dan rendah 10%.

Fungsi perlindungan tanah (Roehlano, 2009), rehabilitasi lahan merupakan penerapan metode vegetative yang menggunakan tumbuhan atau tanaman dan sisa-sisanya (misalnya mulsa dan pupuk hijau), serta penerapan pola tanam yang dapat menutup permukaan tanah sepanjang tahun, yang bertujuan untuk mengurangi energi pukulan butir-butir hujan di permukaan tanah, mengurangi kecepatan aliran permukaan (*run off*), memperbesar kapasitas infiltrasi dan mengurangi kandungan air tanah (Idjudin, 2011).

Pelestarian sumberdaya plasma nutfah (Tuheteru, 2010). Hutan merupakan bank plasma nutfah yang mempengaruhi keanekaragaman spesies diluar kawasan hutan (Njurumana, 2013). Nagel (2011) menambahkan bahwa hutan konservasi akan mempertahankan keberadaan keanekaragaman jenis plasma dan tempat hidup dan kehidupan satwa tertentu.

Potensi sumberdaya pulih yang dapat dipanen, perkembangbiakan ternak dan satwa liar (Sawitri dan Mariana, 2010). Hasil penelitian Suarna et al. (2015), menunjukkan bahwa produksi dan kualitas hijauan pakan pada lahan pasca tambang di kabupaten Karangasem meningkatkan ketersediaan pakan untuk ternak sapi bali adalah salah satu implementasi dari program peningkatan kapasitas komoditas unggulan dan konservasi plasma nutfah sapi bali. Hilwan dan Nurjannah (2014) menambahkan bahwa tegakan revegetasi PT Jorong Barutama Greston, Kalimantan Selatan tahun 2008 memiliki simpanan karbon di atas permukaan tanah tertinggi yakni $41.09 \text{ ton.ha}^{-1}$, sedangkan tegakan revegetasi tahun 2009 sebesar $27.43 \text{ ton.ha}^{-1}$, dan tegakan tahun 2010 sebesar $22.90 \text{ ton.ha}^{-1}$. Umur tegakan memengaruhi potensi simpanan karbon di dalam serasah dan tumbuhan bawahnya. Semakin tua umur tegakan, maka semakin besar potensi karbon dari serasah yang ada di bawah tegakan. Sementara itu, semakin tua umur tegakan maka kandungan karbon di dalam tumbuhan bawahnya semakin sedikit.

Stabilitas iklim mikro (Sudaryono, 2011). Evaluasi kegiatan rehabilitasi lahan (revegetasi) diperlukan untuk mengukur tingkat keberhasilan kegiatan yang sedang berlangsung dalam merehabilitasi dan memulihkan lahan yang terdegradasi. Salah satu cara untuk mengevaluasi keberhasilan rehabilitasi lahan adalah dengan menentukan perubahan lingkungan mikro pada berbagai jenis tutupan lahan yang telah dievegetasi, termasuk lahan semak belukar, lahan pertanian, jati monokultur dan tanaman campuran di Ciliwung. Hasil penelitian menunjukkan bahwa suhu udara dan suhu tanah tertinggi diperoleh pada lahan semak belukar masing-masing pada $32,8^{\circ}\text{C}$ dan $26,5^{\circ}\text{C}$, dan terendah pada tanaman campuran masing-masing pada $28,1^{\circ}\text{C}$ dan $20,7^{\circ}\text{C}$. Kelembaban relatif dan kelembaban tanah paling tinggi pada tanaman campuran (72,3% dan 96%) dan terendah pada lahan semak

belukar (60,8%), dan kelembaban tanah terendah terjadi pada jati monokultur (45%). Tingkat infiltrasi tertinggi terjadi pada lahan pertanian ($475,5 \text{ mm.h}^{-1}$, sangat cepat), diikuti oleh jati monokultur (117 mm.h^{-1} , cepat) dan tanaman campuran (80 mm.h^{-1}), dan terendah pada lahan semak belukar ($17,65 \text{ mm.h}^{-1}$, sedang lambat). Pengurangan Erosi terjadi setelah 6 tahun kegiatan revegetasi dengan hasil sebagai berikut: tanaman campuran ($96.676,1 \text{ ton tahun}^{-1}.\text{ha}^{-1}$), jati monokultur ($10.790 \text{ ton tahun}^{-1}.\text{ha}^{-1}$), lahan pertanian dan lahan semak belukar ($52,867,9 \text{ ton tahun}^{-1}.\text{ha}^{-1}$ dan $24.612,6 \text{ ton tahun}^{-1}.\text{ha}^{-1}$). Lingkungan mikro untuk semua jenis tutupan lahan lebih baik setelah kegiatan revegetasi (Mulyana et al., 2011). Dariah et al. (2010) menambahkan bahwa perbaikan iklim mikro dan kondisi biologi tanah juga sudah berjalan, saat penanaman padi dilakukan.

Fungsi hidrologi (Slamet et al., 2012). Proses infiltrasi merupakan proses yang paling penting dalam siklus hidrologi. Dengan adanya infiltrasi, maka akan tersedia air untuk evaporasi dan transpirasi, serta tersedianya peluang dalam peningkatan cadangan air tanah, yang berpengaruh juga pada kontinuitas aliran permukaan baik dari *subsurface flow* dan *base flow* (Sudarmanto et al., 2013), lebih lanjut dijelaskan bahwa melalui data hidrometeorologis Sub DAS Kreo secara umum masih relative baik dalam merespon curah hujan menjadi aliran permukaan, sedangkan melalui analisis karakteristik DAS terdapat berbagai macam kondisi resapan air yang tersebar secara sporadis pada Sub DAS Kreo. Kondisi baik seluas $3.459,19 \text{ ha}$ (50,45%), normal alami seluas $623,28 \text{ Ha}$ (9,09%), Mulai Kritis seluas $170,39 \text{ ha}$ (2,49%), Agak Kritis seluas $1.287,98 \text{ ha}$ (18,78%), Kritis seluas $1.293,38 \text{ ha}$ (18,86%) dan Sangat Kritis seluas $22,03 \text{ ha}$ (0,33%). Kemudian perlu dilakukan upaya perlindungan pada lahan-lahan dengan kondisi resapan air yang masih baik dan normal alami, perlu melakukan peningkatan kemampuan infiltrasi pada lahan-lahan yang mulai kritis dan agak kritis, serta perlu melakukan perbaikan lahan pada lahan-lahan sangat kritis dan kritis.

Penyerap gas-gas pencemar udara (Martuti, 2013), penurunan kualitas lingkungan akibat aktivitas tambang emas selalu terkait dengan polusi unsur logam berat dan kerusakan tanah. PT Newmont Minahasa Raya telah mereklamasi lahan eks tambang emas sejak 1996 dan dinilai berhasil oleh pemerintah. Hasil pengamatan menunjukkan bahwa jenis

paku laut (*Acrostichum speciosum*) (INP=25,53%), paku sepat (*Nephrolepis falcata*) (INP=22,60%), dan paku pedang (*Nephrolepis exaltata*) (INP=22,09%) merupakan 3 jenis dominan di lokasi. Sementara kandungan As dan Hg tertinggi terdapat pada teki badot (*Cyperus kyllingia*) (As=1,93ppm; Hg=126ppb), *Pteris biaurita* (As=1,07ppm; Hg=96ppb), dan jotang hurna (*Spilanthes ocymifolia*) (As=0,30; Hg=126ppb). Pemilihan jenis fitoremediasi untuk As dan Hg pada area yang dikelola secara intensif dianjurkan untuk menggunakan *Pteris biaurita*, teki badot, dan jotang hurna, sedangkan untuk wilayah yang dibiarkan secara alami dianjurkan untuk menggunakan paku laut, paku sepat, dan paku pedang (Purnomo et al., 2015).

Pengembangan kepariwisataan dan rekreasi (Maullana dan Darmawan, 2014). Meyana et al. (2015) mengemukakan bahwa luas areal bekas tambang timah di Kab. Bangka sebesar 18.016,76 hektar tersebar di enam kecamatan dan 30 desa. Areal bekas tambang berada pada kawasan lindung seluas 538 ha (2,99%) dan kawasan budidaya seluas 17.479 ha (97,01%). Terdapat tiga hirarki wilayah yang dapat dikembangkan sebagai kawasan pariwisata dengan memanfaatkan areal bekas tambang timah, yaitu hirarki 1 (4 desa), hirarki 2 (10 desa) dan hirarki 3 (16 desa). Menurut preferensi stakeholder terhadap prioritas jenis wisata yang dapat dikembangkan pada areal bekas tambang timah adalah jenis wisata alam (rekreasi air) yang diikuti dengan jenis wisata budaya (desa wisata) dan selanjutnya jenis wisata buatan (eduwisata) sebagai pendukung kegiatan wisata. Hal serupa juga terjadi lokasi bekas tambang tanah urug di Kecamatan Ngoro Mojokerto yang dimanfaatkan sebagai lokasi Wisata Outdoor (Ningrum dan Navastara, 2015).

Menciptakan kesempatan kerja (Caya et al., 2014). Hasil penelitian Parascita et al. (2015) menunjukkan bahwa dibutuhkan waktu pembuatan dan pengisian lubang tanam dengan tenaga manusia dengan jumlah pekerja 10 orang terhadap lahan yang siap direklamasi yaitu Blok V seluas 1,2 hektar adalah 6,4 jam dan Blok VI seluas 2,3 hektar adalah 3 hari 7 jam, pada rencana reklamasi di area bekas penambangan tanah liat di kuari Tlogowaru PT. Semen Indonesia.

Fitoremediasi adalah suatu teknologi hijau yang digunakan untuk menghilangkan polutan dari komponen lingkungan. Mekanisme yang digunakan untuk memulihkan tanah yang terkontaminasi oleh logam berat

adalah: phytoextraction, phytostabilisation, phytovolatilization dan rhizofiltration. Dua mekanisme pertama yang paling dapat diandalkan. Banyak faktor yang mempengaruhi pilihan strategi fitoremediasi cocok untuk dekontaminasi tanah. Hal ini tergantung pada sifat-sifat tanah, tingkat logam berat dan karakteristik, spesies tanaman dan kondisi iklim (Laghlimi et al., 2015).

Hasil penelitian Setiadi et al. (2014), menunjukkan bahwa hingga akhir pengamatan *Sorghum bicolor*, *Pueraria javanica*, *Tagetes erecta* dan *Paspalum conjugatum* adaptif pada tanah dengan konsentrasi *Total Petroleum Hydrocarbons* (TPH) 1.41%, 4.69%, 8.15% dan kontrol (0.43%). Pertumbuhan *Sorghum bicolor* dan *Tagetes erecta* optimal pada konsentrasi TPH 1.41%, pertumbuhan kedua jenis ini menurun seiring meningkatnya konsentrasi TPH dalam tanah. Pertumbuhan *Pueraria javanica* dan *Paspalum conjugatum* paling optimal pada konsentrasi TPH 4.69%. Performa yang ditunjukkan keempat jenis tanaman berbeda, performa ini menunjukkan respon adaptif. *Sorghum bicolor* dan *Pueraria javanica* terjadi penebalan akar pada konsentrasi TPH 4.69% dan 8.15%. Akar *Tagetes erecta* menunjukkan respon akar yang berbeda, berupa karat pada ujung akar pada konsentrasi TPH 8.15%. Performa akar *Paspalum conjugatum* tidak terjadi perbedaan pada semua konsentrasi TPH dalam tanah. Keempat jenis ini dapat dijadikan rekomendasi tanaman fitoremediasi yang akan digunakan pada kegiatan fitoremediasi.

Teknologi agroforestry sistem silvopastoral telah diterapkan oleh banyak masyarakat (Matatula, 2009; Bukhari dan Febryano, 2009). Sebuah penelitian rehabilitasi lahan dengan system silvopastur yang dilakukan selama 10 tahun (1992 sampai 2002) di Meghalaya, India, melibatkan tujuh spesies pohon serbaguna, yaitu. *Acacia auriculiformis*, *Alnus nepalensis*, *Bauhinia purpurea*, populasi *Eubucklandia hookeri* *Ficus*, *Michelia champaca* dan *M. oblonga* yang ditanam di lahan pertanian berpindah yang telah terdegradasi. Hasilnya menunjukkan bahwa *A. auriculiformis*, *A. nepalensis*, *E. populnea* dan *Michelia* spp. (Tanaman pohon) dan *T. maxima* (tanaman tumbuhan bawah) dapat direkomendasikan untuk pemulihan daerah pertanian berpindah di Himalaya timur, India (Bhatt et al., 2010).

Selain teknologi agroforestry, berbagai bentuk teknologi rehabilitasi lahan telah diteliti dan diterapkan oleh para pemerhati lingkungan antara lain teknologi aplikasi topsoil dan *soil conditioner* (Asir, 2013), teknologi pemilihan dan penggunaan jenis tanaman pioneer yang adaptif (Afandi dan Anugrah, 2014), pemanfaatan mikroorganisme yang dapat mendukung pertumbuhan tanaman (Karti et al., 2009), dan penambahan bahan organik (Sariwahyuni, 2012).

Tanaman Koro Pedang (*Canavalia ensiformis* L)

Koro pedang merupakan tanaman anggota famili Fabaceae atau tanaman polong polongan. Tanaman yang tumbuh tegak, polong berukuran besar, berbiji putih adalah koro pedang (*Canavalia ensiformis* L = *C. ensiformis* L), sedangkan yang tumbuh merambat dan berbiji merah adalah koro kratok 1 (*Canavalia gladiate*) (Suharsi et al., 2013), jenis koro yang lain adalah koro komak C, koro kratok 1, koro kratok 1 (putih), koro kratok 1 (merah), koro kratok 1 (coklat), koro kratok 1 (hitam) dan koro kratok 2 (Subagio, 2010). Tanaman ini berasal dari Asia atau Afrika. Koro Pedang secara luas ditanam di Asia Selatan dan Asia Tenggara, terutama di India, Sri Lanka, Myanmar dan Indo-China (Wahjuningsih dan Saddewisasi, 2013).

Tanaman koro pedang termasuk perdu, tingginya mencapai 1 m, berakar tunggang yang panjang dan memiliki bintil akar pada cabang akar sehingga mampu mengikat nitrogen bebas dari udara, daun majemuk trifoliata, berbunga majemuk dan tandan warna korola ungu, dan buah berbentuk polong. Tanaman mulai menghasilkan bunga umur 2 - 3 bulan. Polong dalam satu tangkai berkisar 1 - 3, panjang polong 30 cm. Biji koro pedang genjah dipanen 4 - 6 bulan (Puslittan, 2007).

Puslittan (2007), lebih lanjut dijelaskan bahwa tanaman koro pedang mampu tumbuh pada lahan suboptimum di antaranya: mampu tumbuh hingga 2000 meter dpl; kisaran suhu 20 - 32 °C di daerah tropik dan 14 - 27 °C di lahan tadah hujan, tumbuh baik pada tempat dengan curah hujan tinggi 4200 mm/tahun maupun tempat yang kering karena perakarannya dalam. Pertumbuhan tanaman koro pedang optimum bila mendapat sinar matahari penuh, tetapi pada tempat ternaungi masih

mampu menghasilkan biji. Tanaman ini dapat tumbuh pada tekstur dan kesuburan tanah dengan kisaran luas



Gambar 1. Morfologi Tanaman Koro Pedang (*C. ensiformis* L)

Koro pedang memiliki kandungan nutrisi yaitu protein 23 - 27,6 %, lemak 2,3 – 3,9 %, karbohidrat 45,2 – 56,9 %, serat kasar 4,9 - 8,0% dan mineral 2,27 – 4,2 % (Centyana et al., 2014), Kalaminasih dan Pangesthi (2013), mengemukakan kacang koro pedang juga mengandung asam sianida (HCN). HCN merupakan senyawa yang terbentuk karena aktivitas enzim hidrolase pada glikosida sianogenik. HCN dapat dihilangkan melalui perendaman dengan rentang waktu tertentu. Kandungan HCN dalam tubuh tidak boleh lebih dari $0,5 \text{ mg.kg}^{-1}$ berat badan karena akan bersifat toksik yang berbahaya bagi kesehatan jika kadarnya melebihi 45 sampai 50 ppm. HCN bersifat mudah rusak oleh panas karena mudah menguap, larut dalam air karena terhidrolisis oleh enzim glukosidase spesifik.

Tanaman koro pedang merupakan salahsatu tanaman yang menjalankan siklus Calvin dalam fiksasi CO² atau termasuk dalam golongan tanaman C3. Secara umum sifat fisiologi tanaman C3 menurut ahli fisiologi adalah tidak memiliki berkas seludang pembuluh yang jelas pada sel fotosintesis, enzim karboksilase adalah rubisko, dibutuhkan 3 ATP dan 2 NADPH untuk mengikat 1 molekul CO², nisbah klorofil daun *a* terhadap *b* sebesar 2,8±0,4. Hasil penelitian Solis et al. (1989) mempertegas bahwa ratio klorofil daun *a* terhadap *b* untuk tanaman koro pedang adalah sebesar 2,2; nisbah transpirasi 450-950 g H₂O per g peningkatan bobot kering, titik kompensasi CO² adalah 30-70 μmol.mol⁻¹CO², terjadi fotorespirasi, suhu optimum bagi fotosintesis 15-25°C, produksi bahan kering 22±0,3 ton ha⁻¹ tahun⁻¹ (Nasaruddin, 2010; Salisbury dan Ross, 1992).

Teknik pengembangan tanaman koro pedang akhir-akhir ini telah banyak dikaji oleh beberapa peneliti, sebagai upaya yang dapat dilakukan untuk meningkatkan pertumbuhan dan produksi tanaman adalah melalui defoliiasi (pemangkasan), introduksi tanaman pakan leguminosa, pemupukan, tumpangsari, dan pengaturan populasi yang tepat.

Suharsi et al. (2013) menunjukkan hasil penelitiannya bahwa jarak tanam tidak memengaruhi pertumbuhan vegetatif tanaman, mutu fisik, dan fisiologis benih koro, tetapi memengaruhi jumlah biji polong⁻¹, bobot biji petak⁻¹, dan produktivitas^{-ton}. Susanti et al. (2014) menambahkan bahwa juga tidak terdapat pengaruh nyata perlakuan pola tumpangsari dengan kepadatan populasi terhadap pengamatan tinggi tanaman, dan jumlah daun, tetapi pada nisbah kesetaraan lahan tanaman koro pedang dan intensitas cahaya terdapat pengaruh terhadap perlakuan kepadatan populasi.

Akib et al. (2014) mengemukakan bahwa waktu pemakasan yang tepat berdasarkan analisis pertumbuhan tanaman kacang koro yang ditanam pada lahan kering adalah saat tanaman berumur 7 sampai 8 minggu setelah tanam pada semua perlakuan jarak tanam yang dicobakan, dan penelitian lebih lanjut untuk melihat dinamika pertumbuhan daun dan sebaran stomata pada tanaman koro pedang, menunjukkan bahwa teknologi pemangkasan mempengaruhi dinamika pertumbuhan daun tanaman koro pedang khususnya pada luas daun dan

jumlah stomata pada lapisan abaxial dan adaxial daun tanaman koro pedang (Akib et al., 2016).

Darnawi dan Darini (2016) melakukan kajian agronomi koro pedang (*C. ensiformis* L.) yang ditumbuhkan pada lahan pasir, dan melaporkan bahwa hasil analisis menunjukkan tidak ada pengaruh interaksi antara jarak tanam dan komposisi pupuk campuran NPK, demikian juga perlakuan jarak tanam dan komposisi pupuk campuran NPK tidak berpengaruh nyata terhadap semua variabel yang diamati. Namun menurut Akinlade, et al., (2007) bahwa untuk masing-masing jarak tanam 50 x 50, 75 x 75 dan 100 x 100 cm produksi daunnya adalah 0,2323; 0,209 dan 0,109 t.ha⁻¹, dengan kandungan protein kasar daun ($p > 0,05$) adalah 14.88; 15.09 dan 15.00%.

Filho et al. (2011) mengemukakan bahwa penambahan kompos organik penting untuk semua parameter yang diamati pada tanaman *C. ensiformis* L dan *Cajanus cajan*, namun pada tanaman *Canavalia ensiformis* memiliki kandungan N dan biomassa yang lebih besar dan ketergantungan kepada mikoriza yang lebih sedikit, bila dibandingkan dengan *C. cajan*. Namun, diverifikasi bahwa tanaman nodular lebih efisien, seperti *C. cajan*, dapat menjadi dasar untuk reklamasi tanah, dengan mengurangi kebutuhan akan pupuk dan dengan merangsang aktivitas biologis di dalam tanah. Dalam penelitian ini pemanfaatan organik kompos sangat penting untuk pertumbuhan tanaman, sementara thermofosfat tidak selalu penting, terutama dengan adanya mikoriza.

Biji koro pedang telah dimanfaatkan dalam bidang farmasi sebagai obat kanker, karena mengandung Concanavalin A (Con A). Hasil penelitian Chen et al. (2015) menunjukkan bahwa kompleks Con A-SCHS dapat meningkatkan interaksi reseptor ConA dengan sangat tinggi yang diekspresikan pada sel-sel hepatoma, dengan demikian berfungsi sebagai agen terapi photothermal yang efektif untuk pengobatan kanker hati. Bidang pertanian sebagai sumber pangan pendamping kedelai, Windrati et al. (2015) menunjukkan bahwa kacang koro pedang dapat dibuat tempe, kecap, susu, sosis dan ice cream. Bidang perikanan sebagai sumber pakan ternak. Centyana et al. (2014) mengemukakan bahwa penggunaan tepung biji koro pedang sebagai substitusi tepung kedelai pada pakan buatan memberikan pengaruh yang nyata terhadap pertumbuhan dan efisiensi pakan pada ikan nila merah, tetapi tidak

berpengaruh terhadap tingkat kelangsungan hidup ikan nila merah. Sebagai pakan ternak juga telah diteliti pada ternak kambing (Akinlade et al., 2007). Igwilo et al. (2007) menambahkan bahwa komposisi nutrisi dan beberapa faktor anti-nutrisi dari biji *C. ensiformis* L yang mentah adalah $24,48 \pm 0,28\%$ protein kasar, $12,40 \pm 0,18\%$ lemak, $2,47 \pm 0,43\%$ serat kasar, $3,22 \pm 0,24\%$ abu, sedangkan biji yang telah dimasak adalah $50,02 \pm 4,71\%$ Protein kasar, $5,48 \pm 0,25\%$ lemak, $2,51 \pm 0,31\%$ serat kasar, $3,69 \pm 0,52\%$ abu. Benih mengandung sejumlah besar K^+ , Zn^{2+} , Na^+ dan kadar Ca^{2+} yang rendah. Benih mentah memiliki tingkat inhibitor trypsin tertinggi, asam fitat dan asam oksalat yang secara signifikan dikurangi ($p < 0,05$) dengan memasak dan penggorengan. Biji yang diolah dapat digunakan dalam formulasi pakan ternak.

Khusus pada bidang lingkungan, *C. ensiformis* L dapat digunakan sebagai fitoakumulator logam berat (Souza et al., 2013), hasil penelitian Romeiro et al. (2007) disimpulkan bahwa tanaman *C. ensiformis* terbukti baik sebagai tanaman akumulator yang toleran terhadap timbal (Pb), sehingga menunjukkan potensinya sebagai suatu tanaman phytoextraction.

Rossi et al. (2012) melakukan penelitian rumah kaca untuk mengevaluasi perkecambahan dan pengembangan tanaman *C. ensiformis* L di media yang mengandung logam berat Cd untuk menentukan apakah ada toleransi terhadap logam ini. Hasil yang diperoleh adalah persen perkecambahan mendekati 100% pada 13 hari setelah disemai. Bibit mengakumulasi sebagian besar Cd yang diaplikasikan pada tunas dan menghasilkan biomassa tinggi. Tidak ada perubahan pada aparatus fotosintesis yang diamati pada konsentrasi Cd yang lebih rendah. Hal ini menunjukkan bahwa tanaman jackbean menunjukkan karakteristik toleransi terhadap Cd dan penelitian lebih lanjut harus dilakukan untuk melaporkan apakah spesies ini dapat digunakan sebagai fitoremediator. Namun Andrade et al. (2005) telah melakukan penelitian pada beberapa tahun sebelumnya, dan menunjukkan bahwa tanaman *C. ensiformis* yang ditanam secara hidroponik mampu tumbuh dan mengakumulasikan logam berat Cu pada bagian akar dan hanya sebagian kecil pada bagian tunas, lebih lanjut Andrade et al. (2009^a) melakukan penelitian dengan menggunakan logam berat seng (Zn), hasil penelitiannya juga menunjukkan bahwa daun tanaman *C. ensiformis* yang

tumbuh dalam konsentrasi Zn tinggi, menunjukkan akumulasi prolin dan peningkatan kandungan asam amino terlarut. Aktivitas utama enzim antioksidan meningkat terutama pada daun tanaman yang tidak diberi perlakuan, yang mengindikasikan peningkatan produksi oksigen reaktif dan Phytochelatins terdeteksi pada daun tanaman baik yang diberi perlakuan Cu ataupun yang tidak (Andrade et al., 2009^b).

Zancheta et al. (2015) mencoba mengkultur *C. ensiformis* L dan *Sorghum bicolor* secara hidroponik dengan memberikan larutan nutrisi yang memiliki konsentrasi Cd yang berbeda, hasil yang diperoleh bahwa suplai Cd sangat mengurangi pertumbuhan tunas dan akar pada kedua spesies. Cd dapat menurunkan laju fotosintesis sebesar 56-86%, konduktansi stomata sebesar 59-85% dan transpirasi sebesar 48-80% tanaman *C.ensiformis*. Konsentrasi dan jumlah akumulasi Cd pada jaringan tanaman sebanding dengan pasokan logam dalam larutan nutrisi. *S. bicolor* lebih toleran dibandingkan dengan *C. ensiformis* terhadap toksin Cd, namun yang terakhir menunjukkan konsentrasi logam dan akumulasi yang lebih besar pada tunas. Oleh karena itu, *C. ensiformis* akan lebih sesuai daripada *S. bicolor* untuk digunakan dalam program fyto remediation Cd berdasarkan phytoextraction.

Suatu tanaman dapat dikategorikan sebagai tanaman hiperakumulator (misalnya Ni) jika tumbuhan yang mengandung Ni dalam konsentrasi sedikitnya 1000 mg.g⁻¹ pada biomasa tajuknya. Sebagian besar tanaman mengalami penurunan produksi biomasa yang signifikan bila pada tajuknya terdapat Ni mencapai 50-100 mg.kg⁻¹ berat kering, sementara tumbuhan hiperakumulator Ni dapat mentolelir hingga 10-20 kali dari tingkat maksimum yang dapat ditolelir tumbuhan normal dan tetap dapat memproduksi biomasa secara normal. Pada dasarnya tumbuhan hiperakumulator mengakumulasi logam dengan ratio konsentrasi pada tajuk, akar lebih dari satu (Hidayati, 2013).

Menurut Priyanto dan Prayitno (2007), logam berat dalam media dengan cepat diserap oleh tanaman, walaupun berada pada konsentrasi yang sangat rendah. Mekanisme penyerapan dan akumulasi logam berat oleh tanaman dapat dibagi menjadi tiga proses yang berkesinambungan, sebagai berikut :

1. Penyerapan oleh akar, agar tanaman dapat menyerap logam, maka logam harus dibawa ke dalam larutan di sekitar akar (rizosfer) dengan

beberapa cara bergantung pada spesies tanaman. Senyawa-senyawa yang larut dalam air biasanya diambil oleh akar bersama air, sedangkan senyawa-senyawa hidrofobik diserap oleh permukaan akar.

2. Translokasi logam dari akar ke bagian tanaman lain. Setelah logam menembus endodermis akar, logam atau senyawa asing lain mengikuti aliran transpirasi ke bagian atas tanaman melalui jaringan pengangkut (xilem dan floem) ke bagian tanaman lainnya.
3. Lokalisasi logam pada sel dan jaringan. Hal ini bertujuan untuk menjaga agar logam tidak menghambat metabolisme tanaman. Sebagai upaya untuk mencegah peracunan logam terhadap sel, tanaman mempunyai mekanisme detoksifikasi, misalnya dengan menimbun logam di dalam organ tertentu seperti akar. Tumbuhan pada saat menyerap logam berat, akan membentuk suatu enzim reduktase di membran akarnya. Reduktase ini berfungsi mereduksi logam yang selanjutnya diangkut melalui mekanisme khusus di dalam membran akar. Pada saat terjadi translokasi di dalam tubuh tanaman, logam yang masuk ke dalam sel akar, selanjutnya diangkut ke bagian tumbuhan yang lain melalui jaringan pengangkut yaitu xilem dan floem. Untuk meningkatkan efisiensi pengangkutan logam diikat oleh molekul kelat. Pada konsentrasi rendah logam berat tidak mempengaruhi pertumbuhan tanaman tetapi pada konsentrasi tinggi akan menyebabkan kerusakan baik pada tanah, air maupun tanaman.

Mikoriza Arbuskula

Asosiasi tanaman dengan jamur atau dikenal dengan istilah mikoriza merupakan suatu interaksi simbiosis mutualisme yang sangat umum terjadi di dunia tumbuhan (Warouw dan Kainde, 2010; Sukmawaty et al., 2016). Fungi Mikoriza Arbuskula mempunyai kemampuan berasosiasi dengan 80 - 96% jenis tanaman walaupun efektivitasnya tidak sama untuk setiap tanaman (Yelianti et al., 2009; Prayudyaningsih dan Ramdana, 2016; Miska et al., 2016), yang tersebar di daerah artik sampai ke daerah tropis dan dari daerah bergurun pasir sampai ke hutan (Halim, 2010; Octavianti dan Ermavitalini, 2014).

Rhizosfer merupakan habitat yang sangat baik bagi pertumbuhan mikroba oleh karena akar tumbuhan menyediakan berbagai bahan organik

yang umumnya menstimulir pertumbuhan mikroba. Bahan organik yang dikeluarkan oleh akar dapat berupa: 1. Eksudat akar : Eksudat akar dibutuhkan mikroorganisme dalam metabolismenya sebagai sumber energi atau substrat dalam melakukan aktivitasnya, bahan yang dikeluarkan dari aktivitas sel akar hidup seperti gula, asam amino, asam organik, asam lemak dan sterol, nukleotida, flavonon, enzim , dan *miscellaneous* (Wihardjaka, 2010). Beberapa hal yang mempengaruhi jumlah dan komposisi eksudat yang dikeluarkan oleh tanaman adalah jenis tanaman, umur tanaman, kondisi lingkungan (suhu, irradiasi, kelembaban tanah, jenis tanah dan nutrisi tanaman, serta tekanan pada tanaman), kondisi lingkungan tempat tumbuh tanaman, dan kehadiran mikroorganisme (Budiyanto, 2015). 2. Sekresi akar : bahan yang dipompakan secara aktif keluar dari akar (Sari, 2015) misalnya, mekanisme sekresi asam organik (mekanisme eksternal) sebagai bentuk respon fisiologis terhadap AI pada tanaman padi (Fajarwati, 2007), 3. Lisat akar : bahan yang dikeluarkan secara pasif saat autolisis sel akar (Sari, 2015) misalnya protein, lemak dan asam-asam amino 4. Musigel : Merupakan bahan dari polisakarida yang disintesa dalam badan golgi sel-sel tudung akar yang bergerak dalam vesikel melalui sitoplasma ke plasmalema (Takehisa et al., 2012), misalnya bahan sekresi akar, sisa sel epidermis, sel tudung akar yang bercampur dengan sisa sel mikroba, produk metabolit, koloid organik dan koloid anorganik (Sari, 2015). Enzim utama yang dihasilkan oleh akar adalah oksidoreduktase, hidrolase, liase, dan transferase. Sedang enzim yang dihasilkan oleh mikroba di rhizosfer adalah selulase, dehidrogenase, urease, fosfatase dan sulfatase (Sudana, 2005).

Beberapa faktor yang mempengaruhi efek rizosfer adalah tipe tanah, kelembaban tanah, pH tanah, temperatur tanah, umur tanaman, dan kondisi tanaman (Budiyanto, 2015). Rhizosfer dibagi menjadi 2 zona utama, yaitu : *Endorhizosfer* : stele, epidermis, korteks, endodermis dan tudung akar, dan *Ektorhizosfer* : area sekeliling akar, mulai dari zona kontak tanah dengan permukaan akar yang dipengaruhi oleh eksudat akar (Ali dan Rante, 2011; Budiyanto, 2015). Bais et al. (2006) menyatakan bahwa rizosfer meliputi ruang di sekitar akar tanaman pada jarak beberapa milimeter yang di dalamnya terdapat kompleks biologis dan

proses ekologi, serta menjadi mediasi interaksi biologi di dalam tanah (Narula et al., 2009; Huang et al., 2014).

Delvian (2005) merangkum beberapa pendapat dari peneliti tentang pertumbuhan dan perkembangan MA, bahwa perkecambahan spora MA dapat di bagi ke dalam 4 fase, yaitu hidrasi, aktivasi, pertumbuhan saluran kecambah, dan pertumbuhan hifa. Pada fase pertama, air masuk ke dalam spora sehingga komponen dalam spora menjadi terhidrasi. Setelah hidrasi sebagian atau seluruh organel dan makromolekul menjadi utuh, asam ribonukleat dan enzim menjadi aktif sehingga terjadi peningkatan aktivitas metabolisme. Dua sampai 10 hari setelah hidrasi spora menjadi aktif dan saluran kecambah mulai tumbuh yang kemudian diikuti dengan pertumbuhan hifa. Infeksi pertama dipengaruhi oleh: (1) perkecambahan spora-spora atau propagul cendawan lainnya, (2) pertumbuhan hifa dalam tanah, pada beberapa MA, pertumbuhan saluran kecambah dari spora yang berkecambah kemungkinan dipengaruhi oleh eksudat akar, kesuburan tanah dan ketersediaan air tanah, dan (3) titik masuk pada akar tanaman. Setiap tahap-tahap ini dapat merupakan tahap pembatas dalam proses pembentukan MA. Infeksi sekunder sangat dipengaruhi oleh fisiologi tanaman inang, karena kebanyakan energi bagi penyebaran hifa diperoleh dari hasil fotosintesis yang ditranslokasikan dari tanaman ke cendawan, baik melalui arbuskula maupun melalui hifa internal.

Abimayu et al. (2012), menjelaskan bahwa peran fungsional MA sudah cukup banyak diteliti dan diulas oleh para pakar di bidang mikoriza. Mikoriza arbuskula memiliki empat peran fungsional sebagai berikut:

1. Bioprosesor mampu bertindak sebagai pompa dan pipa hidup, karena mampu membantu tanaman untuk menyerap unsur hara dan air dari lokasi yang tidak terjangkau oleh akar rambut. Inokulasi mikoriza *Acaulospora* sp.1 pada kadar air tanah 80 % kapasitas lapang dan mikoriza *Glomus* sp. pada kadar air tanah 60 % kapasitas lapang meningkatkan bobot kering tanaman serta serapan N dan P tanaman (Manurung et al., 2015), ini menunjukkan bahwa MA dapat mengefisienkan penggunaan pupuk hingga 50% pada tanaman khususnya pada tanaman jagung (Musfal, 2010).
2. Bioprotektor atau perisai hidup, karena mampu melindungi tanaman dari cekaman biotik (patogen, hama, dan gulma) dan abiotik (suhu, lengas, kepadatan tanah, dan logam berat). Prasasti (2013)

menyatakan bahwa aplikasi mikoriza *Glomus fasciculatum* berpengaruh terhadap tinggi tanaman, berat kering akar, dan berat kering tajuk tanaman kacang tanah varietas Domba yang terserang patogen *Sclerotium rolfsii*.

3. Bioaktivator, karena terbukti mampu membantu meningkatkan simpanan karbon di rhizosfer sehingga meningkatkan aktivitas jasad renik untuk menjalankan proses biogeokimia. Syamsiyah et al. (2014) mengemukakan bahwa ada interaksi nyata antara sterilisasi dengan inokulasi mikoriza terhadap kandungan glomalin, pertumbuhan dan hasil gabah. Inokulasi mikoriza nyata meningkatkan glomalin total (GT) 16 % dan glomalin mudah diekstrak (GEE) 20% pada tanah tak steril, dan pada tanah steril, meningkatkan glomalin total 20% dan glomalin mudah diekstrak 11%. Hasil gabah pada tanah tak steril dengan inokulasi mikoriza lebih tinggi dari tanah steril. Pemberian pupuk hayati seperti mikoriza perlu diintensifkan untuk meningkatkan produktivitas dan keberlanjutan petanian dilahan padi gogo.
4. Bioagregator, karena terbukti mampu meningkatkan agregasi tanah, menurut Wicaksono et al. (2014) bahwa Mikoriza juga mampu memperbaiki agregat tanah sehingga proses aliran massa berjalan lebih baik. Hal inilah yang menyebabkan mikoriza mampu berpengaruh pada berat brangkasan kering batang tanaman .

Mengingat peran fungsional tersebut, MA dapat dimanfaatkan untuk berbagai kepentingan, misalnya: meningkatkan jumlah dan mutu hasil tanaman; mengurangi kebutuhan akan pupuk dan pestisida; mengurangi erosi; mereduksi emisi CO₂; dan menyuburkan tanah. Dengan demikian MA cocok untuk meningkatkan potensi keberhasilan program restorasi lahan pasca penambangan ataupun lahan terdegradasi lainnya.

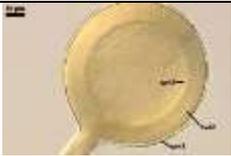
Simanungkalit (2006) menjelaskan bahwa berdasarkan taksonomi terbaru spesies dalam kelompok cendawan MA berjumlah 176, masing-masing 32 *Acaulospora*, 4 *Entrophospora*, 3 *Archaeospora*, 98 *Glomus*, 2 *Paraglomus*, 8 *Gigaspora*, dan 29 *Scutellospora*

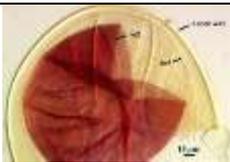
Tabel 2. Taksonomi Mikoriza Arbuskular (Simanungkalit, 2006)

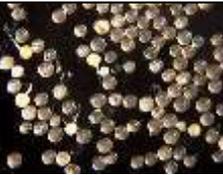
Filum	Ordo	Sub-ordo	Famili	Genus	
Zygomycota	Glomeromycota	Glomineae	Glomaceae	<i>Glomus</i>	
			Acaulosporaceae	<i>Acaulospora</i>	
				<i>Entrophospora</i>	
			Arahaeosporaceae	<i>Archaeospora</i>	
			Paraglomaceae	<i>Paraglomus</i>	
			Gigasporineae	Gigasporaceae	<i>Gigaspora</i>
					<i>Scutellospora</i>

Selain mikoriza dapat bekerja secara sendiri (Wijaksono et al., 2014), mikoriza juga sering berinteraksi dengan rhizobia secara sinergistik menghasilkan bintil akar, pengambilan nutrisi, dan hasil panen yang lebih baik. Penggunaan cendawan mikoriza sebagai agen biologis dalam bidang pertanian dapat memperbaiki pertumbuhan, produktivitas dan kualitas tanaman tanpa menurunkan kualitas ekosistem tanah pada kacang tanah (Sari et al., 2012) dan kedelai (Bertham dan Ironiah, 2009). Utama dan Sudirman (2003) menambahkan bahwa perlakuan mikoriza dan rhizobium nyata meningkatkan panjang tanaman, bobot kering akar, panjang akar, persentase infeksi dan jumlah spora pada *Calopogonium mucunoides*, *Calopogonium ceurelieum*, *Centrosema pubescens*, dan *Pueraria javanica* yang ditumbuhkan pada tanah mineral masam poezolik merah kuning (PMK).

Tabel 3. Beberapa jenis mikoriza yang telah dimanfaatkan dalam meningkatkan pertumbuhan tanaman.

No	Nama mikoriza	Gambar
1	Mikoriza <i>Glomus fasciculatum</i> pada tanaman <i>Dahlia pinnata</i> (Arisusanti dan Purwani, 2013).	
2	Mikoriza <i>Glomus aggregatum</i> pada tanaman Vetiver (<i>Chrysopogon zizanioides</i> (L.) Roberty) (Tauchid et al., 2013).	

No	Nama mikoriza	Gambar
3	Mikoriza <i>Glomus mosseae</i> pada tanaman bawang (<i>Alium cepa</i>) (Simanungkalit, 2006).	
4	Mikoriza <i>Glomus intraradices</i> pada tanaman tomat (<i>Lycopersicon esculentum</i>) (Cavagnaro et al., 2005).	
5	Mikoriza <i>Glomus microcarpum</i> pada tanaman bawang (<i>Alium cepa</i>) (Simanungkalit, 2006).	
6	Mikoriza <i>Glomus macrocarpum</i> pada tanaman bawang (<i>Alium cepa</i>) (Simanungkalit, 2006).	
7	Mikoriza <i>Glomus clarum</i> pada tanaman <i>Schizolobium amazonicum</i> (Siviero et al., 2008).	
8	Mikoriza <i>Gigaspora calospora</i> pada tanaman bawang (<i>Alium cepa</i>) dan semanggi (Simanungkalit, 2006).	
9	Mikoriza <i>Gigaspora margarita</i> pada tanaman sorghum (Chalimah et al., 2007).	 <i>Gigaspora margarita</i>
10	Mikoriza <i>Gigaspora decipiens</i> pada tanaman wortel (Costa et al., 2013).	 A

No	Nama mikoriza	Gambar
11	Mikoriza <i>Gigaspora</i> di temukan pada tanaman jagung (<i>Zea mays</i>) (Puspitasari et al., 2012) dan jeruk (Suamba et al., 2014).	
12	Mikoriza <i>Acaulospora</i> pada tanaman jagung (Puspitasari, et al., 2012) dan jeruk (Suamba et al., 2014).	
13	Mikoriza <i>Acaulospora tuberculata</i> pada tanaman sorghum (Chalimah et al., 2007) bawang merah (Sulthoni, 2016).	
14	Mikoriza <i>Acaulospora scrobiculata</i> pada tanaman <i>Pericopsis mooniana</i> (Husna, 2014), Tebu (Kumalawati, 2015), kedelai (Muis et al., 2016).	
15	Mikoriza <i>Acaulospora denticulate</i> pada ubi jalar dan ubi kayu (Widiatma et al., 2016).	
16	Mikoriza <i>Acaulospora mellea</i> pada <i>Rhizoctonia solani</i> dan jagung (Djaenuddin et al., 2017).	
17	Mikoriza <i>Acaulospora morrowiae</i> pada produksi Glmalin dan proses pembentukan agregat tanah (Saidi et al., 2014).	
18	Mikoriza <i>Acaulospora rugosa</i> pada tanaman jagung (Pierre et al., 2014).	

No	Nama mikoriza	Gambar
19	Mikoriza <i>Acaulospora dilatata</i> pada tanaman <i>Pongamia pinnata</i> (Jha et al., 2014).	
20	Mikoriza <i>Scutellospora</i> pada tanaman jagung (Puspitasari et al., 2012)	

Phitorhizoremediasi

Fitoremediasi merupakan salah satu metode yang menggunakan tumbuhan untuk menghilangkan, memindahkan, menstabilkan atau menghancurkan bahan pencemar baik berupa senyawa organik maupun anorganik. Perlakuan dengan menggunakan organisme hidup semakin mendapat perhatian karena merupakan alternatif yang efektif, murah dan aman secara ekologis. Dasar dari fitoremediasi adalah adanya kemampuan tumbuhan mengakumulasi logam atau senyawa organik (fitoakumulasi) sesuai dengan karakteristik tumbuhan yang digunakan.

Fitoremediasi dibagi beberapa kelompok yaitu phytofiltration, phytoextraction, phytostabilization, hytodegradation, dan phytovolatization tergantung dari mekanisme remediasinya (Lone et al., 2008; Marques et al., 2009; Laghlimi et al., 2015). Phytofiltration merupakan proses penghilangan logam dari air yang tercemar oleh akar atau anakan tumbuhan (Natarajan et al., 2008; Islam et al., 2013). Phytoextraction melibatkan kegunaan tumbuhan untuk menghilangkan kontaminan di dalam tanah (Saifullah et al., 2010; Hu et al., 2013; Kacalkova et al., 2015). Phytostabilization melibatkan akar untuk menyerap polutan dari dalam tanah dan menyimpannya di dalam rizosfir, dan mengurangi penyebaran polutan (Wu et al., 2011; Eissa, 2014; Shackira dan Puthur, 2017). Phytodegradation merupakan kegunaan tumbuhan untuk berasosiasi dengan mikroorganisme dalam mengurangi kadar polutan (Headley et al., 2008; Dolphen dan Thiravetyan, 2015). Phytovolatization melibatkan kegunaan tumbuhan untuk menghilangkan polutan melalui proses penguapan pada foliage daun, seperti pada polutan Se dan Hg (Sakakibara et al., 2007).

Beberapa tanaman yang tumbuh di lingkungan mengandung logam berat, telah mengembangkan kemampuannya untuk dapat mengakumulasi logam tersebut dalam konsentrasi yang tinggi tanpa memperlihatkan gejala toksisitas. Tanaman-tanaman yang dapat menyerap dan mengakumulasi logam berat dan metaloid (semi logam) dalam konsentrasi tinggi disebut sebagai tanaman hiperakumulator. Tanaman hiperakumulator setidaknya harus mampu mengakumulasi logam Cd lebih dari 100 mg.kg^{-1} ; As, Cu, Pb 1000 mg.kg^{-1} dan Zn $10.000 \text{ mg.kg}^{-1}$ dari total berat kering tanaman atau dari total akumulasi dalam jaringan daun (Tamura et al., 2005; Pallardy, 2008).

Haruna et al. (2012) mengemukakan bahwa pada tanaman kangkung darat yang berumur 2 minggu, terdapat Cu dalam akar sebanyak 5,3403 ppm, batang 5,1117 dan daun 2,6637. Pada usia 4 minggu berturut-turut pada akar, batang dan daun yaitu 10,6998; 5,8281 dan 2,0666 ppm. Sedangkan pada usia 6 minggu pada akar 10,4605, daun 9,1863 dan pada batang 7,7839 ppm. Dari hasil penelitian dapat disimpulkan bahwa tanaman kangkung darat dapat digunakan sebagai fitoremediator tanah yang terkontaminasi logam Cu.

Hasil penelitian Viobeth et al. (2013) menunjukkan bahwa Kiambang (*Salvinia molesta*) lebih optimal melakukan penurunan konsentrasi Ni dibandingkan penurunan konsentrasi Pb. Hasil penurunan akhir konsentrasi Pb $0,5 \text{ mg.L}^{-1}$ dengan berat basah Kiambang 30;60 gram adalah $0,247 \text{ mg.L}^{-1}$ dan $0,182 \text{ mg.L}^{-1}$, sedangkan konsentrasi Pb $0,8 \text{ mg.L}^{-1}$ dengan berat basah Kiambang 30;60 gram adalah $0,412 \text{ mg.L}^{-1}$ dan $0,304 \text{ mg.L}^{-1}$. Penurunan akhir konsentrasi Ni $2,5 \text{ mg.L}^{-1}$ adalah 0 mg.L^{-1} , sedangkan penurunan konsentrasi Ni 3 mg.L^{-1} adalah $0,670$; $0,252 \text{ mg.L}^{-1}$. Kiambang dapat dikategorikan sebagai *metal accumulator species*.

Hamzah dan Setiawan (2010) menyimpulkan hasil penelitiannya bahwa secara umum konsentrasi logam berat di Muara Angke pada akar mangrove lebih tinggi dibandingkan pada daun, sedimen dan air dengan konsentrasi: akar (12,17-99,88 ppm), daun (2,07-85,48 ppm), sedimen (18,64-69,3 ppm), air ($<0,006$ - $0,0062$ ppm). Konsentrasi Zn paling tinggi dibandingkan dengan Pb dan Cu. Akumulasi logam berat pada daun dan akar bisa dihitung melalui BCF (BCF; rasio kandungan konsentrasi logam berat dalam akar atau daun dengan sedimen). Nilai BCF daun tertinggi pada logam Pb species *Avicennia marina* (3,45) dan BCF akar juga

tertinggi pada logam Pb pada *Avicennia marina* (3,17). Nilai TF (TF; rasio konsentrasi logam berat dalam daun dan akar) tertinggi ditemukan pada spesies *Rhizophora mucronata* (1,59). Untuk tujuan fitoremediasi, *Sonneratia caseolaris* dan *Avicennia marina* merupakan spesies mangrove yang dapat digunakan di daerah Muara Angke.

Bunga matahari telah banyak diadopsi untuk pengelolaan phytomanagement dari tanah yang terkontaminasi logam berat (HMs) karena produksi dan kapasitas biomasnya yang tinggi untuk akumulasi logam. Bunga matahari dapat mentolerir efek toksik dari HMs tertentu melalui mekanisme yang berbeda, seperti peningkatan aktivitas enzim antioksidan, pengendapan pada bagian tanaman yang tidak aktif, dan stimulasi osmolytes. Stres yang disebabkan oleh HMS berdampak negatif pada perkecambahan biji, status gizi, fotosintesis, dan pertumbuhan bunga matahari. Namun, respons bunga matahari terhadap stres ini bervariasi dengan kultivar / varietas, jenis tanah, jenis logam, dosis, dan lamanya paparan logam. Pemilihan kultivar toleran yang tepat bersamaan dengan praktik agronomi dapat menjadi strategi efektif untuk pengelolaan phytomanagement tanah yang terkontaminasi dengan HMS (Rizwan et al., 2016)

Fitoremediasi telah diterima secara luas sebagai pendekatan ekonomi, ramah lingkungan dan efisien untuk pengelolaan tanah yang terkontaminasi oleh uranium. Sebagai spesiasi uranium dan bioavailabilitasnya terkait erat dengan sifat tanah, seperti pH, bahan organik, fosfat, karbonat, dan oksida besi, mereka bertindak sebagai faktor kunci yang mempengaruhi pengambilan uranium oleh tanaman. Berdasarkan pengetahuan tentang faktor-faktor ini, berbagai amandemen tanah seperti asam sitrat, kalsium karbonat, dan fosfat untuk meningkatkan ketersediaan hayati uranium telah diajukan. Selain itu, inokulasi tanaman dengan amandemen biologis seperti jamur mikoriza arbuskular juga telah muncul sebagai strategi remediasi yang efektif untuk tanah yang terkontaminasi uranium (Malaviya dan Singh, 2013).

Perkembangan ilmu pengetahuan di bidang fitoremediasi semakin pesat, akhir-akhir ini telah ditemukan bentuk fitoremediasi yang lain, yaitu phytorhizoremediation, merupakan jenis fitoremediasi yang spesifik dengan melibatkan tanaman dan mikroba rhizospheric (Kala, 2014; Bisht et al., 2015). Meier et al. (2012) telah mengemukakan sebelumnya bahwa

penggunaan mikoriza mikoriza arbuskula (AMF), dan perannya dalam fitoremediasi, telah muncul sebagai pilihan baru dan menarik. Selain kontribusi AMF yang terkenal dalam penyerapan nutrisi dan pertumbuhan tanaman, jamur ini juga mengembangkan beragam mekanisme yang mendorong tanaman untuk tumbuh di tanah dengan konsentrasi logam tinggi.

Fungi mikoriza arbuskula (MA) yang telah diadaptasikan selama dua belas tahun pada 13 logam berat (Al, As, Ba, Cd, Cr, Cu, Hg, Mo, Ni, Pb, Se, Sr and Zn), telah ditemukan kolonisasi mikoriza yang relatif seimbang, dan menunjukkan potensi untuk memilih fungi yang toleran untuk lahan-lahan yang terkontaminasi logam berat (Biro et al., 2010).

Beberapa peneliti memberikan penjelasan dalam penelitian Arisusanti dan Purwani (2013), bahwa mekanisme perlindungan terhadap logam berat dan unsur toksik oleh mikoriza dapat melalui efek filtrasi, menonaktifkan secara kimiawi, atau akumulasi unsur tersebut dalam hifa jamur. Hal ini terjadi karena mikoriza diketahui dapat mengikat logam tersebut pada gugus karboksil dan senyawa pektak (hemiseselulosa), pada matriks antar permukaan kontak mikoriza dan tanaman inang, pada selubung polisakarida dan dinding sel hifa. Mikoriza dapat mengikat ion-ion logam dalam dinding sel hifanya dan dapat melindungi tanaman dari ion-ion logam tersebut. Logam berat disimpan dalam crystaloid di dalam miselium jamur dan pada sel-sel korteks akar tanaman bermikoriza. Sehingga dapat disimpulkan bahwa mikoriza dapat meningkatkan toleransi tanaman terhadap logam beracun dengan melalui akumulasi logam-logam dalam hifa eksternal sehingga mengurangi serapannya ke dalam tanaman inang. Pemanfaatan jamur mikoriza dalam bioremediasi tanah tercemar, disamping dengan akumulasi bahan tersebut dalam hifa, juga dapat melalui mekanisme pengkomplekan logam tersebut oleh sekresi hifa eksternal. Hal ini menunjukkan bahwa ada mekanisme filtrasi, sehingga bahan beracun tersebut tidak sampai diserap oleh tanaman.

Hasil penelitian Arisusanti dan Purwani (2013) menunjukkan dosis 25 gram mikoriza *Glomus fasciculatum* berpengaruh nyata dalam meningkatkan efisiensi serapan Pb serta meningkatkan akumulasi logam Pb pada akar dan menghambat akumulasi Pb pada batang dan daun tanaman *Dahlia pinnata*.

Andrade (2005) mengemukakan bahwa *Glomus etunicatum* menunjukkan kinerja terbaik saat dikaitkan dengan tanaman jackbean dan bisa menjadi asosiasi yang menjanjikan untuk fitoremediasi tanah yang terkontaminasi Cd. Lebih lanjut dijelaskan bahwa *Glomus etunicatum* juga mampu mempertahankan simbiosis yang efisien dengan tanaman kacang jack bean di tanah yang terkontaminasi Zn, meningkatkan kinerja tanaman di bawah kondisi tersebut, yang kemungkinan disebabkan oleh kombinasi perubahan fisiologis dan nutrisi yang disebabkan oleh hubungan mutualistik antara jamur dan tanaman. Serapan Zn yang disempurnakan oleh tanaman kacang jack bean yang diinokulasi dengan AMF memungkinkan untuk tujuan fitoremediasi (Andrade, 2009).

Rezvania et al. (2015) mengemukakan bahwa tanaman barley yang diinokulasi dengan MA species *Glomus mosseae* dan ditumbuhkan pada tanah yang tercemar kadmium (Cd), kobalt (Co), dan timbal (Pb) dalam percobaan rumah kaca, dan menunjukkan bahwa barley yang bermikoriza secara signifikan menyerap sejumlah Pb lebih tinggi dibandingkan dengan Cd dan Co, dan spesies MA juga secara signifikan menurunkan serapan Cd dan Co oleh barley, yang menunjukkan efek pengurang dari *G. mosseae* pada cekaman logam berat tersebut. Namun pengaruh jamur MA terhadap serapan logam berat dari tanaman inang bergantung pada sifat fisik dan kimia tanah yang terkontaminasi dan jenis logam berat dan durasi beban yang terkontaminasi pada tanaman inang dan spesies jamur (Khade dan Adholeya, 2013).

Tabrizi et al. (2015) mengemukakan bahwa dengan meningkatnya konsentrasi Pb dan Cd pada tanah, pertumbuhan dan produksi pot marigold (*Calendula officinalis L.*) menurun secara signifikan; Cd memiliki dampak negatif lebih besar daripada Pb. Namun, jamur mikoriza mengurangi dampak ini dengan meningkatkan pertumbuhan dan produksi tanaman. Pot marigold memiliki konsentrasi sejumlah Pb yang tinggi, terutama Cd pada akar dan tunas; tanaman bermikoriza mengalami akumulasi logam ini lebih besar, hingga di bawah 80 mg / kg Cd tanah⁻¹ mengakumulasikan 833,3 dan 1585,8 mg Cd, masing-masing pada tunas dan akar.

Tiga percobaan pot disiapkan oleh Zaefarian et al. (2013) untuk menentukan seberapa efisien jamur mikoriza mempengaruhi serapan, translokasi, distribusi fosfor berlabel (^{32}P), fosfor (P), dan logam berat pada tanaman alfalfa (*Medicago sativa* L.). Dalam percobaan 1 dan 2, efisiensi spesies jamur mikoriza arbuskula yang berbeda, yaitu *Glomus mosseae*, *G. etunicatum*, *G. intraradices* dan strain campuran (*G. mosseae*, *Gigaspora hartiga*, dan *G. fasciculatum*) terhadap penyerapan, translokasi, distribusi ^{32}P dan P pada tanaman alfalfa diselidiki. Dalam percobaan 3, efisiensi *G. mosseae* terhadap penyerapan dan distribusi logam berat [kadmium (Cd), kobalt (Co), timbal (Pb), dan kombinasi] diuji. Hasil percobaan 1 dan 2 menunjukkan bahwa *G. mosseae* adalah yang paling efektif dalam meningkatkan hasil serapan ^{32}P dan P. Percobaan 3 menunjukkan bahwa pada tanah yang terkontaminasi tiga logam berat, tanaman inokulasi memiliki Co ($32,56 \text{ mg.kg}^{-1}$) dan Pb ($289,50 \text{ mg.kg}^{-1}$) yang lebih besar, dan *G. mosseae* meningkatkan translokasi logam berat ke tunas. Oleh karena itu, mycorrhizal alfalfa yang bersimbiosis dengan *G. mosseae* dapat digunakan untuk remediasi tanah yang tercemar logam berat dengan tingkat efisiensi yang tinggi.

Zheng et al. (2015) menyajikan metode pengendalian berat logam berat (HM) yang efisien di lahan basah yang terkontaminasi HM dengan tingkat kelembaban tanah yang bervariasi melalui introduksi jamur mikoriza arbuskula ekstrinsik (FAM) ke dalam tanah basah alami yang mengandung spesies FAM indigenous. Percobaan kultur pot dirancang untuk mengetahui pengaruh dua kandungan air tanah (5-8% dan 25-30%), lima inokulan FAM ekstrinsik (*Glomus mosseae*, *G. clarum*, *G. claroideum*, *G. etunicatum*, dan *G. Intraradices*), dan kontaminasi HM pada kolonisasi akar, pertumbuhan tanaman, dan penyerapan elemen oleh planlet coomond reed (*Phragmites australis* (Cav.) Trin Exull Steudel) di lahan basah. Penelitian ini menunjukkan prevalensi mikoriza pada semua akar planlet *P. australis*, terlepas dari inokulasi FAM ekstrinsik, variasi kadar kelembaban tanah atau kadar HM. Tampaknya inokulasi FAM ekstrinsik yang berbeda secara efektif menurunkan konsentrasi HM pada jaringan atas *P. australis* di dua level kelembaban tanah. Namun, jenis logam, konsentrasi logam, dan kelembaban tanah juga harus menjadi faktor yang sangat penting yang mempengaruhi penyerapan unsur tanaman pada ekosistem lahan basah. Selain itu, tingkat kelembaban tanah berpengaruh

secara signifikan terhadap pertumbuhan tanaman (termasuk tinggi, dan berat kering akar dan tunas (DW)), dan inokulasi FAM ekstrinsik mempengaruhi DW tunas secara berbeda.

Assadi et al. (2015) melakukan penelitian dengan menggunakan tanaman *stative* (*Limonium sinuatum*) yang di exposed dengan Cd (0, 15, 30, 60 mg.kg⁻¹tanah) atau Pb (0, 100, 150, 300 mg.kg⁻¹tanah) dalam percobaan pot, untuk menilai toleransi terhadap masing-masing logam dan mempelajari kemampuan phytoaccumulasinya. Manfaat mikoriza (campuran *Glomus mosseae* dan *G. intraradice*) juga dipelajari secara bersamaan. Expous tunggal terhadap Cd atau Pb mengurangi pertumbuhan tanaman, namun *stative* masih relatif toleran terhadap kedua logam tersebut. Tanaman mengakumulasi kedua logam di akarnya; sedikit translokasi ke bagian tunas. Total Pb dan Cd yang terakumulasi oleh akar kira-kira 2 dan 3 kali lebih tinggi pada tanaman bermikoriza dibanding tanaman non mikoriza (49 versus 147 dan 595 versus 956 µg.plant⁻¹); Namun, mikoriza mengurangi fitotoksisitas logam. Hasilnya menunjukkan bahwa *stative* adalah kandidat potensial untuk digunakan sebagai tanaman hias di sisi yang terkontaminasi timbal dan kadmium, terutama yang diinokulasi dengan mikoriza arbuskular. Selain itu, akan berguna sebagai agen pengendali Pb atau Cd dengan cara fitostabilisasi.

TUJUAN DAN MANFAAT PENELITIAN



Hasil penelitian merupakan data kuantitatif fenomena mikoriza arbuskula yang bersimbiosis dengan akar tanaman *C. ensiformis* untuk membantu proses rehabilitasi lahan pasca tambang nikel. Data ini dapat dimanfaatkan untuk membantu percepatan kegiatan rehabilitasi lahan pasca tambang nikel yang dilaksanakan oleh Vale Indonesia; Memberikan informasi kepada Dinas Pertambangan, Energi dan Lingkungan Hidup mengenai rehabilitasi lahan pasca tambang menggunakan fitoakumulator tanaman *C. ensiformis* yang diintroduksi

mikoriza arbuskular; Memberikan informasi kepada masyarakat akademik mengenai mikoriza arbuskula, dan akumulasi nikel pada organ tanaman *C. ensiformis* sebagai calon tanaman fitoakumulator nikel; Memberikan informasi kepada masyarakat khususnya bagi masyarakat pengguna lahan pasca tambang nikel tentang kompatibilitas mikoriza arbuskula dan tanaman *Canavalia ensiformis*; Memberikan informasi kepada masyarakat petani sekitar lahan kontrak karya tentang kemampuan mikoriza arbuskula dalam membantu pertumbuhan tanaman *C. ensiformis*.

Secara khusus penelitian ini bertujuan:

1. Mengetahui tingkat infeksi akar tanaman *C. ensiformis* yang diintroduksi mikoriza arbuskula di lahan pasca tambang nikel.
2. Mengetahui pertumbuhan akar tanaman *C. ensiformis* yang diintroduksi mikoriza arbuskula di lahan pasca tambang nikel.
3. Mengetahui jumlah akumulasi dan konsentrasi nikel pada organ tanaman *C. ensiformis* yang diintroduksi mikoriza arbuskula.
4. Mengetahui kemampuan *C. ensiformis* yang diintroduksi mikoriza arbuskula dalam rehabilitasi lahan pasca tambang nikel.

METODE PENELITIAN



Penelitian ini merupakan penelitian kuantitatif yang dilaksanakan di lahan bekas tambang nikel. Rancangan percobaan yang digunakan adalah Rancangan Acak Kelompok dengan perlakuan mikoriza arbuskula genus *Acaulospora* yang diisolasi dari lingkungan yang berbeda, yaitu: Tanpa *Acaulospora*; *Acaulospora denticulata* (*A. denticulata*) indiginous dan *Acaulospora tuberculata* (*A. tuberculata*) eksoginuous, tiap perlakuan diulang 3 kali, sehingga didapatkan 9 unit percobaan, setiap unit terdiri dari 20 polybag. Data hasil pengamatan dilakukan analisis ragam untuk menentukan pengaruh perlakuan (Gomes dan Gomes, 1984), dan dilakukan uji lanjutan dengan membandingkan

dua nilai tengah, menggunakan uji pembandingan Duncan (Steel dan Torrie, 1993).

Waktu dan Lokasi Penelitian

Penelitian berlangsung dari Desember 2016 sampai Maret 2017 di Nursery Vale Indonesia, Sorowako, Kec. Nuha, Kab. Luwu Timur. Berdasarkan Koppen-Geiger klasifikasi iklim Sorowako adalah Af (iklim hutan hujan tropis) dengan suhu rata-rata tahunan 24,2 °C dan curah hujan tahunan rata-rata 2019 mm.

Populasi dan Sampel

Populasi penelitian merupakan tanaman kacang koro pedang (*Canavalia ensiformis* = *C. ensiformis*) yang ditanam dalam polybag. Sampel yang digunakan merupakan organ tanaman diperoleh dari masing-masing populasi perlakuan.

Teknik Pengumpulan Data

Pengumpulan data dilakukan dengan cara pengamatan langsung di lokasi penelitian dengan cara mengukur, menimbang, dan beberapa peubah menggunakan data hasil analisis sampel dari laboratorium. Peubah yang diamatai meliputi:

1. Analisa keberadaan mikoriza.

Analisis keberadaan mikoriza *Acaulospora* sp dilakukan dengan menggunakan mikroskop, pada:

- a. Jaringan akar *C. ensiformis* yang terinfeksi (%)
- b. Media tanam *C. ensiformis* (rhizosfer).

2. Reduksi Nikel.

Reduksi nikel oleh *C. ensiformis* menggunakan data hasil analisis laboratorium yang selanjutnya dimasukkan ke dalam persamaan dari Aprilia dan Purwani (2013).

- a. Akumulasi nikel.

$$= \frac{\text{Berat logam pada (akar/batang/daun/bunga/polong/biji)}}{\text{Berat tanaman (akar/batang/daun/bunga/polong/biji)}} \quad (\text{ppm}) \quad (2)$$

b. Efisiensi penyerapan nikel.

$$= \frac{\text{Berat total logam pada tanaman}}{\text{Berat logam dalam tanah}} \times 100 \quad (3)$$

c. Laju reduksi nikel.

$$= \frac{\text{Jumlah akumulasi nikel}}{\text{Waktu}} \quad (\text{ppm.jam}^{-1}) \quad (4)$$

3. Analisis tanah.

Analisis tanah dilakukan sebelum dan setelah percobaan dengan menggunakan contoh tanah komposit. Peubah yang diamati adalah tekstur tanah, KTK, pH, N, P, K, S dan Ni. Sampel tanah dianalisis di laboratorium kimia dan kesuburan tanah, departemen ilmu tanah, Fakultas Pertanian, Universitas Hasanuddin. Tekstur tanah di tentukan dengan metode hydrometer, pH tanah diukur dengan pH meter, C-Organik dengan metode Walkley dan Black, Kation basa (KB) dengan amonium asetat yang diextrak pada pH 7 dan diukur menggunakan spectrometer absorption atomic, kapasitas tukar kation (KTK) dengan 1 M NH₄OAc, rumus dasar % BS (kation basa/KTK)x100%. Konsentrasi unsur hara tanah diukur di laboratorium kimia, Politeknik Ujung Pandang, menggunakan Specrophotometer Florace X-Ray.

Teknik Analisis

Analisis ragam dilakukan untuk setiap peubah, jika terdapat pengaruh yang nyata, dilakukan uji pembandingan Duncan pada taraf 5 % atau 1 %.

Pelaksanaan Penelitian

Penanaman *C. ensiformis* L dan Aplikasi *A. denticulata* indiginous dan *A. tuberculata* eksoginuous.

1. Persiapan media tanam

Media tanam yang digunakan berasal dari tanah kupasan (*overburden*) yang akan digunakan untuk menutup area yang telah ditambang (*beckfilling*) di lokasi RANTE. Tanah dimasukkan ke dalam wadah polybag hingga 85% dari kapasistas polybag (ukuran polybag 30

cm x 40 cm). Analisis tanah untuk mengetahui sifat fisik dan kimia tanah dilakukan sebelum dan sesudah penelitian.

2. Penanaman.

Penanaman dilakukan menggunakan benih *C. ensiformis* komposit yang telah direndam. Setiap polibag diisi benih sebanyak 1 - 2 benih. Setelah benih berkecambah, dilakukan penjarangan dengan menyisakan satu tanaman setiap polibag. Pada tahap ini, aplikasi perlakuan *Acaulospora* yang terdapat dalam propagul sebanyak 28,38 g (*A. denticulata* indiginous) dan 6 g (*A. tuberculata* eksoginuous) yang masing-masing mengandung 21,6 atau 22 spora. Beberapa hasil penelitian sebelumnya merekomendasikan untuk menggunakan 10-30 spora.

3. Pemeliharaan

Pemeliharaan dilakukan dengan melakukan pembuatan batas area penelitian, penyiraman, pemupukan, pengendalian gulma, dan pengendalian hama dan penyakit.

4. Pengamatan.

Pengukuran untuk peubah reduksi nikel dilakukan saat tanaman berumur 30, 60, dan 90 hari setelah tanam (HST), sedangkan analisa keberadaan mikoriza dilaksanakan di akhir penelitian.

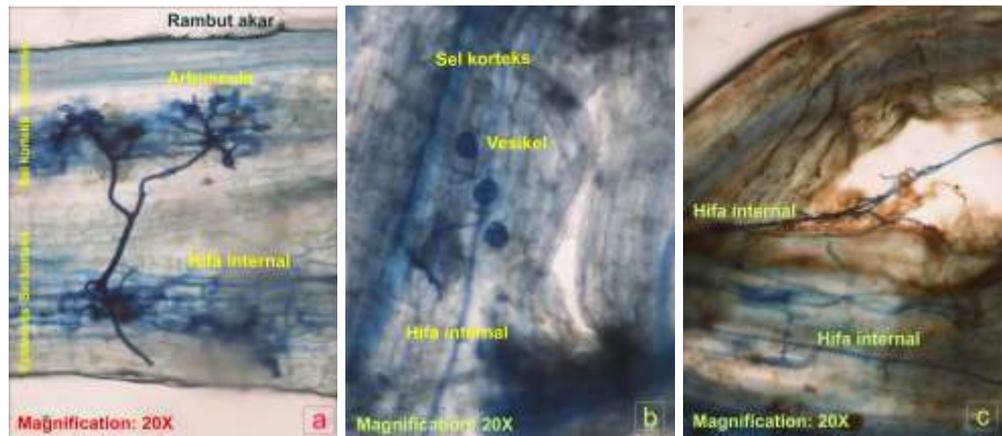
HASIL DAN PEMBAHASAN



Kemampuan mikoriza untuk mengkolonisasi jaringan akar tanaman *C. ensiformis* dapat diketahui dengan mengambil sampel akar tanaman dan diberi pewarnaan Tryphan Blue dalam metode Clearing dan Staining dari Jackson dan Mason (1984). Tahapan proses pewarnaan akar dapat dilihat pada Lampiran 1.

Hasil analisis varians menunjukkan bahwa introduksi mikoriza arbuskula berpengaruh tidak nyata terhadap persentase akar tanaman *C. ensiformis* yang terinfeksi (Tabel Lampiran 2). Namun, rata-rata persentase akar tanaman *C. ensiformis* yang terinfeksi mikoriza arbuskula menunjukkan bahwa perlakuan *Acaulospora* sp. yang diisolasi dari lingkungan yang berbeda mampu menghasilkan akar yang terinfeksi oleh hifa dan atau vesikel *Acaulospora* sp. (Tabel Lampiran 3 dan Gambar 2), namun ada kecenderungan persentase akar *C. ensiformis* yang terinfeksi

oleh *A. denticulata* indiginous lebih tinggi 95,24% dibanding tanaman tanpa *Acaulospora* sp, sedangkan *A. tuberculata* eksoginous hanya mampu menghasilkan akar yang terinfeksi 52,38% lebih tinggi dibanding tanaman tanpa *Acaulospora* sp (Gambar 3).



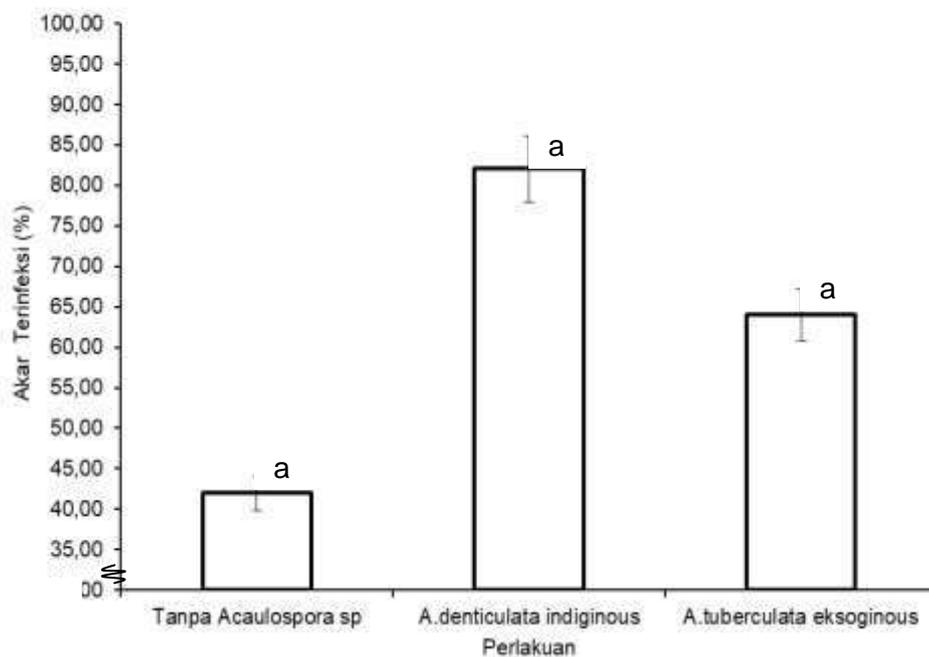
Gambar 2 . Penampang akar *C. ensiformis* yang terinfeksi oleh *Acaulospora* sp. (a) Tanpa *Acaulospora* sp, (b) *A. denticulata* indiginous, (c) *A. tuberculata* eksoginous.

Persentase akar yang terinfeksi pada perlakuan tanpa *Acaulospora* sp (kontrol) sangat sedikit, hal ini diduga akar yang terinfeksi terjadi secara alami dan dilakukan oleh mikoriza indiginous yang terbawa dalam media tanam.

Acaulospora denticulata indiginous dapat menghasilkan akar *C. ensiformis* yang terinfeksi lebih banyak, diduga karena mikoriza telah beradaptasi pada lingkungan dengan konsentrasi nikel yang tinggi (Tabel Lampiran 1), sehingga dapat membantu tanaman dalam proses pertumbuhan tanaman dan menjalankan fungsinya sebagai agen hayati. Selain itu *A. denticulata* indiginous juga dapat diduga telah mengalami tahap adaptasi pada tingkat domestikasi, tahap dimana proses adaptasi organisme sudah dapat menyesuaikan diri dengan lingkungannya dan sudah dapat menjalankan kehidupannya untuk melewati siklus hidupnya dengan baik (Olsen dan Wendel, 2013; Chaudhary, 2013).

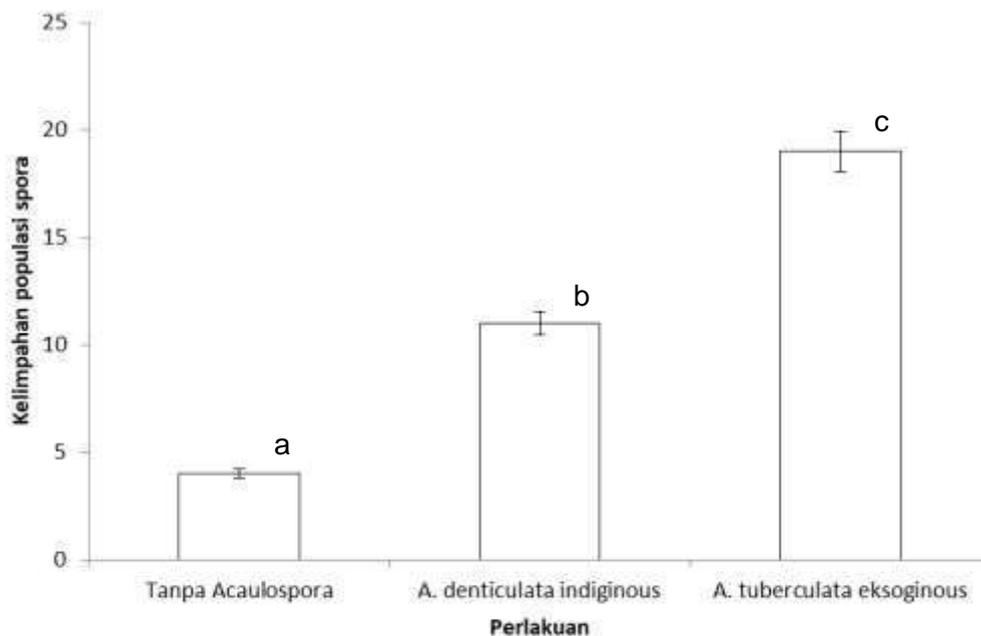
Canavalia ensiformis yang diintroduksi *A. tuberculata* eksoginous juga ditemukan bagian akar yang mengalami infeksi, namun diduga infeksi tersebut dilakukan oleh mikoriza indiginous yang terbawa pada media

tanam, sementara *A. tuberculata* eksoginous kemungkinan mengalami proses interaksi dengan mikoriza indiginous dan masih berusaha memperoleh energi dari tanaman inang untuk mejalani salah satu tahapan adaptasi pada lingkungan baru yang memiliki kandungan nikel yang tinggi yaitu tahap aklimatisasi, tahap dimana organisme berusaha untuk dapat mempertahankan hidup di tempat baru dengan mengubah kemampuan fisiologis dan atau morfologi dalam menyesuaikan diri dengan lingkungan baru (Somero, 2009; Vettori et al., 2010). Menurut Karimi et al. (2011) bahwa adaptasi ini telah dikaitkan dengan dua faktor, pertama adalah penurunan secara bertahap ketersediaan logam akibat reaksi imobilisasi yang terjadi di rizosfer, sedangkan faktor lain adalah perubahan secara bertahap struktur komunitas mikroba, berdasarkan perubahan profil asam lemak fosfolipid (Quideau et al., 2016) yang menghasilkan organisme lebih toleran.



Gambar 3. Persentase akar *C. ensiformis* yang terinfeksi oleh *Acaulospora* sp. Angka yang diikuti oleh simbol (a, b, c) yang sama menunjukkan tidak ada perbedaan antar perlakuan berdasarkan uji Duncan pada taraf 5%.

Produktifitas mikoriza dalam menjalankan fungsinya sebagai agen hayati dilahan pasca tambang nikel pada *C. ensiformis* dapat diketahui dengan menghitung kelimpahan spora yang tertinggal dalam media tanam.



Gambar 4. Rata-rata Kelimpahan spora *Acaulospora* sp. per 100 g sampel media tanam *C. ensiformis* setelah penanaman. Angka yang diikuti oleh simbol (a, b, c) yang sama menunjukkan tidak ada perbedaan antar perlakuan berdasarkan uji Duncan pada taraf 5%.

Hasil analisis varians menunjukkan bahwa introduksi mikoriza arbuskula pada tanaman *C. ensiformis* berpengaruh nyata terhadap kelimpahan spora pada media tanah setelah penanaman (Tabel Lampiran 2). Hasil perhitungan kelimpahan spora mikoriza pada 100 gr sampel media tanam setelah penanaman menunjukkan bahwa spora *A. tuberculata* eksoginous lebih banyak ditemukan dalam media (Gambar 4), hal ini diduga spora belum berhasil masuk dan menginfeksi akar tanaman inang, sehingga tertinggal dalam media. Lainnya halnya pada *A. denticulata* indiginous yang cenderung lebih sedikit terdapat didalam media diduga merupakan hasil pembelahan dari spora tetua yang telah

diintroduksi. Sedangkan pada perlakuan kontrol spora yang ditemukan adalah spora bawaan dari media yang jumlahnya relatif sedikit.

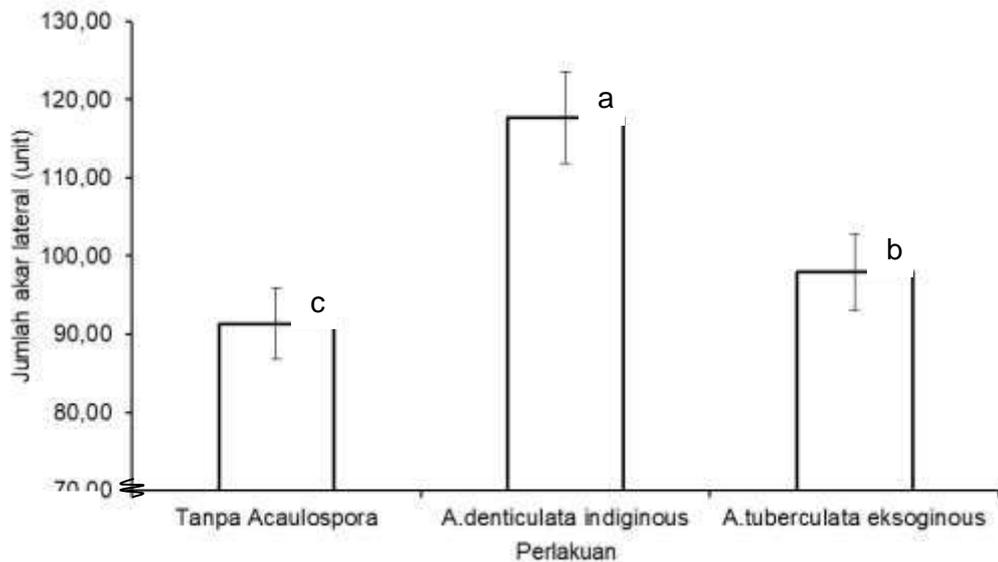
Fenomena Pertumbuhan Akar Tanaman

Pembentukan cabang akar (akar lateral) dimulai dengan pembelahan periklinal yang terjadi pada beberapa sel perisikel. Sel yang dihasilkan membelah lagi secara periklinal atau antiklinal sehingga terjadi kumpulan sel. Pada waktu primordium akar bertambah panjang, korteks ditembus sehingga akar lateral muncul di permukaan akar utama (*parient root*) (Pulka, 2013 dan Hidayat, 2015). Hal senada diungkapkan oleh Dubrovsky et al. (2000); Zhupanov (2013) bahwa pada angiospermae primordium akar lateral terbentuk dari pembelahan periklinal dan antiklinal dari sebuah gugus sel perisikel. Ivanchenko (2008); Benkova dan Hejatko (2009); Fukaki dan Tasaka (2009); Overvoorde et al. (2010) menambahkan bahwa peran beberapa hormon tanaman dan efek sinyal dari lingkungan menunjukkan bahwa auksin adalah pengatur dominan pengembangan akar lateral. Lebih lanjut Etemadi et al. (2014); Neto et al. (2017), juga mengemukakan bahwa hormon tanaman seperti derivat auksin cenderung menjadi sinyal saat pembentukan simbiosis MA. Kontribusi auksin terhadap pembentukan simbiosis MA diduga merupakan faktor penting untuk pengembangan akar lateral yang merupakan lokasi infeksi yang disukai oleh jamur.

Analisis ragam jumlah akar lateral tanaman *C. ensiformis* menunjukkan bahwa perlakuan *Acalauspora* sp. yang diisolasi dari lingkungan yang berbeda memberikan pengaruh yang sangat nyata terhadap jumlah akar lateral, tetapi berpengaruh tidak nyata pada panjang akar, volume akar, berat kering akar, dan ratio tajuk:akar *C. ensiformis* (Tabel Lampiran 4). Namun berdasarkan nilai tengah dan persentase selisih nilai tengah menunjukkan bahwa perlakuan *A. denticulata*

indigenous memiliki nilai tengah dan selisih persentase nilai tengah yang lebih besar dari perlakuan lainnya.

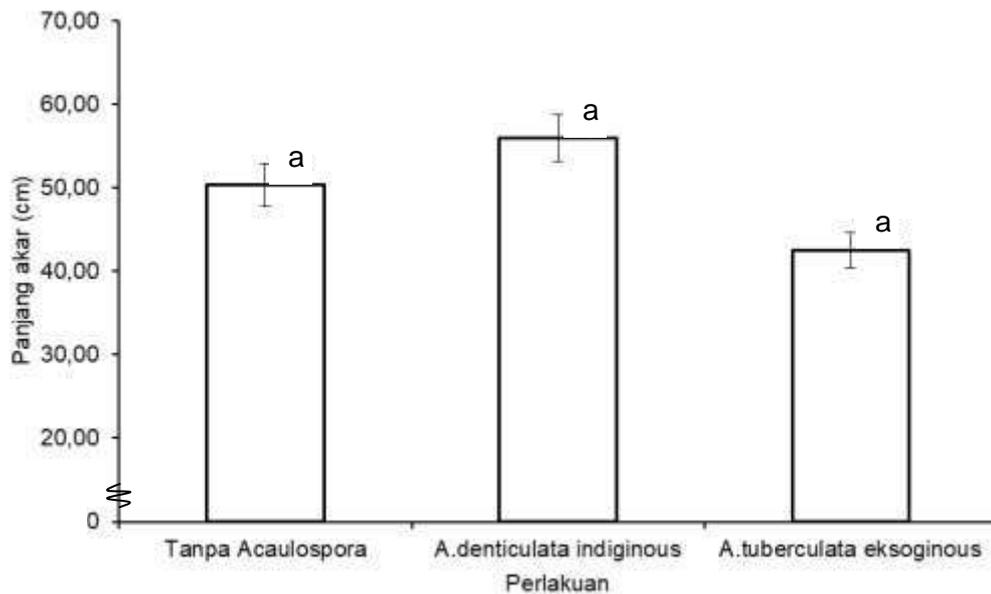
Hasil pengamatan jumlah akar lateral tanaman *C. ensiformis* yang diinokulasi dengan *A. denticulata* indigenous pada media yang memiliki konsentrasi nikel yang tinggi menunjukkan jumlah cabang akar lateral 28,84% lebih banyak dibanding tanaman *C. ensiformis* yang tanpa *Acaulospora* sp. (Gambar 5), hal ini diduga *A. denticulata* indigenous yang diintroduksi pada tanaman *C. ensiformis* telah melakukan infeksi dan menjalankan fungsinya sebagai agen hayati bagi tanaman untuk memperluas permukaan akar melalui peningkatan jumlah cabang akar lateral dan sebagai filter terhadap konsentrasi logam nikel yang tinggi. Menurut Sharma et al. (2017) bahwa kolonisasi MA pada tanaman menghasilkan aktivitas enzim antioksidan yang lebih tinggi (superoxide dismutase, katalase, dan guaiacol peroxidase). Hal ini meningkatkan konsentrasi molekul antioksidan (karotenoid, prolin, dan α -tocopherol). Pada tanaman yang bermikoriza, aktivitas enzim pada siklus glutathione-askorbat cenderung lebih tinggi sehingga menghasilkan rasio askorbat:dehydroaskorbat (AsA:DHA) dan glutathione:glutathione disulfida (GSH:GSSG) yang lebih tinggi. Inokulasi MA juga menambah sistem glyoxalase dengan meningkatkan aktivitas enzim glyoxalase I dan glyoxalase II. Kolonisasi mikoriza meningkatkan konsentrasi sistein, glutathione, tiol non-protein, dan aktivitas glutathione-S-transferase yang memfasilitasi penyerapan logam berat ke kompleks yang tidak beracun. Sun dan Tang (2013) mengkonfirmasi bahwa MA juga dapat mengubah morfologi akar serta profil senyawa organik volatil (VOCs) yang dipancarkan oleh akar tanaman sorgum, yang menunjukkan bahwa MA memiliki potensi untuk membantu tanaman beradaptasi dan mengubah lingkungan tanah.



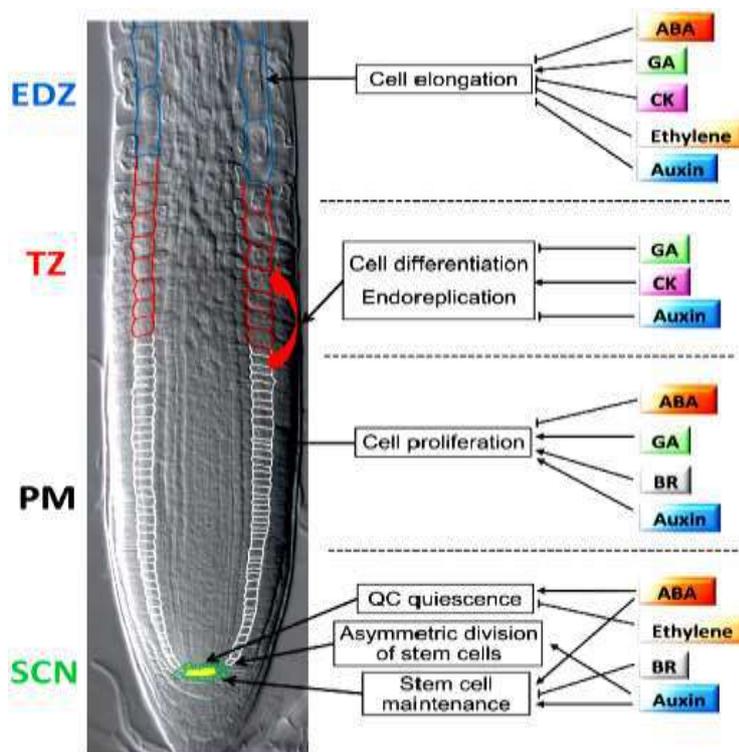
Gambar 5. Rata-rata jumlah akar lateral *C. ensiformis* yang diintroduksi *Acaulospora* sp. Angka yang diikuti oleh simbol (a, b, c) yang sama menunjukkan tidak ada perbedaan antar perlakuan berdasarkan uji Duncan pada taraf 5%.

Tanaman *C. ensiformis* yang diintroduksi *A. tuberculata* eksoginous yang hanya memiliki jumlah akar lateral 7,30% lebih tinggi dari kontrol, maupun tanaman *C. ensiformis* yang tidak diintroduksi *Acaulospora* sp., diduga mengalami toksisitas logam nikel. Menurut Hussain et al. (2013); Emamverdian et al. (2015) bahwa beberapa penelitian pada tanaman termasuk jagung dan kacang tunggak telah mengkonfirmasi fenomena ini dan mengindikasikan bahwa toksisitas logam nikel dapat menyebabkan pembentukan dan pengembangan akar lateral yang terhambat.

Hasil pengamatan pada peubah panjang akar, menunjukkan bahwa tanaman *C. ensiformis* yang diintroduksi *A. denticulata* indiginous cenderung memiliki akar yang lebih panjang 11,26 % dari tanaman *C. ensiformis* yang tidak diintroduksi *Acaulospora* sp. (Gambar 6). Hal yang sama juga ditemukan oleh Enteshari dan Hajbagheri (2011) pada tanaman *Ocimum basilicum* L dalam kondisi cekaman garam. Sun dan Tang (2013) pada tanaman sorgum yang diinokulasi dengan *Glomus* sp.

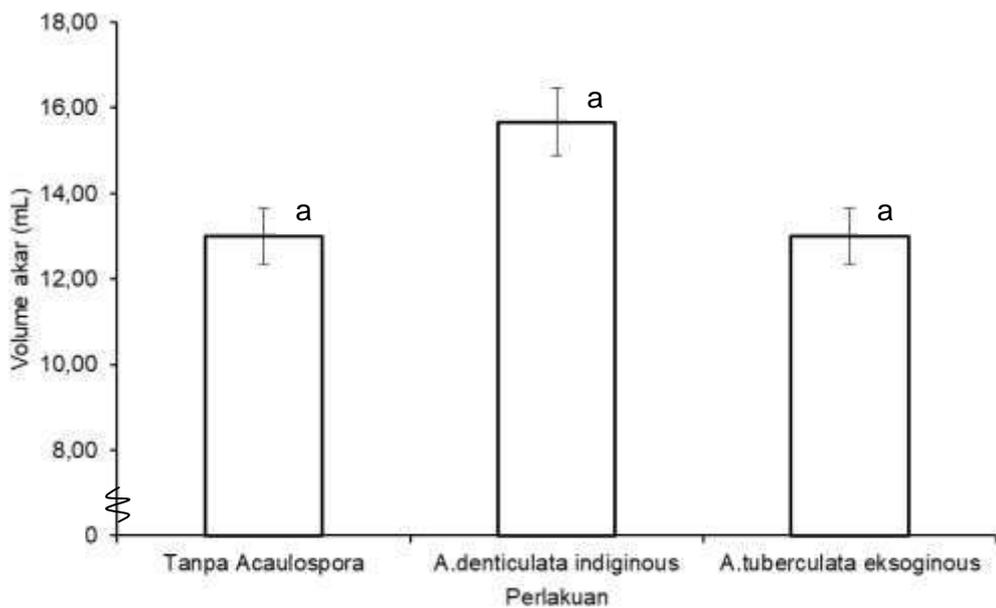


Gambar 6. Rata-rata panjang akar *C. ensiformis* yang diintroduksi *Acaulospora* sp. Angka yang diikuti oleh simbol (a, b, c) yang sama menunjukkan tidak ada perbedaan antar perlakuan berdasarkan uji Duncan pada taraf 5%.



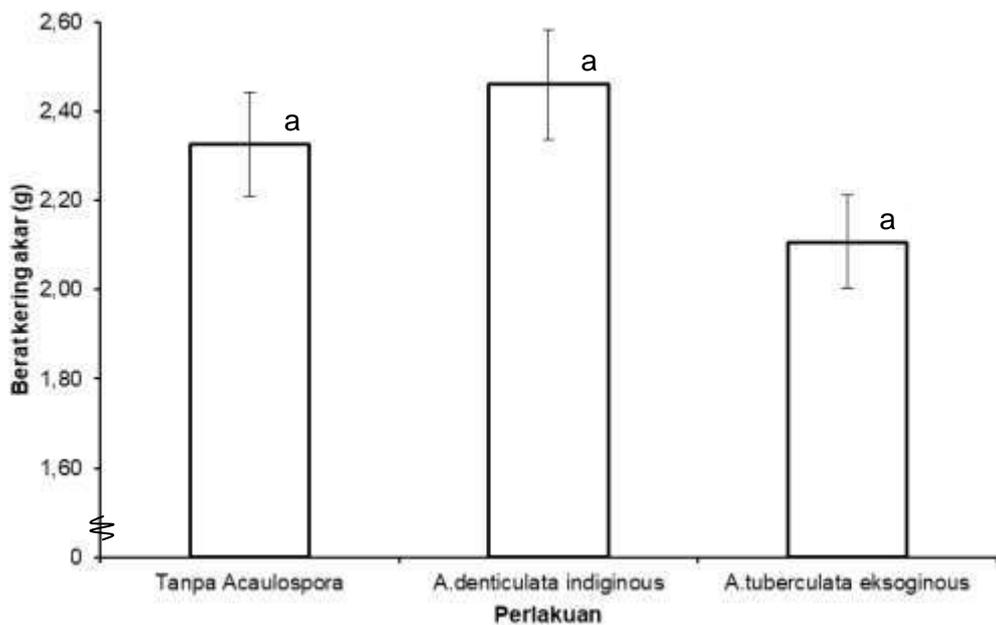
Gambar 7. Peran pitohormon di zona akar.

Hormon auxin, selain menjadi sinyal saat pembentukan simbiosis MA (Muller dan Guther, 2007) dan pengatur dominan pengembangan akar lateral (Benkova dan Hejatko, 2009; Fukaki dan Tasaka, 2009; Overvoorde et al., 2010). Takatsuka dan Umeda (2014) menambahkan bahwa hormon auxin juga berperan dalam pemanjangan akar tanaman, lebih lanjut dijelaskan bahwa zona akar dibagi dalam 2 zona utama, yaitu pertama, zona sel induk yang terdiri dari ceruk sel induk (SCN) berisi pusat diam (kuning) dan sel induk di sekitarnya (hijau); dan kedua, zona sel korteks dibagi menjadi tiga zona: meristem proksimal (PM), zona transisi (TZ), dan zona pemanjangan atau diferensiasi (EDZ). Keterlibatan hormon di setiap zona ditunjukkan di sisi kanan gambar (Gambar 7). Namun menurut Hanlon dan Coenen (2011) bahwa pada MA, auxin hanya dibutuhkan saat menginfeksi akar tanaman dan tidak diperlukan untuk pengembangan pasca infeksi.



Gambar 8. Rata-rata volume akar *C. ensiformis* yang diintroduksi *Acaulospora* sp. Angka yang diikuti oleh simbol (a, b, c) yang sama menunjukkan tidak ada perbedaan antar perlakuan berdasarkan uji Duncan pada taraf 5%.

Hasil pengamatan volume akar tanaman *C. ensiformis* yang diinokulasi dengan *A. denticulata* indiginous cenderung lebih besar 20,51% dari perlakuan *A. tuberculata* eksoginuous dan tanpa *Acaulospora* sp. (Gambar 8). Hal serupa juga diperoleh Habibzadeh (2015) pada tanaman mentimun yang menunjukkan bahwa volume akar memberikan nilai koefisien korelasi yang positif dengan bahan kering tajuk tanaman yang diaplikasikan MA. Hal ini disebabkan karena meningkatnya pertumbuhan akar akibat meningkatnya perolehan nutrisi dan air oleh MA (Pierre et al., 2014) untuk menjalankan proses asimilasi.

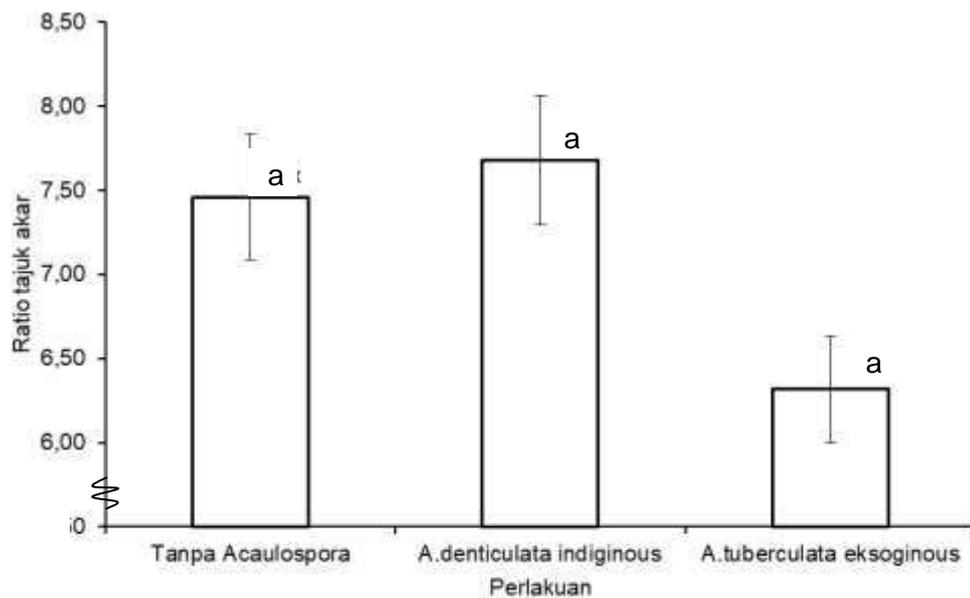


Gambar 9. Rata-rata berat kering akar (b) *C. ensiformis* yang diintroduksi *Acaulospora* sp. Angka yang diikuti oleh simbol (a, b, c) yang sama menunjukkan tidak ada perbedaan antar perlakuan berdasarkan uji Duncan pada taraf 5%.

Mikoriza sebagai simbion obligat, juga bergantung pada pertumbuhan dan aktivitas tanaman fotosintetik tanaman dalam penyediaan senyawa karbon (Jennings, 1995; Habibzadeh, 2015). Simbiosis MA dapat menyebabkan peningkatan produk karbohidrat bagi tanaman inang dimana produk asimilat total dapat ditranfer ke MA

sebesar 20% (Graham, 2000) sebagai sumber energy. Hal tersebut juga mengakibatkan berat kering akar lebih berat 5,58% dibanding tanaman *C. ensiformis* yang tidak diinokulasi dengan *Acaulospora* sp. (Gambar 9).

Pengamatan ratio tajuk:akar tanaman *C. ensiformis* yang diintroduksi *A. denticulata* indiginous lebih tinggi 2,81% dibanding perlakuan kontrol (Gambar 10). Hal tersebut diduga karena asimilat diarahkan ke pertumbuhan akar sekaligus memenuhi kebutuhan energi bagi mikoriza untuk memperluas permukaan akar, untuk penyerapan unsur hara yang lebih banyak.



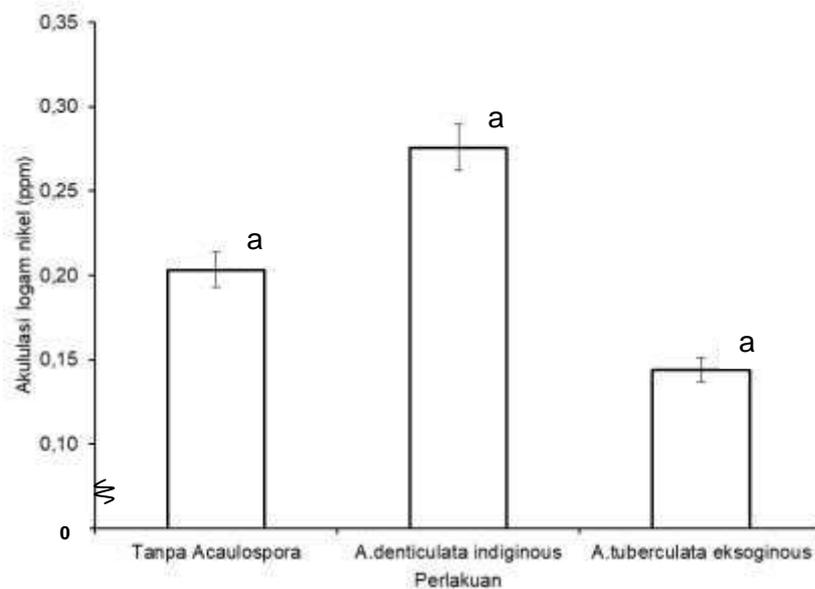
Gambar 10. Rata-rata ratio tajuk akar *C. ensiformis* yang diintroduksi *Acaulospora* sp. Angka yang diikuti oleh simbol (a, b, c) yang sama menunjukkan tidak ada perbedaan antar perlakuan berdasarkan uji Duncan pada taraf 5%.

Phitorhizoremediasi

Perkembangan ilmu pengetahuan dibidang fitoremediasi semakin pesat, akhir-akhir ini telah ditemukan bentuk fitoremediasi yang lain, yaitu phitorhizoremediasi yang merupakan jenis fitoremediasi yang spesifik dengan melibatkan tanaman dan mikroba rhizosfer (Kala, 2014; Bisht et

al., 2015). Meier et al. (2012) mengemukakan sebelumnya bahwa penggunaan MA, dan perannya dalam fitoremediasi, telah muncul sebagai pilihan baru dan menarik. Selain kontribusi MA yang terkenal dalam penyerapan nutrisi dan pertumbuhan tanaman, jamur ini juga mengembangkan beragam mekanisme yang mendorong tanaman untuk tumbuh di tanah dengan konsentrasi logam tinggi.

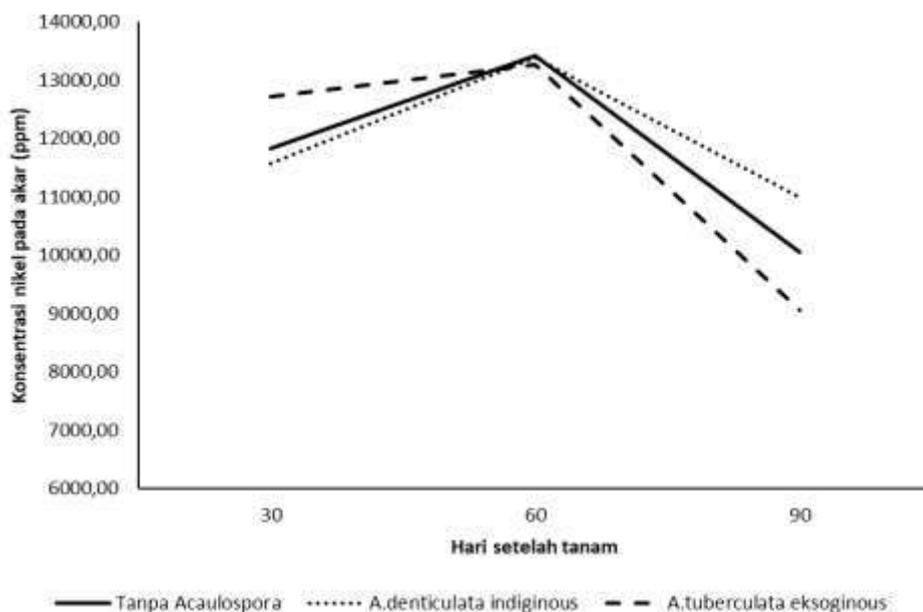
Analisis ragam akumulasi logam, efisiensi penyerapan dan laju reduksi logam nikel oleh tanaman *C. ensiformis* menunjukkan bahwa perlakuan *Acaulospora* sp. yang diisolasi dari lingkungan yang berbeda memberikan pengaruh yang tidak nyata (Tabel Lampiran 6), namun berdasarkan analisis deskriptif menunjukkan fenomena yang beragam.



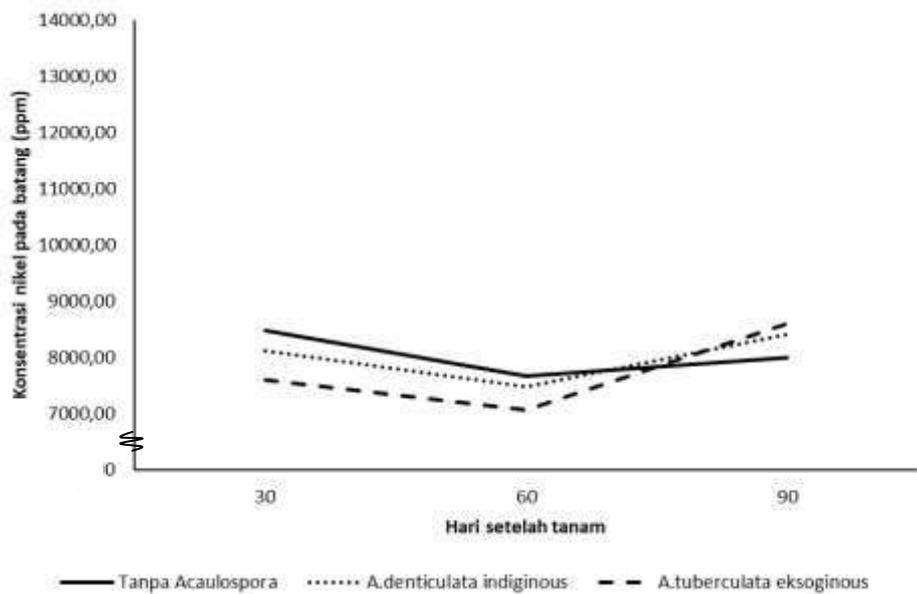
Gambar 11. Rata-rata akumulasi logam nikel oleh *C. ensiformis* yang diintroduksi *Acaulospora* sp. Angka yang diikuti oleh simbol (a, b, c) yang sama menunjukkan tidak ada perbedaan antar perlakuan berdasarkan uji Duncan pada taraf 5% (data dalam transformasi akar).

Tanaman *C. ensiformis* yang diintroduksi *A. denticulata* indiginous dapat mengakumulasi logam nikel 40% lebih banyak dibanding tanaman *C. ensiformis* yang tidak diintroduksi dengan *Acaulospora* sp. (Gambar 11) yang terakumulasi pada organ akar, batang dan daun tanaman yang berumur 30 - 60 HST (Gambar 12; 13 dan 14) dan menurun setelah

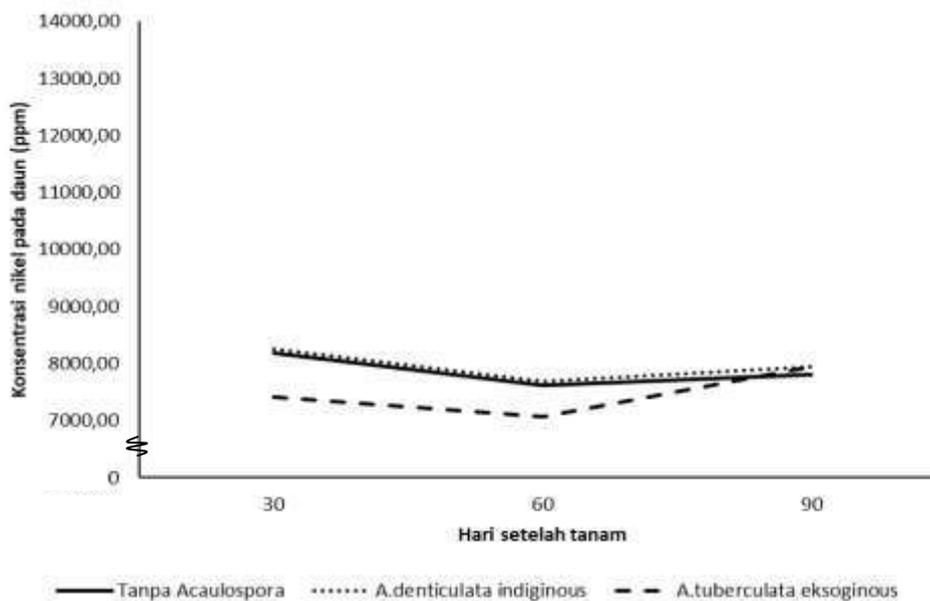
tanaman memasuki fase generatif pada umur 90 HST (Gambar 15). Gambar 12 juga menunjukkan bahwa *A. denticulata* indigenous mampu mengikat logam nikel sebesar 2,22% dibanding tanaman *C. ensiformis* yang tidak diintroduksi dengan *Acaulospora* sp pada umur 30 HST dan menurun hingga 1,95% pada umur 60 HST. Hal ini diduga konsentrasi nikel pada *A. denticulata* indigenous telah mendekati konsentrasi seimbang dengan konsentrasi logam nikel yang terdapat pada akar. Ishtiaq dan Mahmood (2011) menjelaskan bahwa pada konsentrasi yang tinggi, nikel dapat dengan mudah bergerak melalui pembuluh phloem dan xylem, sehingga translokasi lancar dari akar ke bagian atas tanaman. Kemudahan pergerakan menuju tunas disebabkan oleh pola dimana nikel didistribusikan ke dalam jaringan akar, sehingga dapat melewati pembatas endodermal dan menumpuk pada sel pericycle (Seregin dan Kozhevnikova, 2006). Hal ini juga menunjukkan bahwa *C. ensiformis* dapat digolongkan sebagai tanaman fitoakumulator, menurut Hidayati (2005) bahwa suatu tanaman dapat digolongkan sebagai tanaman fitoakumulator jika sedikitnya mengikat logam Ni 1000 ppm (atau 0,1%) berat kering tajuk.



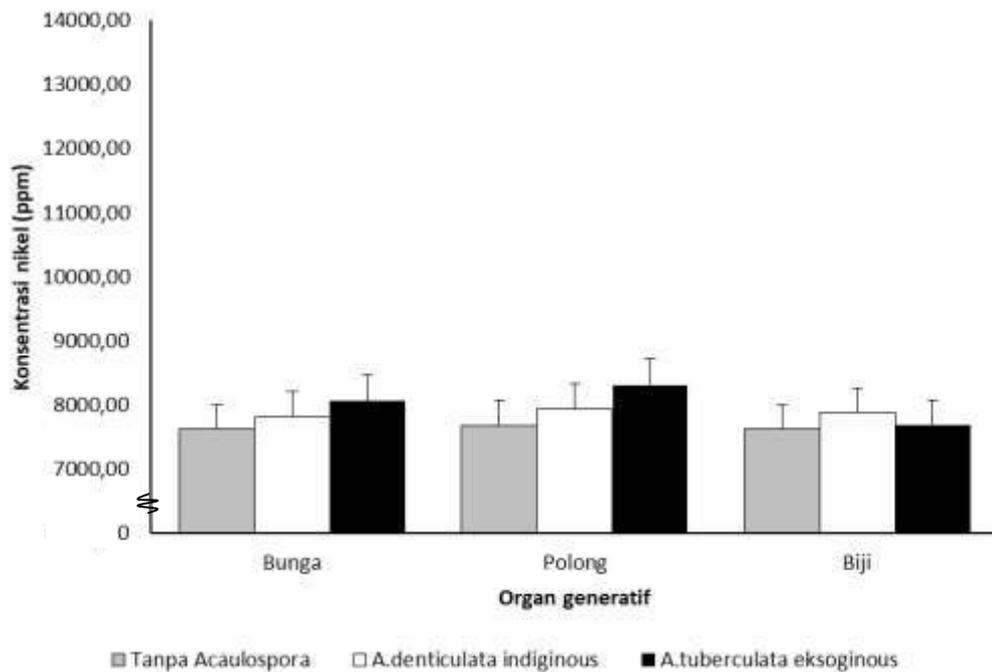
Gambar 12. Konsentrasi logam nikel pada organ akar *C. ensiformis* yang diintroduksi *Acaulospora* sp. pada umur 30; 60; dan 90 HST (data dalam transformasi akar).



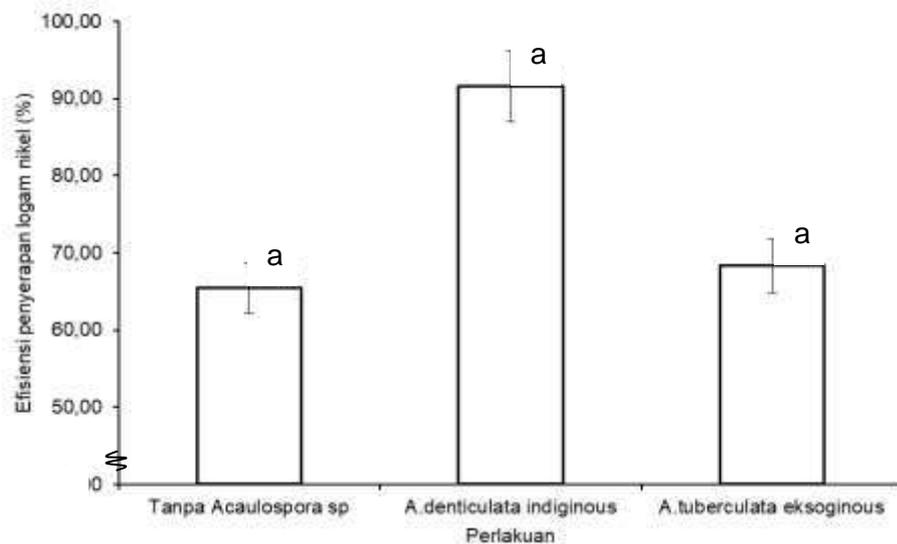
Gambar 13. Konsentrasi logam nikel pada organ batang *C. ensiformis* yang diintroduksi *Acaulospora* sp. pada umur 30; 60; dan 90 HST (data dalam transformasi akar).



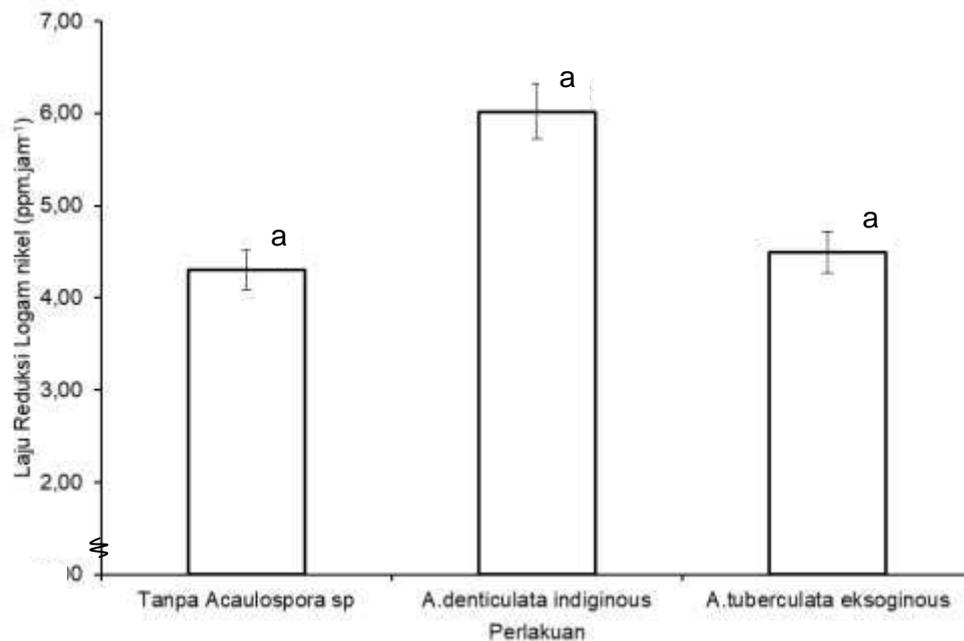
Gambar 14. Konsentrasi logam nikel pada organ daun *C. ensiformis* yang diintroduksi *Acaulospora* sp. pada umur 30; 60; dan 90 HST (data dalam transformasi akar).



Gambar 15. Konsentrasi logam nikel pada organ generatif *C. ensiformis* yang diintroduksi *Acaulospora* sp. (data dalam transformasi akar).



Gambar 16. Rata-rata efisiensi penyerapan logam nikel oleh *C. ensiformis* yang diintroduksi *Acaulospora* sp. Angka yang diikuti oleh simbol (a, b, c) yang sama menunjukkan tidak ada perbedaan antar perlakuan berdasarkan uji Duncan pada taraf 5%. (data dalam transformasi akar).



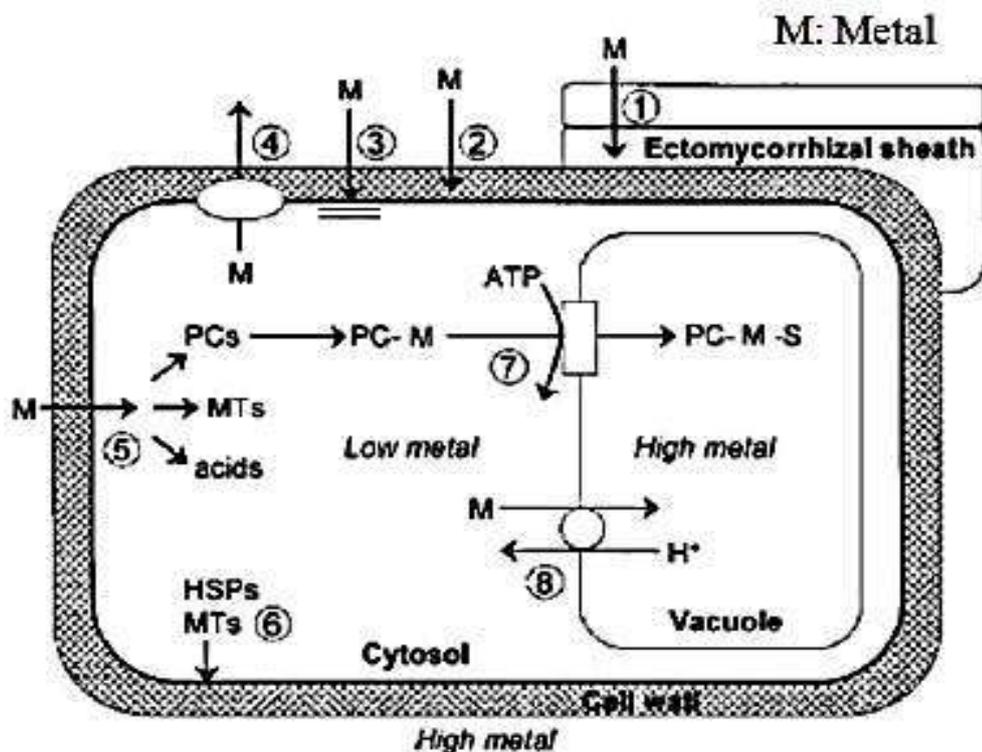
Gambar 17. Rata-rata laju reduksi logam nikel oleh *C. ensiformis* yang diintroduksi *Acaulospora* sp. Angka yang diikuti oleh simbol (a, b, c) yang sama menunjukkan tidak ada perbedaan antar perlakuan berdasarkan uji Duncan pada taraf 5%. (data dalam transformasi akar).

Introduksi *A. denticulata* indiginous pada tanaman *C. ensiformis* juga memiliki efisiensi penyerapan logam nikel hingga 39,78% (Gambar 16) dengan laju reduksi 39,67% (Gambar 17) dibanding perlakuan kontrol, hal ini diduga MA indiginous yang telah teradaptasi dengan lingkungan yang mengandung konsentrasi nikel yang tinggi telah membentuk simbiosis mutualistik dengan tanaman *C. ensiformis*. Bentuk simbiosis yang terjadi adalah mikoriza mampu meningkatkan luas permukaan akar sehingga kontak antar permukaan akar dengan partikel tanah semakin banyak, sedangkan *C. ensiformis* mampu menyediakan asimilat sebagai sumber energi untuk perkembangan *A. denticulata* indiginous (Smith dan Read, 2008; Panjaitan, 2015; Hanafi et al., 2015).

Tingkat toleransi tanaman terhadap nikel hingga mencapai ambang toksik sangat bervariasi dari 25 sampai 246 ppm berat kering tanaman, tergantung pada jenis tanaman dan kultivar (Khan dan Khan, 2010). Sreekanth et al. (2013) melaporkan bahwa toksisitas nikel dapat menyebabkan berkurangnya kadar klorofil dan gangguan transportasi

elektron. Namun hal tersebut tidak terjadi pada tanaman yang diintroduksi *A. denticulata* indiginous, hal ini diduga selain karena *C. ensiformis* memiliki daya ataptasi yang luas, juga karena *A. denticulata* indiginous bekerja secara maksimal sebagai agen penghalang hayati.

Turnau (1988) mengemukakan bahwa mekanisme utama yang dilakukan oleh mikoriza untuk menghilangkan dampak tekanan logam berat pada tanaman termasuk bertindak sebagai penghalang dengan mendistribusikan logam ke dalam sel korteks, mengikat logam ke dinding sel atau miselium serta menimbunnya ke dalam vakuola atau organel lainnya (Hall, 2002), melepaskan protein heat-shock dan glutathione (Hildebrandt et al., 2007), mengendapkan atau mengkelat logam dalam matrix tanah melalui pembuatan glikoprotein atau menghasilkan kompleks fosfatemamin di dalam hifa (Andrade and Silveira, 2008; Aloui et al., 2011), dan mengurangi kekuatan logam dengan meningkatkan pertumbuhan akar dan tunas (Mohammadi, 2011).



Gambar 18. Ringkasan mekanisme penghindaran dan toleransi logam berat (Hall, 2002)

Hall (2002) mencoba membuat ringkasan mekanisme penghambatan logam berat oleh tanaman yaitu 1. Pembatasan gerakan logam berat ke akar oleh mikoriza, 2. Mengikat logam berat di dinding sel dan di eksudat akar, 3. Mengurangi masuknya logam berat ke membran plasma, 4. Efflux aktif menjadi apoplast, 5. Chelatin dalam sitosol dengan berbagai ligan, 6. Perbaikan dan perlindungan membran plasma dalam kondisi stres, 7. Transport kompleks PC-M menuju vakuola, 8. Transport dan akumulasi logam berat, dapat dilihat pada Gambar 18, diatas.

KESIMPULAN DAN SARAN



Hasil penelitian di laboratorium dan di lapangan dapat disimpulkan bahwa: *Acaulospora denticulata* indigenous dapat menginfeksi dan membantu pertumbuhan akar untuk mengakumulasi logam berat (nikel) yang lebih tinggi pada akar tanaman *C. ensiformis*. Konsentrasi nikel pada organ akar mencapai 9500 ppm (60,13%), batang 1400 ppm (8,86%), daun 1300 ppm (8,23%), bunga 1100 ppm (6,96%), polong 1300 ppm (8,22%), dan biji 1200 ppm (7,59%), hal ini menunjukkan bahwa tanaman *C. ensiformis* yang diintroduksi *A. denticulata* indigenous mampu merehabilitasi lahan pasca tambang nikel.

Tindak lanjut yang dapat dilakukan untuk masa yang akan datang adalah tanaman *C. ensiformis* dapat direkomendasikan sebagai tanaman fitoakumulator untuk lahan yang terkontaminasi logam nikel; Mikroorganisme indigenus khususnya *Acaulospora denticulata* dapat dimanfaatkan sebagai filter agen hayati untuk mempercepat proses remediasi; Penelitian mikroorganisme indigenus khususnya pada kelompok jamur lain dan bakteri yang berasal dari lahan-lahan marginal yang memiliki tingkat cekaman yang tinggi perlu dilakukan dan dikembangkan; Dibutuhkan kerjasama antara pihak masyarakat, swasta, perguruan tinggi dan pemerintah, untuk merehabilitasi lahan-lahan marginal menjadi lahan-lahan produktif; Dibutuhkan penelitian lanjutan untuk melihat tingkat cemaran logam berat di area usaha tani dan produksi hasil pertanian milik masyarakat di luar area kontrak karya PT. Vale Indonesia Tbk.

DAFTAR PUSTAKA



- Abimayu, D. N., Berthan, R. Y. H., Mansur, I. 2012. Bekerja Dengan Fungi Mikoriza Arbuskula. Southeast Asian Regional Centre for Tropical Biology. Bogor. www.biotrop.org.
- Abubakar, F. 2009. Evaluasi Tingkat Keberhasilan Revegetasi Lahan Bekas Tambang Nikel Di PT. INCO Tbk. Sorowako, Sulawesi Selatan. Institut Pertanian Bogor. <http://repository.ipb.ac.id>, diakses 9 Maret 2016.
- Achmad, S. D dan Mulyadi, D.. 2013. Implication of Limestone Quarry to the Hydrological Condition in Citeureup, Bogor, West Java. *Ris.Geo.Tam*, 23: 49-60.
- Akib, M. A., Haniarti., Baktiar, M. I. P., Nurmuliana. 2014. Analisis Pertumbuhan Tanaman *Canavalia ensiformis* Pada Ruang Tumbuh Berbeda Untuk Menentukan Waktu Aplikasi Teknologi *Cutback*. SEMINAR PISPI.
- Akib, M. A., Mustari, K., Ilmi, N., Rosalina, R. 2016. Aplikasi Teknologi Pemangkasan Dan Dinamika Pertumbuhan Daun Kacang Koro Pedang (*Canavalia ensiformis* L) Yang Diberi Mulsa. *Jurnal Galung Tropika*, 6: 146-153.

- Akinlade, J. A., Farinu, G. O., Taiwo, A. A., Aderinola, O. A., Adebayo, T. A., Ojebiyi, O. O., Olaniran, O. A. 2007. Agronomic and Nutritive Evaluation of Jack Beans (*Canavalia ensiformis*) for Fodder in the Derived Savannah Zone of Nigeria. *International Journal of Agricultural Research*, 2: 1059-1063.
- Ali, A dan Rante, H. 2011. Karakterisasi Mikrobial Rizosfer Asal Tanaman Ginseng Jawa (*Talinum triangulare*) Berdasarkan Gen Ribosomal 16S rRNA dan 18S. *Jurnal Biologi Papua*. 3: 74–81.
- Aloui, A., Recorbet, G., Robert, F., Schoefs, B., Bertrand, M., Henry, C., Pearson, V. G., Gaudot, E. D., dan Smiti, S. A. 2011. Arbuscular Mycorrhizal Symbiosis Elicits Shoot Proteome Changes That are Modified During Cadmium Stress Alleviation in *Medicago truncatula*. *BMC Plant Biology*, 11: 1-17.
- Amina, S., Yusran, Irmasari. 2014. Pengaruh Dua Spesies Fungi Mikoriza Arbuskular Terhadap Pertumbuhan Dan Ketahanan Semai Kemiri (*Aleurites Moluccanawilld*) Pada Cekaman Kekeringan. *Warta Rimba*, 2 : 96 – 104.
- Anastasis, C., Theologides, C. P., Costa, C., Kalavrouziotis, I. K., Varnavas, S. P. 2017. Assessment of Toxic Heavy Metals Concentrations in Soils and Wild And Cultivated Plant Species in Limni Abandoned Copper Mining Site, Cyprus. *Journal of Geochemical Exploration*, 78:16-22.
- Andrade, L. A. S., Gratao, P. L., Azevedo, R. A., Silveira, A. P.D., Schiavinato, M. A., Mazzafera, P. 2009^b. Biochemical and Physiological Changes in Jack Bean Under Mycorrhizal Symbiosis Growing in Soil with Increasing Cu Concentrations. *Environmental and Experimental Botany*, 68: 198–207.
- Andrade, L. A. S., Gratao, P. L., Schiavinato, M. A., Silveira, A. P.D., Azevedo, R. A., Mazzafera, P. 2009^a. Zn Uptake, Physiological Response and Stress Attenuation in Mycorrhizal Jack Bean Growing in Soil With Increasing Zn Concentrations. *Chemosphere*, 75: 1363–1370.
- Andrade, L. A. S., Jorge, R. A., Silveira, A. P. D. 2005. Cadmium Effect on The Association of Jackbean (*Canavalia ensiformis*) and Arbuscular Mycorrhizal Fungi. *Sci. Agric. (Piracicaba, Braz.)*, 62: 389-394.

- Aprilia, D. D., dan Purwani, K. I. 2013. Pengaruh Mikoriza *Glomus fasciculatum* Terhadap Akumulasi Logam Timbal (Pb) pada Tanaman *Euphorbia milii*. Jurnal Sains Dan Seni Pomits, 2: 2337-3520.
- Arisusanti, R. J dan Purwani, K. I. 2013. Pengaruh Mikoriza *Glomus fasciculatum* Terhadap Akumulasi Logam Timbal (Pb) pada Tanaman *Dahlia pinnata*. JURNAL SAINS DAN SENI POMITS, 2: 2337-3520.
- Asir, L., O. 2013. Alternative Rehabilitation Technique on ex-Industrial Land. INFO Balai Penelitian Kehutanan Manado, 3: 113-130.
- Assadi, M. S., Mirkohi, A. K., Alemardan, A., Jimenez, E. M. 2015. Mycorrhizal Limonium Sinuatum (L.) Mill. Enhances Accumulation of Lead and Cadmium, International Journal of Phytoremediation, 17: 556-562.
- Ayu, P. S., Noli, Z. A., Solfiyeni, 2015. The Growth of Buffalo Grass (*Paspalum conjugatum* Berg.) Inoculated with Several Doses of Arbuscular Mycorrhizal Fungi (AMF) in Media Containing with Mercury (Hg). Jurnal Biologi Universitas Andalas (J. Bio. UA.), 4: 107-112.
- Bais, H.P., Weir, T.L., Perry, L.G., Gilroy, S., and Vivanco, J.M. 2006. The Role of Root Exudates in Rhizosphere Interactions with Plants and Other Organisms. Annual Review of Plant Biology. 57 : 233 – 266.
- Benkova, E., Hejatko, J. 2009. Hormone Interactions at The Root Apical Meristem. Plant Mol Biol, 69:383–396.
- Bertham, R. Y. H dan Ironiah, E. 2009. Double Inoculation of Indigenous Arbuscular Mycorrhizal Fungi and Rhizobium Impact on Three Soybean Genotypes in Ultisol. Akta Agrosia, 12:155-166.
- Bhatt, B. P., Singha L. B., Satapathy, K. K., Sharma, Y. P., Bujarbaruah, K. M. 2010. Rehabilitation of Shifting Cultivation Areas Through Agroforestry: A Case Study In Eastern Himalaya, India. Journal of Tropical Forest Science 22(1): 13-20
- Biro, B., Fuzy, A., Posta, K. 2010. Long-Term Effect of Heavy Metal Loads on The Mycorrhizal Colonization and Metal Uptake of Barley. Agrochimica es Talajtan, 59: 175-184.

- Bisht, S., Pandey, P., Bhargava, B., Sharma, S., Kumar, V., Sharma, K. D. 2015. Bioremediation of Polyaromatic Hydrocarbons (PAHs) Using Rhizosphere Technology. *Brazilian Journal of Microbiology*, 46: 7-21.
- Budiyanto, G. 2015. Interaksi Biologi Nitrogen Dalam Tanah. Makalah Kuliah Umum Program Studi Agroteknologi Fakultas Pertanian Universitas Muhammadiyah Yogyakarta.
- Bukhari dan Febryano, I. G. 2009. Design of Agroforestry in Critical Land : Case Study in Indrapuri Subdistrict, Aceh Besar District. *Jurnal Perennial*, 6: 53-59.
- Cavagnaro, T., Jackson, L., Six, J., Ferris, H., Goyal, S., Asami, D., Scow, K. 2006. Arbuscular Mycorrhizas, Microbial Communities, Nutrient Availability, and Soil Aggregates in Organic Tomato Production. *Plant and Soil*, 282: 209-225.
- Caya, T., Gunawan, S. W., Suprodjo., dan Ali, L. M. 2014. Optimalisasi Penggunaan Lahan Untuk Agroforestri Di Daerah Aliran Sungai Cimanuk Propinsi Jawa Barat. *Jurnal Teknosains*, 4:39-53.
- Centyana, E., Cahyoko, Y., dan Agustono. 2014. Substitution of Soybean Meal with Sword Bean Seed Meal (*Canavalia Ensiformis*) on Growth, Urvival Rate and Feed Efficiency of Red Tilapia. *Jurnal Ilmiah Perikanan dan Kelautan*, 6: 7-14.
- Chalimah, S., Muhadiono., Aznam, L., Haran, S., Mathius, N. T. 2007. Propagation of *Gigaspora* sp Dan *Acaulospora* sp By Pot Culture in A Green House. *BIODIVERSITAS*, 7: 12-19.
- Chaudhary, B. 2013. Plant Domestication and Resistance to Herbivory. *International Journal of Plant Genomics*, 2013: 1-14.
- Chen, Y. C., Chiu, W. T., Chen, J. C., Chang, C. S., Wang, L. H. C., Lin, H. P., dan Chang, H. C. 2015. The Photothermal Effect of Silica–Carbon Hollow Sphere–Concanavalin A on Liver Cancer Cells. *J.Mater.Chem.B* ,2015: 2447–2454.
- Costa, F. A., Haddad, L. S. A. M., Kasuya, M. C. M., Oton, W. C., Costa, M. D., Borges, A. C. 2013. In Vitro Culture of *Gigaspora Decipiens* and *Glomus Clarum* in Transformed Roots of Carrot: The Influence of Temperature and pH. *Acta Scientiarum. Agronomy Maringá*, 35: 315-323.

- Dariah, A., Abdurachman, A., Subardja, D. 2010. Reclamation of Ex-Mining Land for Agricultural Extensification . Jurnal Sumberdaya Lahan, 4: 1-12.
- Darnawi, Darini, M. T. 2016. Kajian Agronomi Koro Pedang (*Carnivalia ensiformis* L.) Pada Jarak Tanam Dan Komposisi Pupuk Campuran Npk Di Lahan Pasir. Jurnal Sciencetech, 2: 11-19.
- Delvian, 2005. Respon Pertumbuhan Dan Perkembangan Cendawan Mikoriza Arbuskula Dan Tanaman Terhadap Salinitas Tanah. www.library.usu.ac.id
- Djaenuddin, N., Nonci, N., Muis, A. 2017. The Effectiveness of Biopesticide Formulation *Bacillus subtilis* BNt8 as Biocontrol Agent of Banded Leaf and Sheath Blight (*Rhizoctonia solani*) disease on corn (*Zea mays* L.). AAB Bioflux, 9: 1-10.
- Dolphen, R., Thiravetyan, P. 2015. Phytodegradation of Ethanolamines by *Cyperus alternifolius*: Effect of Molecular Size. International Journal of Phytoremediation, 17: 686-692.
- Dubrovsky, J. G., Doerner, P. W., Carmona, C., dan Rost, T. L. 2000. Pericycle Cell Proliferation and Lateral Root Initiation in Arabidopsis. Plant Physiology, 124:1648–165.
- Eissa, M. A. 2014. Impact of Compost on Metals Phytostabilization Potential of Two Halophytes Species. International Journal of Phytoremediation, 17: 662-668.
- Emamverdian, A., Ding, Y., Mokhberdoran, F., Xie, Y. 2015. Heavy Metal Stress and Some Mechanisms of Plant Defense Response (Review Article). Thee Scientific World Journal 2015: 1- 18.
- Enteshari, S and Hajbagheri, S. 2011. Effects of mycorrhizal fungi on some physiological characteristics of salt stressed *Ocimum basilicum* L. Iranian Journal of Plant Physiology, 1: 215-222
- Etemadi, M., Gutjahr, C., Couzigou, J. M., Zouine, M., Laressergues, D., Timmers, A., Audran, C., Bouzayen, M., Bécard, G., and Combier, J. P. 2014. Auxin Perception is Required for Arbuscule Development in Arbuscular Mycorrhizal Symbiosis. Plant Physiology, 166: 281–292.
- Fachrul, R. M. 2013. PT. Vale Indonesia Tbk “Migrasi Data Menggunakan Pcmover Enterprise” Politeknik Negeri Ujung Pandang Makassar.

- Fajarwati, I. 2007. Organic Acid Secretion on Al-stressed Rice. Departemen Biologi Fakultas Matematika Dan Ilmu Pengetahuan Alam. Institut Pertanian Bogor.
- Fernando, E. S., Quimado, M. O., Doronila, A. I. 2014. *Rinorea niccolifera* (Violaceae), a New, Nickel-Hyperaccumulating Species from Luzon Island, Philippines. *PhytoKeys*, 37: 1–13.
- Filho, P. F. M., Vasconcellos, R. L. F., Cardoso, E. J. B. N. 2011. Growth and Development of Jack-Bean and Pigeon-Pea in Cassiterite Mine Spoil. *Journal of Soil Science and Environmental Management*, 2: 74-79.
- Fuady, Z. 2013. Kontribusi Cendawan Mikoriza Arbuskular Terhadap Pembentukan Agregat Tanah Dan Pertumbuhan Tanaman. *Lentera*, 13: 7 – 15.
- Fukaki, H., Tasaka, M. 2009. Hormone Interactions During Lateral Root Formation. *Plant Mol Biol* 69: 437–449
- Garba, T., Babanyara, Y. Y., Ibrahim, D. B., Lot, I. 2015. Assessment of Underground Water Contamination Due to Early Coal Mining Activities in Nigeria. *Journal of Environment and Earth Science*, 5: 122-125.
- Gomes, A. K dan Gomes, A. A. 1984. *Statistical Procedures for Agricultural Research*. First edition published in the Philippines by International Rice Research Institute.
- Graham, J. H. 2000. Assessing Cost of Arbuscular Mycorrhizal Symbiosis in Agroecosystems. In: Podila GK, Douds DD eds. *Current Advances in Mycorrhizae Research*: 127-140..
- Gunawan, R., Priyanto., Salundik. 2015. Environment Assessment Around Nickel Mining on Beef Cattle Quality in East Halmahera District. *Jurnal Ilmu Produksi dan Teknologi Hasil Peternakan*, 3: 59 -64.
- Habibzadeh, Y. 2015. The Effects of Arbuscular Mycorrhizal Fungi and Phosphorus Levels on Dry Matter Production and Root Traits in Cucumber (*Cucumis sativus* L.). *African Journal of Environmental Science and Technology*, 9: 65-70.
- Halim, 2010. Kelimpahan Populasi Mikoriza Indigen Gulma Pada Hutan Sekunder. *Agriplus*, 20:194-198.
- Hall, J. L. 2002. Cellular mechanisms for heavy metal detoxification and tolerance. *Journal of Experimental Botany*, 53: 1–11.

- Hamzah, F dan Setiawan, A. 2010. Accumulation Of Heavy Metals Pb, Cu, And Zn In The Mangrove Forest Of Muara Angke, North Jakarta. *Jurnal Ilmu dan Teknologi Kelautan Tropis*, 2: 41-52.
- Hanafiah, A. S., Sabrina, T., Hanafiah, D. S. 2015. Effect of Mycorrhiza Inoculation on The Growth Of Rubber Stumps (*Hevea brasiliensis* Muell Arg.) Clones Pb 260 And Nutrition Uptake On Various Soil Water Content At The Screen House. *Jurnal Pertanian Tropik*, 2: 68-77.
- Hanlon, M. T., and Coenen, C. 2011. Genetic Evidence for Auxin Involvement in Arbuscular Mycorrhizal Initiation. *New Phytologist* 189: 701–709
- Haruna, E. T., Isa, I., Suleman, N. 2012. Fitoremediasi Pada Media Tanah Yang Mengandung Cu Dengan Tanaman Kangkung Darat. *Sainstek- ejurnal.ung.ac.id*.
- Headley, J. V., Du, J. L., Peru, K. M., Gurprasad, N., Martin, D. W. M. 2008. Evaluation of Algal Phytodegradation of Petroleum Naphthenic Acids. *Journal of Environmental Science and Health, Part A: Toxic/Hazardous Substances and Environmental Engineering*, 43:227-232.
- Hermawan, B. 2011. Peningkatan Kualitas Lahan Bekas Tambang melalui Revegetasi dan Kesesuaiannya Sebagai Lahan Pertanian Tanaman Pangan. *Prosiding Seminar Nasional Budidaya Pertanian*. Bengkulu 7 Juli 2011. Hal: 60-70. ISBN 978-602-19247-0-9.
- Hidayat, Y. 2015. Growth of Primary, Secondary and Tertiary Roots of Seedling-Stem Cuttings of *Toona sinensis* Roem. *Wana Mukti Forestry Research Journal*, 6: 35-44.
- Hidayati, N. 2005. Phytoremediation and Potency of Hyperaccumulator Plants. *Journal Hayati*, 12: 35-40.
- Hidayati, N. 2013. Heavy Metal Hyperaccumulator Plant Physiology Mechanism. *J. Tek. Ling*, 14:75-82.
- Hildebrandt, U., Regvar, M., and Bothe, H. 2007. Arbuscular Mycorrhiza and Heavy Metal Tolerance. *Phytochemistry*, 68: 139–146.
- Hilwan, I dan Nurjannah, A. S. 2014. Potential Carbon Stock in Revegetation Stand of Post-Mining Land at PT Jorong Barutama Greston, South Kalimantan. *Jurnal Silvikultur Tropika*, 5: 188-195.

- Hu, Y., Nan, Z., Jin, C., Wang, N., Luo, H. 2013. Phytoextraction Potential of Poplar (*Populus alba* L. var. *pyramidalis* Bunge) from Calcareous Agricultural Soils Contaminated by Cadmium. *International Journal of Phytoremediation*, 16: 482-495.
- Huang, X. F., Chaparro, J. M., Reardon, K. F., Zhang, R., Shen, Q., dan Vivanco, J. M. 2014. Rhizosphere Interactions: Root Exudates, Microbes, and Microbial Communities. *Botany*, 92: 267–275.
- Husna., Budi, R. S. W., Mansur, I., Kusmana, C., Kramadibrata, K. 2014. Arbuscular Mycorrhizal Fungi from Rhizosphere of *Pericopsis mooniana* T. in South-East Sulawesi. *Berita Biologi*, 13: 263-273.
- Hussain, M. B., Ali, S., Azam, A., Hina, S., Farooq, M. A., Ali, B., Bharwana, S. A., dan Gill, M. B. 2013. Morphological, Physiological and Biochemical Responses of Plants to Nickel Stress: A Review. *African Journal of Agricultural Research*, 8: 1596-1602.
- Idham, A dan Nursjamsi, 2016. Aplikasi Mikoriza Dan Pupuk Organik Terhadap Pertumbuhan Tanaman Kakao (*Theobroma Cacao* L.) Di Kabupaten Gowa. *Jurnal Perspektif*, 1: 1 – 11.
- Idjudin, A. A. 2011. The Role of Land Conservation in Plantation Management. *Jurnal Sumberdaya Lahan* Vol. 5(2): 103-116.
- Igwilo, I. P., Oloyede, O. B., Enemor, V. H. 2007. Nutrient Composition and The Effect of Processing on *Canavalia* Ensiforms Seed. *IJOTAFS*, 1: 48-51.
- Ishtiaq, S., dan Mahmood, S. 2011. Phytotoxicity of Nickel and its Accumulation in Tissues of Three *Vigna* Species at Their Early Growth Stages. *Journal of Applied Botany and Food Quality*, 84: 223–228.
- Islam, M. S., Ueno, Y., Sikder, M. T., Kurasaki, M. 2013. Phytofiltration of Arsenic and Cadmium from The Water Environment Using *Micranthemum Umbrosum* (J.F. Gmel) S.F. Blake As A Hyperaccumulator. *International Journal of Phytoremediation*, 15:1010–1021.
- Ivanchenko, M. G., Muday, G. K dan Dubrovsky, J. G. 2008. Ethylene–Auxin Interactions Regulate Lateral Root Initiation and Emergence in *Arabidopsis thaliana*. *The Plant Journal*, 55: 335–347.

- Iwan, H dan Handayani, E. P. 2013. Diversity of Mesofauna and Macrofauna of Soil at Tin Post-Mined Area in Belitung Residence, Province of Bangka-Belitung. *JURNAL SILVIKULTUR TROPIKA*, 4: 35 – 41.
- Jackson, R. M., Mason, P. A. 1984. Mycorrhiza. Studies in biology. Edward Arnold, London.
- Jennings, D. H. 1995. The Physiology of Fungal Nutrition. Cambridge: Cambridge University Press.
- Jha, A., Kamalvanshi, M., Kumar, A., Chakravarty, N., Shukla, A., Dhyani, S. K. 2014. The Effects of Arbuscular Mycorrhizal Inoculations and Cotyledon Removal on Early Seedling Growth of *Pongamia pinnata*. *Turkish Journal of Botany*, 38: 526-535.
- Juhaeti, T., Syarif, F., Hidayati, N. 2005. Inventarisasi Tumbuhan Potensial Untuk Fitoremediasi Lahan Dan Air Terdegradasi Penambangan Emas. *Biodeversitas*, 6: 31-33.
- Kacalkova, L., Tlustos, P., Szakova, J. 2015. Phytoextraction of Risk Elements by Willow and Poplar Trees. *International Journal of Phytoremediation*, 17: 414–421.
- Kala, S. 2014. Rhizoremediation: A Promising Rhizosphere Technology. *Journal of Environmental Science, Toxicology and Food Technology*, 8: 23-27.
- Kalaminasih, D dan Pangesthi, L. T. 2013. Pengaruh Proporsi Kacang Koro Sayur (*Phaseolus lunatus*) dan Kacang Koro Pedang (*Canavalia ensiformis L*) Terhadap Mutu Organoleptik Tempe Koro. *e-journal Boga*, 2: 104 – 113.
- Karimi, A., Khodaverdilloo, H., Sepehri, M., Sadaghiani, M. R. 2011. Arbuscular Mycorrhizal Fungi And Heavy Metal Contaminated Soils. *African Journal of Microbiology Research*, 5:1571-1576
- Karti, P. D. M. H., Budi, R. S. W., Mardatin, N. F. 2009. Optimization Of Mycofer Plus And Augmentation Of Potential Soil Microorganism And Humic Acid For Rehabilitation Of Marginal And Degraded Land In Indonesia. *Jurnal Ilmu Pertanian Indonesia*, 14: 118-131.
- Khade, S. W., dan Adholeya, A. 2013. Feasible Bioremediation Through Arbuscular Mycorrhizal Fungi Imparting Heavy Metal Tolerance: A Retrospective. *Bioremediation Journal*, 11:33–43.

- Khan, M. R., dan Khan, M. M. 2010. Effect of Varying Concentration of Nickel and Cobalt on The Plant Growth and Yield of Chickpea. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, 4: 1036–1046.
- Koushik, S., Adhikari, K., Gangopadhyay, A. 2012. Effect of Mine Spoil on Native Soil of Lower Gondwana Coal Fields: Raniganj Coal Mines Areas, India. *International Journal Of Environmental Sciences*, 2: 1675-1687.
- Kumalawati, Z., Kafrawi., Asmawati. 2015. Identifikasi Dan Isolasi Spora Tunggal Cendawan Mikoriza Arbuskula Pada Rhizosferen Tebu (*Saccharum Officinarum* L.). *Prosiding Seminar Nasional Mikrobiologi Kesehatan Dan Lingkungan*. Hal: 53-71. ISBN 978-602-72245-0-6.
- Kurniawan, A. R., Surono, W. 2013. Model of Environmentally Sound Small-Scale Mining Reclamation : A Case Study of Pumice Mining Reclamation Area at Ijobalit East Lombok Regency West Nusa Tenggara Province. *Jurnal Teknologi Mineral dan Batubara*, 9: 165 – 174.
- Kusmana, C., Istomo., Wilarso, S., Dahlan, E. N. dan Onrizal. 2004. Upaya Rehabilitasi Hutan Dan Lahan Dalam Pemulihan Kualitas Lingkungan. *Seminar Nasional Lingkungan Hidup Dan Kemanusiaan*, Jakarta. www.marno.lecture.ub.ac.id. Diakses 5 April 2016.
- Laghlimi, M., Baghdad, B., Hadi, H. E., Bouabdli, A. 2015. Phytoremediation Mechanisms of Heavy Metal Contaminated Soils: A Review. *Journal of Ecology*, 5: 375 – 388.
- Laksono, R. A. 2015. Respon Pertumbuhan dan Hasil Tanaman Koro Pedang (*Canavalia ensiformis* L) Akibat Takaran Jenis Pupuk Organik dan Pengapuran Di Lahan Marginal Terdegradasi. DOI: 10.13140/RG.2.1.2695.4722.
- Lone, M. I., He, Z., Stoffella, P. J., Yang, X. 2008., Phytoremediation of Heavy Metal Polluted Soils and Water: Progress and Perspective. *Journal of Zhejiang University Science B*, 9:210-220.
- Malaviya, P dan Singh, A. 2013. Phytoremediation Strategies For Remediation Of Uranium-Contaminated Environments: A Review. *Critical Reviews In Environmental Science And Technology*, 42 :2575–2647.

- Mamuko, F., Walangitan, H., Tilaar, W. 2016. Perception And Participation of Community in Effort of Land and Forest Rehabilitation in East Bolaang Mongondow District. *Eugenia*, 22: 80-91.
- Manurung, Y. C., Hanafiah, A. S., Marbun, P. 2015. Effect of Soil Water Content to The Effectiveness of Arbuscular Mycorrhiza on the Growth and Nutrient Uptake of Rubber Stump (*Hevea brassiliensis* Muell. Arg.) *Screen House*, 3: 465 –475.
- Marques, A. P. G. C., Rangel, A. O. S. S., Castro, P. M. L. 2009. Remediation of Heavy Metal Contaminated Soils: Phytoremediation as A Potentially Promising Clean-Up Technology. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 39:622–654.
- Martuti, N. K. T. 2013. The Role of Plants Against Air Pollution in The Protocol Street of Semarang City. *Biosaintifika*, 5: 36-42.
- Maruto, R. 2013. PT Vale Akan Lepas 13.000 Hektare Lahan. www.antarasulteng.com. Diakses 8 Maret 2016.
- Matatula, J. 2009. Upaya Rehabilitasi Lahan Kritis Dengan Penerapan Teknologi Agroforestry Sistem Silvopastoral Di Desa Oebola Kecamatan Fatuleu Kabupaten Kupang. *Inotek*, 13: 63-74.
- Maulana, D. A Dan Darmawan, A. 2014. Land Cover Changes In Way Kambas National Park. *Jurnal Sylva Lestari*, 2: 87- 94.
- Meier, S., Borie, F., Bolan, N., Cornejo, P. 2012. Phytoremediation of Metal-Polluted Soils by Arbuscular Mycorrhizal Fungi . *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 42:741–775.
- Meyana, L., Sudadi, U., Tjahjono, B. 2015. Direction and Strategy of Former Tin Mining Area Development as Tourism Area In Bangka Regency. *Jurnal Pengelolaan Sumberdaya Alam dan Lingkungan*, 5: 51-60.
- Miska, M. E. E., Junaedi, A., Wachjar, A., Mansur, I. 2016. haracterization of Arbuscular Mychorrhizal Fungus from Sugar Palm (*Arenga pinnata* M) West Java and Banten. *Jurnal Silvikultur Tropika* Vol, 7:18-23.
- Mohammadi, K., Khalesro, S., Sohrabi, Y., dan Heidari, G. 2011. A review: beneficial effects of the mycorrhizal fungi for plant growth. *Journal of Applied Environmental and Biological Sciences*, 1: 310–319.

- Mrinal, K. G. 2004. Effect of Opencast Mining on Soil Fertility. *Journal of Scientific & Industrial Research*, 63: 1006-1009.
- Muharam. 2014. Penanaman Mangrove Sebagai Salah Satu Upaya Rehabilitasi Lahan Dan Lingkungan Di Kawasan Pesisir Pantai Utara Kabupaten Karawang. *Jurnal Ilmiah Solusi*, 1: 1-14.
- Muis, R., Ghulamahdi, M., Melati, M., Purwono., Mansur, I. 2016. Compatibility of Arbuscular Mycorrhizae Fungi Inoculants with Soybean Plants in Saturated Soil Culture. *Penelitian Pertanian Tanaman Pangan*, 35: 229-238.
- Muliadi, Liestianty, D., Yanny., Sumarna, S. 2013. Fitoremediasi: Akumulasi Dan Distribusi Logam Berat Nikel, Cadmium Dan Chromium Dalam Tanaman *Ipomea reptans*. *Prosiding Seminar Nasional Kimia Dan Pendidikan Kimia*. HKI Sumatera Barat, 7 Desember 2013. Hal: 1 – 5.
- Mulyana, D., Budi, R. S. W., Wasis, B., Wulandari, A. S. 2011. Micro Environmental Change in Various Form Land Cover Revegetation. *JMHT*, 17: 24–28.
- Muller, J. L., Guther M. 2007. Auxins as Signals in Arbuscular Mycorrhiza Formation. *Physiol Plant*, 129:320–33.
- Musfal. 2010. Potensi Cendawan Mikoriza Arbuskula Untuk Meningkatkan Hasil Tanaman Jagung. *Jurnal Litbang Pertanian*, 29:154-158.
- Nagel, F. J. P. 2011. Pelestarian Hutan Dalam Hubungannya Dengan Lingkungan Dan Potensi Ekonomi. *Prosiding PESAT*, 4: 7–13.
- Narula, N., E. Kothe., R. K. Behl. 2009. Role of Root Exudates In Plant-Microbe Interactions. *Journal of Applied Botany and Food Quality* 82, 122 – 130.
- Nasaruddin. 2010. *Dasar-dasar Fisiologi Tumbuhan*. Yayasan Forest Indonesia dan Fakultas Pertanian UNHAS.
- Natarajan, S., Stamps, R. H., Saha, U. K., Ma, L. Q. 2008. Phytofiltration of Arsenic-Contaminated Groundwater Using *Pteris vittata* L.: Effect of Plant Density And Nitrogen and Phosphorus Levels. *International Journal of Phytoremediation*, 10: 222–235.
- Nebiyou, M., Menamo, M. 2016. A Review Paper on: The Role of Agroforestry for Rehabilitation of Degraded Soil. *Journal of Biology, Agriculture and Healthcare*, 6: 128-135.

- Neto, L. B., Paiva, A. L. S., Machado, R. D., Arenhart, R. A dan Pinheiro, M. M. 2017. Interactions Between Plant Hormones and Heavy Metals Responses. *Genetics and Molecular Biology*, 40: 373-386.
- Netty, S., T. Wardiyati., M. D. Maghfoer, E. Handayanto, B. Ibrahim, A. Muchdar. 2016. Effect of Accumulator Plants on Growth and Nickel Accumulation of Soybean on Metal-Contaminated Soil. *Agriculture and Agricultural Science Procedia*, 9: 13 – 19.
- Ningrum. P. L., Navastara, A. M. 2015. Pemanfaatan Lahan pada Lokasi Bekas Tambang Tanah Urug di Kecamatan Ngoro, Mojokerto. *Jurnal Teknik ITS*, 4:36-40.
- Njurumana, N. G. 2013. Village Community and Flora Biodiversity Management in Home Garden System at Central of Sumba Regency. *Jurnal Penelitian Kehutanan Wallacea*, 5: 25-36.
- Octavianti, E. N., dan Ermavitalini, D. 2014. Identifikasi Mikoriza dari Lahan Desa Poteran, Pulau Poteran, Sumenep Madura. *Jurnal Sains Pomits*, 3: 53-57.
- Olsen, K. M dan Wendel, J. F. 2013. Crop Plants as Models for Understanding Plant Adaptation and Diversification. *Frontiersin Plant Science*, 4: 1- 16.
- Overvoorde, H., Fukaki, H., dan Tom Beeckman, T. 2010. Auxin Control of Root Development. *Cold Spring Harb Perspect Biol*, 2: 1-16.
- Pallardy, S. G. 2008. *Physiology of Woody Plants*. 3rd ed. Rev. ed. of: *Physiology of Woody Plants* or Theodore. T. Kozlowski Stephen G. Pallardy. 2nd ed.c1997. Elsevier Inc
- Pandey, B., Agrawal, M., Singh, S. 2013. Assessment of Air Pollution Around Coal Mining Area: Emphasizing on Spatial Distributions, Seasonal Variations and Heavy Metals, Using Cluster and Principal Component Analysis. *Atmospheric Pollution Research*, 5: 79-86.
- Panjaitan, E. 2015. Kontribusi Pemanfaatan Pupuk Hayati Dan Pupuk Kompos Terhadap Pertumbuhan Dan Serapan Fosfor Pada Tanaman Jagung. *Jurnal Pertanian Tropik*, 2: 200-210.
- Parascita, L., Sudiyanto, A., Nusanto, G. 2015. Rencana Reklamasi Pada Lahan Bekas Penambangan Tanah Liat Di Kuari Tlogowarupt. Semen Indonesia (Persero) Tbk. Pabrik Tuban, Jawa Timur. *Jurnal Teknologi Pertambangan*, 1: 1-4.

- Pierre, M. J., Bhople, B. S., Kumar, A., Erneste, H., Emmanuel, B., Singh, Y. N. 2014. Contribution of Arbuscular Mycorrhizal Fungi (AMF) and Rhizobium Inoculation on Crop Growth and Chemical Properties of Rhizospheric Soils in High Plants. *IOSR Journal of Agriculture and Veterinary Science*, 7: 45-55.
- Prasasti, O. H., Purwani, K. I., Nurhatika, S. 2013. Pengaruh Mikoriza *Glomus fasciculatum* Terhadap Pertumbuhan Vegetatif Tanaman Kacang Tanah yang Terinfeksi Patogen *Sclerotium rolfsii*. *Jurnal Sains Dan Seni Pomits*, 2:74-78.
- Prayudyaningsih, R., dan Ramdana, S. 2016. The Application of Arbuscular Mycorrhizal Fungi (AMF) and Compost to Improve the growth of Teak Seedlings (*Tectona grandis* L) on Limestone Post-mining Soil. *Jurnal Penelitian Kehutanan Wallacea*, 5: 37-46.
- Priyanto, Priyatno, B. J. 2007. Fitoremediasi Sebagai Sebuah Teknologi Pemulihan Pencemaran, Khusus Logam Berat. <http://l.tl.bppt.tripod.com>, diakses 28 Maret 2016.
- Pułka, J. S. 2013. Form Matters: Morphological Aspects of Lateral Root Development. *Annals of Botany*, 112: 1643–1654.
- Purnomo, D. W., Magandhi, M., Helmanto, H., Witono, J. R. 2015. Kinds of Reclamation Plants Potential for Phytoremediation at Ex-Gold Mining Area. *Pros Sem Nas Masy Biodiv Indon*, 1: 496-500.
- Pusat Penelitian dan Pengembangan Tanaman Pangan (PUSLITTAN). 2007. Kelayakan dan Teknologi Budi daya Koro Pedang (*Canavalia* sp.) <http://www.puslittan.bogor.net>. Diakses 9 maret 2016.
- Puspitasari, D., Purwani, K. I., Muhibuddin, A. 2012. Eksplorasi Vesicular Arbuscular Mycorrhiza (VAM) Indigenous pada Lahan Jagung di Desa Torjun, Sampang Madura. *Jurnal Sains Dan Seni*, 1: 19 – 22.
- Quideau, S. A., McIntosh, A. C. S., Norris, C. E., Lloret, E., Swallow, M. J. B., Hannam, K. 2016. Extraction and Analysis of Microbial Phospholipid Fatty Acids in Soils. *Journal of Visualized Experiments*, 114: 1-9.
- Rahman, R. 2015. The Effect Of Different Uses Of Organic Fertilizers On The Growth of Benggala Grass (*Panicum maximum*) Planted and The Content of Heavy Metals In The Post-Mining Land. Tesis Universitas Hasanuddin. Makassar .

- Rauf, A., Rahmawaty., Said, D. B. T. J. 2013. Sistem Pertanian Terpadu Di Lahan Pekarangan Mendukung Ketahanan Pangan Berkelanjutan Dan Berwawasan Lingkungan. Jurnal online Pertanian Tropik Pasca Sarjana FP USU, 1:1 - 8.
- Rezvania, M., Ardakanib, M. R., Rejalic, F., Zaefariand, F., Teimourib, S., Noormohammadie, G., Miransari, M. 2015. Uptake of Heavy Metals by Mycorrhizal Barley (*Hordeum vulgare* L.). Journal of Plant Nutrition, 38: 904 – 919.
- Rizwan, M., Ali, S., Rizvi, H., Rinklebe, J., Tsang, D. C.W., Meers, E., Ok, Y. S., Ishaque, W. 2016. Phytomanagement of Heavy Metals in Contaminated Soils Using Sunflower – A Review. Critical Reviews in Environmental Science and Technology, 46: 1498-1528.
- Rock, O. M., Okeke, O.C., Abraham, E. M. 2015. Environmental Problems of Surface and Underground Mining: a review. The International Journal Of Engineering And Science (IJES), 4 :12-20.
- Roehlano, M. B. 2009. Land Degradation and Rehabilitation in The Philippines. The Philippines Country Environmental Analysis. www.siteresources.worldbank.org. Diakses 5 April 2016.
- Romeiro, S., Laga, A. M. M. A., Furlani, P. R., Abreu, C. A. D., Pereira. B. F. F. 2007. Lead Uptake and Potential for Fitoremediation of *Canavalia ensiformes* L. Bragantia Campinas, 66: 327-334.
- Rooyen, M. W. V., van Rooyen, N., Stoffberg, G. H. 2013. Carbon Sequestration Potential of Post-Mining Reforestation Activities on the KwaZulu-Natal Coast, South Africa. Forestry An International Journal of Forest Research, 86: 211–223.
- Rosari, S. R., Bakri, S., Santoso, T., Wardani, D. W.S.R. 2017. Effect of Land Use Toward Pulmonary Tuberculosis Incidence: Study In Lampung Province. Jurnal Sylva Lestari, 5: 71-80.
- Rossi, S. C., Lagoa, A. M. M. A., Schiavinato, M. A. 2012. Tolerance Tocadmium in The Germination Anddevelopmentof Jack Beans. Amazonian Journal of Agricultural and Environmental Sciences, 55: 142-147.
- Saidi, A., Husin, E. F., Rasyidin, A., Eddiwal., Ismon, L. 2014. Selection of Aruscular Mycorrhizal Fungi (AMF) Indigeneus in Ultisol for Promoting The Production of Glmalin and Aggregate Formation Processes. Internasional Journal on Advanced Science Engineering Information Technology, 4: 42-47.

- Saifullah., Ghafoor, A., Zia, M. H., Murtaza, G., Waraich, E. A., Bibi, S., Srivastava, P. 2010. Comparison of Organic and Inorganic Amendments for Enhancing Soil Lead Phytoextraction by Wheat (*Triticum aestivum* L.). *International Journal of Phytoremediation*, 12: 633–649.
- Sakakibara, M., Watanabe, A., Sano, S., Inoue, M., Kaise, T. 2007. Phytoextraction and Phytovolatilization of Arsenic From As-Contaminated Soils by *Pteris vittata*. *Proceedings of the Annual International Conference on Soils, Sediments, Water and Energy*, 12: 267-272.
- Salisbury, B. F., Ross, W. C. 1992. *Plant Physiology*. Terjemahan D. R. Lukman dan Sumaryono. 1995. *Fisiologi Tumbuhan Jilid 2*. ITB. Bandung.
- Santun, R. P. S., Kusumastuti, E., Badri, L. N. 2008. Post-mining Land Characteristics and Rehabilitation Technique in Bangka and Singkep Islands. *Jurnal Tanah Dan Iklim*, 27: 57 – 74.
- Saputri, Y. E., Noli, Z. A., dan Suwirman, 2016. Respon Pertumbuhan Tanaman *Desmodium heterophyllum* W. dengan Pemberian Fungi Mikoriza Arbuskular (FMA) Pada Tanah Lahan Bekas Tambang Batubara Sawahlunto. *Biocelbes*, 10: 52-60.
- Sari, D. R. 2015. Isolation and Identification Soil Bacteria Around Plant Roots. *Bio-Site*. 1: 21-27.
- Sari, K. R., Tutik. N., Kristanti. I. P. 2012. Effect Of Mycorrhizal Arbuskular And Rhizobium On Peanuts Plants (*Arachis Hypogaea*) Planted In Madura Soil Medium Under A Drought Stress. www.digilib.its.ac.id. diakses 30 Maret 2016.
- Sawitri, R dan Mariana, T. 2010. Management and Behaviour of Eagle sat Wildlife Rescue Center of Cikananga, Sukabumi. *Jurnal Penelitian Hutan dan Konservasi Alam*, 7:257-270.
- Septiana, D., Indrawan, A., Dahlan, E. N., dan Jaya, I. N. S. 2004. Predicting Oxygen-Base Urban Forest Needs In Padang City, West Sumatera. *Jurnal Manajemen Hutan Tropika*, 10: 47-57.
- Seregin, I. V., dan Kozhevnikova, A. D. 2006. Physiological Role of Nickel and its Toxic Effects on Higher Plants. *Russian Journal of Plant Physiology*, 53: 257–277.

- Setiadi, Y dan Setiawan, A. 2011. Study of Arbuscular Mycorrhizal Fungi status at Rehabilitation Post-Nickel Mining Area (Case Study at PT INCO Tbk. Sorowako, South Sulawesi). *Jurnal Silviculture Tropika*, 3: 88 – 95.
- Setiadi, Y., Salim, F., Silmi, Y. 2014. Selection of Plants Species Adaptation in Petroleum Contaminated Soil. *Jurnal Silviculture Tropika*, 5: 160-166.
- Shackira, A. M., Puthur, J. T. 2017. Enhanced Phytostabilization of Cadmium by A Halophyte - *Acanthus ilicifolius* L. *International Journal of Phytoremediation*, 19: 319-326.
- Sharma, S., Anand, G., Singh, N., dan Kapoor, R. 2017. Arbuscular Mycorrhiza Augments Arsenic Tolerance in Wheat (*Triticum aestivum* L.) by Strengthening Antioxidant Defense System and Thiol Metabolism. *Frontiers in Plant Science*, 8: 1- 21.
- Sholihah, A. R. F., Sjarmidi, A. 2014. Ecosystem Evaluation of Post Sand Mining Land in Cimalaka, Sumedang. *Journal of Degraded Andmining Landsmanagement*, 1: 75-78.
- Simanungkalit, R. D. M. 2006. Cendawan Mikoriza Arbuskuler. www.balittanah.litbang.pertanian.go.id. diakses 28 Maret 2016
- Sittadewi, E. H., Kristijono. A., Sudiana. N. 2013. Bitumman Technology Application To Overcome Critical Land Post Mining (Case Study at Post Nickel Mining). *Jurnal Sains dan Teknologi Indonesia*, 15: 8-16.
- Siviero, M. A., Motta, A. M., Lima, D. S, Birolli, R. R., Huh, S. Y., Santinoni, I. A., Murate, L. S., de Castro, C. M. A., Miyauchi, M. Y. H., Zangaro, W., Nogueira, M. A., Andrade, G. 2008. Interaction Among N-fixing Bacteria and AM Fungi in Amazonian Legume Tree (*Schizolobium amazonicum*) in Field Conditions. *Applied Soil Ecology* 39: 144 – 152.
- Slamet, B., Thoha, A. S., Dinata, R. J. 2012. Hydrological Function Of Rubber Plantation (*Hevea brasiliensis* Muell. Arg) to Reducing The Magnitude of Net Rainfall. *FORESTA Indonesian Journal Of Forestry*, 1: 49-57.
- Smith, S. E., dan Read, D. J. 2008. Mycorrhizal Symbiosis. 3rd ed. Academic Press. San Diego, USA.

- Somero, G. N. 2009. The Physiology of Climate Change: How Potentials for Acclimatization and Genetic Adaptation Will Determine 'Winners' and 'Losers'. *The Journal of Experimental Biology*, 213: 912-920.
- Souza, L. A., Piotto, F. A., Nogueirol, R. C., Azevedo, R. A. 2013. Use of Non-Hyperaccumulator Plant Species for The Phytoextraction of Heavy Metals Using Chelating Agents. *Sci. Agric (Scientia Agricola)*, 70: 290-295.
- Sreekanth, T. V. M., Nagajyothi, P. C., Lee, K. D., dan Prasad, T. N. V. K. V. 2013. Occurrence, Physiological Responses and Toxicity of Nickel in Plants. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 10: 1129–1140.
- Sribas, G. 2013. Environment Management in Mining Areas (A Study of Raniganj and Jharia Coal Field in India). *Global Journal of Human Social Science*, 13: 11-20.
- Sriwahyuni. 2012. Rehabilitasi Lahan Bekas Tambang PT. Inco Sorowako Dengan Bahan Organik, Bakteri Pelarut Fosfat Dan Bakteri Pereduksi Nikel. *Jurnal Riset Industri*, 6:149-155.
- Steel, R. G. D dan Torrie, J. H. 1993. Principles and Procedures of Statistics. (diterjemahkan oleh Sumantri, B. 1989. Prinsip dan Prosedur Statistika. Gramedia Pustaka Utama.
- Suamba, I. W., Wirawan, I. G. P., Adiartayasa, W. 2014. Isolasi Dan Identifikasi Fungi Mikoriza Arbuskular (FMA) Secara Mikroskopis Pada Rhizosfer Tanaman Jeruk (*Citrus* sp.) Di Desa Kerta, Kecamatan Payangan, Kabupaten Gianyar. *E-Jurnal Agroekoteknologi Tropika*, 3: 201 – 208.
- Suarna, W. I., Kusumawati, N. N. C., Duarsa, M. A. P. 2015. Produksi Dan Kualitas Hijauan Pakan Pada Lahan Pasca Tambang Di Kabupaten Karangasem. *Pastura*, 4: 74 – 77.
- Subagio, A. 2010. Strategi Pencapaian Swasembada Kedelai Dengan Pengembangan Sumber Protein Nabati Alternatif. *PANGAN*, 19 :127-134.
- Sudana, W. 2005. Pemanfaatan Mikrobial Pelarut Fosfat Dan Mikoriza Untuk Perbaikan Fosfor Tersedia, Serapan Fosfor Tanah Ultisol Dan Hasil Jagung pada Ultisol. *J. Ilmu-Ilmu Pertanian Indonesia*. 6: 8-13.

- Sudarmanto, A., Buchori, I., Sudarno. 2013. Analisis Kemampuan Infiltrasi Lahan Berdasarkan Kondisi Hidrometeorologis Dan Karakteristik Fisik DAS Pada Sub DAS Kreo Jawa Tengah. Prosiding Seminar Nasional Pengelolaan Sumberdaya Alam dan Lingkungan 2013: 175-182.
- Sudaryono, S. 2011. Pengaruh Naungan Terhadap Perubahan Iklim Mikro Pada Budidaya Tanaman Tembakau Rakyat. Jurnal Teknologi Lingkungan, 5:56-60.
- Sufardi, Syakur, dan Karnilawati, 2013. Organic Ameliorant and Mycorrhiza Increase Soil Phosphate Status and Maize Yield on Andiso. Jurnal Agrista. 17: 31 – 48.
- Sufian, A. T., Jha, D. K. 2015. Influence of Open Cast Mining on The Soil Properties of Ledo Colliery of Tinsukia District of Assam, India. International Journal of Scientific and Research Publications, 5:1 – 4.
- Suharno., R. P. Sancayaningsih., E. S. Soetarto., R. S. Kasiamdari. 2014. The Presence of Arbuscular Mycorrhizal Fungi in the Tailings of Mining Gold Timika as An Attempt of Environmentally Friendly Land Rehabilitation. J. Manusia Dan Lingkungan, 21 : 295-303.
- Suharsi, T. K., Surahman, M., Rahmatani, S. F. 2013. Effect of Planting Space and Prunning on Seed Production and Seed Quality of Jack Bean (*Canavalia ensiformis*). Jurnal Ilmu Pertanian Indonesia, 18:172-177.
- Sukmawaty, E., Hafsan., Asriani. 2016. Identifikasi Cendawan Mikoriza Arbuskula Dari Perakaran Tanaman Pertanian. Biogenesis, 4(1): 16-20.
- Sulthoni. F. 2016. Pengaruh Pemberian Agensia Hayati Mikoriza (*Acaulospora Tuberculata*) Terhadap Intensitas Penyakit Layu Fusarium Pada Tanaman Bawang Merah (*Allium Ascalonicum* L). Fakultas Pertanian Universitas Muhammadiyah Purwokerto.
- Sun, X. G dan Tang, M. 2013. Effect of Arbuscular Mycorrhizal Fungi Inoculation on Root Traits and Root Volatile Organic Compound Emissions of Sorghum Bicolor. South African Journal of Botany, 88: 373–379.
- Suprpto, S. J. 2012. Tinjauan Reklamasi Lahan Bekas Tambang Dan Aspek Konservasi Bahan Galian. Badan Geologi. <http://psdg.bgl.esdm.go.id>. Diakses 9 Maret 2016.

- Susanti, Anwar, S., Fuskhah, E., Sumarsono. 2014. Growth And Land Equivalent Ratio of Sword Bean (*Canavalia ensiformis*) in Intercropping with Maize (*Zea mays*). *Agromedia*, 32: 38-44.
- Syamsiyah, J., Sunarminto, B. H., Hanudin, E., Widada, J. 2014. Sains Tanah. *Jurnal Ilmu Tanah dan Agroklimatologi*, 11: 39-46.
- Tabrizi, L., Mohammadi, S., Delshad, M., Zadeh, B. M. 2015. Effect of Arbuscular Mycorrhizal Fungi on Yield and Phytoremediation Performance of Pot Marigold (*Calendula officinalis* L.) Under Heavy Metals Stress, *International Journal of Phytoremediation*, 17:1244-1252.
- Takatsuka, H dan Umeda, M. 2014. Hormonal Control of Cell Division and Elongation Along Differentiation Trajectories In Roots. *Journal of Experimental Botany*, 65: 2633–2643.
- Takehisa, H., Sato, Y., Igarashi, M., Abiko, T., Antonio, B. A., Kamatsuki, K., Minami, H., Namiki, N., Inukai, Y., Nakazono, M dan Nagamura, Y. 2012. Genome-Wide Transcriptome Dissection of The Rice Root System: Implications For Developmental and Physiological Functions. *The Plant Journal*. 69: 126–140.
- Tamura, H., Honda, H., Sato, S., dan Kamachi, H. 2005. Pb Hyperaccumulation and Tolerance in Common Buckwheat (*Fagopyrum esculentum* M.). *Journal of Plant Research*, 118,355–359.
- Tauchid, I., Nurhidayati, T., Priyanto, B. 2013. Effect Of *Glomus Aggregatum* Schenk & Smith Emend. Koske Inoculated To Vetiver (*Chrysopogon Zizanioides* (L.) Roberty) For Degrading Total Petroleum Hydrocarbon. Undergraduate Thesis Of Biology. <http://digilib.its.ac.id>. diakses 28 Maret 2016.
- Triadriani, L. N., Handayanto, E., dan Utami, S. R. 2014. Penggunaan *Caladium bicolor*, *Paspalum conjugatum*, Dan *Commelina nudiflora* Untuk Remediasi Tanah Tercemar Merkuri (Hg) Limbah Tailing Tambang Emas Serta Pengaruhnya Terhadap Pertumbuhan Dan Produksi Tanaman Jagung (*Zea mayz* L.). *Jurnal Tanah dan Sumberdaya Lahan*, 1: 72 - 82.
- Tuheteru, F. D. 2010. The Diversity and Genetic Conservation Strategies of Merbau (*Intsia bijuga* (Colebr.) O. Kuntze) in Papua. *Mitra Hutan Tanaman*, 5: 39 – 50.

- Turnau, K. 1988. Heavy Metal Content and Localization In Mycorrhizal *Euphorbia cyparissias* Zinc Wastes in Southern Poland. *Acta Societatis Botanicorum Poloniae*, 67: 105–113.
- Utama, M. Z. U dan Sudirman. Y., 2003. The Role of Mycorrhiza, Rhizobium and Hurnic Acid on The Growth and Nutrient Content of Several Legrune Cover Crop Species. *Bul. Agron. Vol.31(3)*: 94 – 99.
- Vale. 2012. Sustainability Report. Opportunity to Grow. PT. Vale Indonesia Tbk.
- Vale. 2014. Sustainability Report. Creating Added Value Through Performance Excellence for Sustainability. PT. Vale Indonesia Tbk.
- Vale. 2015. Sustainability Report. Unwavering Commitment . PT. Vale Indonesia Tbk.
- Vale. 2016. Rehabilitation of PT Vale’s Post-mining Areas. Restore land, Perform Sustainability Mission. Communications and External Affairs. PT Vale Indonesia Tbk.
- Vettori, L., Russo, A., Felici, C., Fiaschi, G., Morini, S., dan Toffanin, A. 2010. Improving Micropropagation: Effect of *Azospirillum brasilense* Sp245 on Acclimatization of Rootstocks of Fruit Tree. *Journal of Plant Interactions*, 5: 249-259.
- Viobeth, B. R., Sumiyati, S., Sutrisno, E. 2013. Fitoremediasi Limbah Mengandung Timbal (Pb) Dan Nikel (Ni) Menggunakan Tanaman Kiambang (*Salvinia Molesta*). *Jurnal Teknik Lingkungan*, 2:1-8.
- Wahjuningsih, S. B. dan Saddewisasi, W. 2013. Pemanfaatan Koro Pedang Pada Aplikasi Produk Pangan Dan Analisis Ekonominya. *Riptek*, 7: 1-10.
- Warouw, V., Kainde, R. P. 2010. Populasi Jamur Mikoriza Vesikular Arbuskular (MVA) Pada Zone Perakaran Jati . *Eugenia*, 16: 38-45.
- Widiatma, P. S., Wirawan, I. G. P., Susrama, I. G. K. 2015. Identifikasi Mikoriza Vesikular Arbuskular (MVA) pada Rhizosfer Tanaman Ubi Jalar (*Ipomea batatas* L) dan Ubi Kayu (*Manihot esculanta*) serta Perbanyakannya dengan Media Zeolit. *E. Jurnal Agroekoteknologi*, 4: 253-263.

- Widiatmaka, Suwarno, Kusmaryandi, N. 2010. Karakteristik Pedologi Dan Pengelolaan Revegetasi Lahan Bekas Tambang Nikel: Studi Kasus Lahan Bekas Tambang Nikel Pomalaa, Sulawesi Tenggara. *J Tanah Lingk.* 12: 1-10.
- Widyati, E. 2013. Understanding on Plants-Microbes Interaction. *Jurnal Tekno Hutan Tanaman.* 6.1:13-20.
- Wihardjaka, A. 2010. Emisi Gas Dinitrogen Oksida dari Tanah Sawah Tadah Hujan yang diberi Jerami Padi dan Bahan Penghambat Nitrifikasi. *Jurnal Biologi Indonesia,* 6: 211-224.
- Wijaksono, M. I., Rahayu, M., Samanhudi. 2014. Effect of Mycorrhizal and Organic Fertilizer on the Growth of Garlic. *Jurnal Ilmu Ilmu Pertanian,* 29:35-44.
- Windrati, W. S., Herry, B., Diniyah, N. 2015. Pengembangan Teknologi Pangan Berbasis Koro-Koroan Sebagai Bahan Pangan Alternatif Pensubstitusi Kedelai. Universitas Jember.
- Wu, Q. S., Li G. H., Zou Y. N. 2011. Roles of Arbuscular Mycorrhizal Fungi on Growth and Nutrient Acquisition of Peach (*Prunus persica* L. Batsch) Seedlings. *The Journal of Animal & Plant Sciences,* 21: 746-750.
- Yasid, M. 2015. Tahun Ini Vale akan Mereklamasi Lahan 77 Ha. www.industri.kontan.co.id. diakses 8 Maret 2016.
- Yelianti, U., Kasli, M., Kasim., dan Husin, E. F. 2009. Biodiversity of Arbuscular Mychorrizal Fungi (AMF) on Potatos Rhizosphere and It Potential As Biofertilizer. *Sainstek,* 12: 59 – 64.
- Yesi, I. P. 2009. Karakteristik Tanah Pada Lahan Bekas Tambang Yang Ditanami Rumput Signal (*Brachiaria decumbens* Stapf) Di PT. International Nickel Indonesia Sorowako Sulawesi Selatan. Institut Pertanian Bogor.
- Yudhistira, Hidayat, W. K., Hadiyanto, A. 2011. Kajian Dampak Kerusakan Lingkungan Akibat Kegiatan Penambangan Pasir Di Desa Keningar Daerah Kawasan Gunung Merapi. *Jurnal Ilmu Lingkungan,* 9: 76-84.
- Zancheta, A. C. F., Abreu, C. A. D., Zambrosi, F. C. B., Erismann, N. D. M., Lagoa, A. M. M. A. 2015. Cadmium Accumulation by Jack-Bean and Sorghum in Hydroponic Culture. *International Journal of Phytoremediation,* 17: 298–303.

- Zheng, S., Wang, C., Shen, Z., Quan, Y., Liu, X. 2015. Role of Extrinsic Arbuscular Mycorrhizal Fungi in Heavy Metal-Contaminated Wetlands with Various Soil Moisture Levels, *International Journal of Phytoremediation*, 17: 208-214.
- Zhupanov, I. V. 2013. Anatomical Features of Lateral Root Formation in *Butomus umbellatus* L. *Modern Phytomorphology*, 5: 245–248.
- Zulkarnain, Joy, B., Tuhpawana, P., Prawira, I. 2014. Soil Erosion Assessment of The Post-Coal Mining Site in Kutai Kartanagera District, East Kalimantan Province. *Internat. J. Sci. Eng.*, 7:130-136.

LAMPIRAN

Lampiran 1

PEMBUATAN PREPARAT AKAR DENGAN METODE CLEARING DAN STAINING

(Jackson dan Mason, 1984)

Pembuatan preparat akar dibutuhkan untuk mengamati akar tanaman yang terinfeksi Mikoriza Arbuskular. Tahapan pembuatan preparat akar adalah:

1. Ambillah akar dari tanaman misalnya tanaman dari polybag dengan cara merendam polybag di dalam ember yang berisi air lalu polybag disobek ketika masih di dalam ember untuk meminimalisir kerusakan akar rambut yang akan diambil. Setelah akar terpisah dari tanah, akar dicuci hingga bersih dengan air yang mengalir sedang.
2. Ambil rambut akar secara acak dan potong kurang lebih 1 cm. Ambil sebanyak mungkin rambut akar yang ingin diamati.
3. Rambut akar yang telah dipotong, kemudian rendam dalam KOH 10 % selama 10 menit pada suhu 90°C di dalam water bath.
4. Selanjutnya, rambut akar tersebut dikeluarkan dari KOH 10% lalu dicuci bersih dengan akuades kemudian dicelupkan ke dalam HCl 2% sebentar.
5. Setelah dicelupkan HCl 2% cuci lagi dengan akuades lalu warnai dengan Tryphan Blue lactophenol 0,05% pada suhu 80°C-90°C selama 5 menit dalam water bath.
6. Bila kelebihan warna maka dilakukan destaining dengan merendam akar dalam lactophenol selama 24 jam.
7. Akar-akar yang telah terwarnai diamati di bawah mikroskop dengan perbesaran 100–400X.

Tabel Lampiran 1. Karakteristik tanah kupasan (*overburden*) di area pasca tambang nikel Rante, desa Sorowako, kabupaten Luwu Timur, Sulawesi Selatan, Indonesia.

Karakteristik	Nilai
Pasir (%)	32
Debu (%)	35
Liat (%)	33
pH	5,62
C Organik (%)	1,88
KTK (cmol (+) kg ⁻¹)	9,63
KB (%)	69
Al (ppm)	58,7
K (ppm)	4,4
P (ppm)	1,3
Ni (ppm)	14.200

Analisis: Laboratorium Tanah Fakultas Pertanian Universitas Hasanuddin dan Laboratorium Kimia Politeknik Ujung Pandang, Makassar. Data sebelum penanaman.

Tabel Lampiran 2. Analisis ragam infeksi akar (IA) tanaman *C. ensiformis* yang diintroduksi *Acaulospora* sp dan kelimpahan spora *Acaulospora* sp pada media tanah setelah penanaman (KSMt).

Sumber keragaman	DB	F. Hitung	
		IA	KSMt
Kelompok	2	2,15 ^{tn}	0,25 ^{tn}
Perlakuan	2	3,35 ^{tn}	126,75 ^{**}
KK (%)		25,82	10,19

Keterangan: tn=tidak nyata; *= nyata; **= sangat nyata. AT: Akar yang terinfeksi, KSMt; Kelimpahan spora dalam media setelah penanaman.

Tabel Lampiran 3. Pengamatan infeksi akar *C. ensiformis* yang diintroduksi *Acaulospora* sp.

No Preparat	A0		A1		A2	
	infeksi	%	infeksi	%	Infeksi	%
1	H	100	H	80	H	100
2	H	20	H, V	100	H	100
3	H	40	H, V	100	H, V	100
4	-	0	H	100	H	100
5	H	40	H, V	40	H	40
6	H	40	H, V	60	H	60
7	-	0	H	100	-	0
8	H	80	H	60	H	60
9	H	100	H	100	H	80
10	-	0	H, V	80	-	0

Keterangan: A0, control; A1, *Acaulospora* sp indigenous; A2, *Acaulospora* sp eksogenous, H, Hifa; V, Vesikel

Tabel Lampiran 4. Analisis ragam jumlah akar lateral (CA), panjang akar (PA), volume akar (VA), berat kering akar (BKA), ratio tajuk akar (RTA) *C. ensiformis* yang diintroduksi *Acaulospora* sp.

Sumber keragaman	DB	F. Hitung				
		JAL	PA	VA	BKA	RTA
Kelompok	2	6,87 ^{tn}	2,38 ^{tn}	1,19 ^{tn}	0,16 ^{tn}	0,32 ^{tn}
Perlakuan	2	14,18 ^{**}	2,26 ^{tn}	0,27 ^{tn}	0,74 ^{tn}	0,21 ^{tn}
KK (%)		8,95	15,75	5,31	15,66	8,71

Keterangan: tn=tidak nyata; *= nyata; **= sangat nyata.

Tabel Lampiran 5. Konsentrasi logam nikel (ppm) pada organ *C. ensiformis* yang diintroduksi *Acaulospora* sp. pada umur 30, 60, dan 90 HST.

Perlakuan	Umur (hari)											
	30			60				90				
	AK	BT	DN	AK	BT	DN	BG	AK	BT	DN	BH	BJ
Tanpa <i>Acaulospora</i> sp	11832	8485	8185	13416	7681	7615	7615	10049	8000	7810	7681	7615
<i>A. denticulata</i> indiginous	11575	8124	8246	13379	7483	7681	7810	11000	8426	7937	7937	7874
<i>A. tuberculata</i> eksoginuous	12727	7615	7416	13266	7071	7071	8062	9055	8602	7937	8306	7681

Keterangan: AK=Akar, BT=Batang, DN=Daun, BG=Bunga, BH=Buah, BJ=Biji, Data yang ditampilkan merupakan hasil transformasi akar data primer yang ditampilkan dalam satuan ppm.

Tabel Lampiran 6. Analisis ragam akumulasi logam (AN), efisinesi penyerapan (EP), laju reduksi (LR), logam nikel *C. ensiformis* yang diintroduksi *Acaulospora* sp.

Sumber keragaman	DB	F. Hitung		
		AL	EP	LR
Kelompok	2	158,97 ^{**}	7,81 [*]	145,14 ^{**}
Perlakuan	2	0,69 ^{tn}	0,74 ^{tn}	0,30 ^{tn}
KK (%)		17,45	10,73	5,31

Keterangan: tn=tidak nyata; *= nyata; **= sangat nyata.

Tabel Lampiran 7. Karakteristik tanah kupasan (*overburden=OB*) di area pasca tambang nikel Rante, desa Sorowako, kabupaten Luwu Timur, Sulawesi Selatan, Indonesia.

Karakteristik	Perlakuan		
	A0	A1	A2
Pasir (%)	32	32	32
Debu (%)	35	35	35
Liat (%)	33	33	33
pH (H ₂ O)	5,62	5,96	6,35
BO	2,90	3,38	2,16
KTK (cmol (+)kg ⁻¹)	8,62	9,86	10,25
KB (%)	74	57	62
Al (ppm)	52.900	56.600	59.100
K (ppm)	4.400	4.400	4.700
P (ppm)	1.200	1.400	1.200
Ni (ppm)	14.500	14.200	14.200

Analisis: Laboratorium Tanah Fakultas Pertanian Universitas Hasanuddin dan Laboratorium Kimia Politeknik Ujung Pandang, Makassar. A0, Tanpa *Acaulospora* sp; A1, *A.denticulata* indigenous; A2, *A.tuberculata* eksogenous. Data setelah penanaman.

GLOSARIUM

Fitoremediasi adalah sebuah proses yang melibatkan tanaman berklorofil untuk mengurangi atau menurungkan kandungan polutan yang terdapat pada lingkungan hingga mencapai konsentrasi yang tidak berbahaya.

Phitorhizoremediasi adalah suatu tindakan yang melibatkan tanaman hijau dan mikroorganime yang mengalami proses simbiosis untuk mereduksi kandungan senyawa polutan yang terdapat pada lingkungan hingga mencapai konsentrasi yang aman.

Rhizosfer adalah suatu zona lingkungan mikro yang berada disekitar perakaran tanaman.

Remediasi adalah kegiatan untuk membersihkan permukaan tanah yang tercemar.

Rehabilitasi lahan merupakan suatu usaha memperbaiki, memulihkan kembali dan meningkatkan kondisi lahan yang rusak agar dapat berfungsi secara optimal baik sebagai unsur produksi, media pengatur tata air, maupun sebagai unsur perlindungan alam dan lingkungannya.

Indiginous merupakan istilah bagi mahluk hidup yang menempati disuatu daerah atau dapat juga diterjemahkan sebagai penduduk pribumi.

Exogenous merupakan istilah bagi mahluk hidup yang bukan penduduk pribumi.

Reduksi adalah kegiatan pengurangan konsentrasi senyawa melalui proses pengikatan oleh suatu mahluk hidup.

Lahan adalah lingkungan abiotik dan biotik yang berkaitan dengan daya dukungnya terhadap kehidupan dan kesejahteraan mahluk hidup itu sendiri.

Tambang adalah Tambang adalah tempat terjadinya kegiatan penambangan

Pascatambang (Mine Closure) adalah suatu proses penghentian suatu kegiatan pertambangan karena telah habisnya cadangan bahan galian atau berhenti karena keekonomian

Tanaman adalah beberapa jenis tumbuhan yang dibudidayakan (aspek agronomi) pada suatu ruang atau media untuk dipanen pada masa ketika sudah mencapai tahap pertumbuhan tertentu.

Kolonisasi mengacu pada mikroorganisme yang tidak bereplikasi pada jaringan yang ditempatinya. Semua organisme multisel mengalami kolonisasi oleh organisme lain sampai dengan tahap tertentu, yang umumnya bersifat mutualisme atau komensalisme

Jaringan adalah kumpulan sel yang memiliki bentuk dan struktur yang sama untuk fungsi tertentu

Infeksi mengacu pada keadaan di mana mikroorganisme bereplikasi dan jaringan menjadi terganggu.

Spora adalah satu atau beberapa sel (bisa haploid ataupun diploid) yang terbungkus oleh lapisan pelindung. Sel ini dorman dan hanya tumbuh pada lingkungan yang memenuhi persyaratan tertentu, yang khas bagi setiap spesies

Hifa (bahasa Latin: hypha, jamak hyphae) adalah struktur fungi berbentuk seperti tabung yang terbentuk dari pertumbuhan spora atau konidia.

Vesikel adalah sebuah ruang pada sel yang dikelilingi oleh membran sel. Ruang biasanya ditempati oleh sitoplasma yang terdiri dari organel dan sitosol. Lubang saluran masuk dan keluarnya sesuatu.

Fungi adalah nama regnum dari sekelompok besar makhluk hidup eukariotik heterotrof yang mencerna makanannya di luar tubuh lalu menyerap molekul nutrisi ke dalam sel-selnya. Kalangan ilmuwan kerap menggunakan istilah cendawan sebagai sinonim bagi Fungi.

Introduksi adalah usaha sadar atau tidak sadar memasukkan suatu jenis mikroorganisme atau organisme ke dalam satu habitat yang baru.

INDEX

A

agen, 7, 22, 29, 38, 46, 48, 61, 64
air, 3, 7, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 16, 17, 20, 25, 27,
32, 33, 37, 89
akar, vii, viii, 4, 11, 18, 19, 23, 24, 25, 26, 27, 28,
29, 32, 33, 35, 36, 37, 38, 39, 40, 42, 45, 46,
47, 48, 56, 57, 58, 59, 60, 61, 63, 89, 90, 91
aklimatisasi, 47
analisis, 1, 9, 11, 16, 21, 22, 41, 42, 45, 48, 56
antioksidan, 24, 34, 50
Asosiasi, 25
auksin, 49

B

batang, vii, 28, 33, 35, 42, 57, 58, 63
beracun, 8, 14, 35, 50
biji, 20, 21, 22, 34, 42, 63
bunga, 19, 34, 42, 63

C

Canavalia, iv, vii, viii, 3, 4, 5, 19, 22, 40, 42, 46,
65, 66, 68, 72, 73, 74, 78, 79, 83, 84
cekaman, 27, 36, 64
cemaran, 64

D

daun, vii, 4, 11, 19, 21, 22, 23, 32, 33, 35, 42, 58,
59, 63
denticulata, viii, 41, 43, 44, 46, 48, 58, 61, 63,
64, 91, 92
dinding, 35, 61

E

efisiensi, vii, 22, 25, 35, 37, 56, 60, 61
eksoginuous, viii, 41, 43, 44, 46, 48, 91
Eksudat, 26
elektron, 61
ensifomis, iv, vii, viii, 3, 4, 5, 19, 20, 22, 23, 24,
39, 40, 42, 43, 44, 45, 46, 47, 48, 56, 57, 58,
59, 60, 61, 64, 65, 66, 69, 73, 74, 84, 90, 91
enzim, 4, 20, 21, 24, 25, 26, 27, 34, 50

F

fisiologis, 21, 26, 36, 47
fitoakumulator, viii, 3, 5, 23, 39, 58, 64
Fitoremediasi, 17, 32, 34, 71, 73, 76, 78, 85
Fungi, 25, 35, 65, 66, 67, 72, 73, 75, 76, 78, 79,
80, 81, 82, 83, 84, 86, 87, 94

G

gas, 1, 16
Gigaspora, 4, 28, 29, 30, 31, 37, 68
Glomus, 4, 27, 28, 29, 30, 35, 36, 37, 38, 67, 68,
78, 84

H

hayati, 46, 61
HCN, 20
hifa, 27, 35, 45, 61
hiperakumulator, 24, 33

I

indiginous, viii, 41, 43, 44, 46, 48, 58, 61, 63, 64,
91
Indonesia, viii, 1, 2, 4, 17, 39, 42, 64, 69, 73, 76,
77, 81, 82, 83, 85, 86, 90, 92, 97
infeksi, viii, 29, 40, 46, 90
introduksi, 21, 37, 45, 48

K

konsentrasi, viii, 3, 18, 23, 24, 25, 33, 35, 36, 37,
40, 46, 56, 58, 61, 63
Koro, iv, 19, 20, 65, 69, 73, 74, 78, 85, 86

L

lahan, iv, vi, viii, 2, 3, 4, 5, 7, 9, 10, 11, 12, 13, 14,
15, 16, 17, 18, 19, 21, 22, 28, 35, 37, 39, 40,
41, 64
lateral, vii, 49, 50, 51, 53, 91
logam, vii, viii, 2, 3, 4, 5, 8, 9, 10, 16, 17, 23, 24,
25, 27, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 42, 43, 47,
56, 57, 58, 59, 60, 61, 62, 63, 64, 91

M

MA, 4, 5, 27, 28, 35, 36, 56, 61
mikoriza, vi, viii, 5, 22, 25, 27, 28, 29, 30, 31, 32,
34, 35, 36, 37, 38, 39, 40, 41, 42, 44, 45, 46,
48, 61
Mikrobiologi, viii, 74
miselium, 35, 61
morfologi, 47

N

nikel, vii, viii, 1, 2, 3, 4, 5, 7, 10, 11, 39, 40, 41,
42, 43, 44, 46, 47, 48, 56, 57, 58, 59, 60, 61,
64, 90, 91, 92
Nursery, viii, 42
nutrisi, 5, 8, 20, 23, 24, 26, 35, 36, 56

O

organik, 3, 7, 10, 11, 19, 22, 25, 32, 34, 50

P

pasca tambang, viii, 3, 5, 8, 9, 10, 12, 15, 39,
40, 48, 90, 92
pedang, vii, 3, 17, 19, 20, 21, 22, 42
Penelitian, v, viii, 3, 37, 42, 43, 64, 67, 76, 77,
78, 80, 97
penyerapan, vii, 4, 14, 24, 35, 37, 43, 56, 60, 61,
91
perlakuan, viii, 21, 22, 24, 29, 41, 42, 44, 45, 46,
47, 48, 49, 56, 60, 61
pertanian, 3, 4, 7, 15, 18, 22, 29, 64, 81

polong, 19, 21, 42, 63
protein, 20, 22, 23, 26, 61

R

rehabilitasi, vi, viii, 3, 4, 12, 13, 14, 15, 18, 19,
39, 40
Rhizosfer, 25, 26, 82, 85, 93

S

sel, 4, 21, 22, 25, 26, 35, 58, 61
simbiosis, 25, 36, 61
sinyal, 49, 53
Sorowako, viii, 2, 11, 42, 65, 81, 82, 86, 90, 92

T

tanah, 2, 3, 5, 7, 8, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17,
18, 20, 22, 25, 26, 27, 28, 29, 31, 32, 33, 34,
35, 36, 37, 43, 48, 56, 61, 89, 90, 92
tanaman, vi, vii, viii, 3, 4, 5, 8, 10, 11, 12, 14, 15,
18, 19, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30,
31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 40, 42, 43,
44, 45, 46, 47, 48, 56, 58, 61, 64, 89, 90
toksin, 24
tuberculata, viii, 31, 41, 43, 44, 46, 48, 91, 92

V

Vale, viii, 2, 4, 39, 42, 64, 69, 75, 85, 86
varians, 45, 48
vesikel, 26, 45
volatil, 50

BIODATA PENULIS

Muh. Akhsan Akib. Lahir di Watan Soppeng pada 2 Desember 1973, salah satu Alumni (1992) Sekolah Pertanian Pembangunan (SPP) Negeri Rappang, Menyelesaikan studi (S1) 1997 di Fakultas Pertanian, Universitas Muslim Indonesia (UMI), Program Studi Agronomi. Pendidikan Magister (S2) Tahun 2003 di Program Pascasarjana Universitas Hasanuddin (UNHAS) Kekhususan Tanaman, Pendidikan Doktor (S3) Tahun 2018 di Program Pascasarjana Universitas Hasanuddin (UNHAS), Program studi Ilmu-ilmu Pertanian.

Profesi Dosen dijalani sejak tahun 2004 di Fakultas Pertanian Universitas Sulawesi Tenggara (UNSULTRA) Kendari, dan tahun 2005 beralih ke Universitas Muhammadiyah Parepare (UM Parepare) di Fakultas Pertanian, Peternakan dan Perikanan, Program Studi Agroteknologi. Tahun 2011 diberikan kepercayaan untuk menjadi Plt. Sekertaris Lembaga Pengabdian Masyarakat UM Parepare, dan pada tahun 2013 diberikan tanggung jawab untuk menduduki Jabatan Wakil Dekan II Fakultas Pertanian, Peternakan dan Perikanan. Dalam meniti karier sebagai profesi Dosen yang melaksanakan Tridarma Perguruan Tinggi (Pendidikan dan Pengajaran, Penelitian dan Pengabdian Kepada Masyarakat) juga aktif mengikuti seminar (Nasional dan Internasional) dan menulis artikel yang dimuat pada jurnal Nasional dan Internasional, selain itu juga aktif diberbagai organisasi keagamaan, sosial dan profesi seperti Muhammadiyah, ICMI, FLipMas, AMI, dan Merpati Putih.