

Kolonisasi Fungi Mikoriza Arbuskular (FMA) pada Rizosfer Beberapa Vegetasi di Lahan Pasca Tambang Batu Bara dengan Tingkat Kelerengan Berbeda

Colonization of Arbuscular Mycorrhizal Fungi (AMF) in the Rhizosphere of Several Vegetations in Ex-Coal Mining Lands with Different Slope Degrees

Muhammad Parikesit Wisnubroto[✉], Armansyah, Aswaldi Anwar, Dede Suhendra

Agroecotechnology Study Program, Faculty of Agriculture, Universitas Andalas, Indonesia

[✉]Corresponding author email: muhammadparikesit@agr.unand.ac.id

Article history: submitted: August 31, 2023; accepted: November 13, 2023; available online: November 30, 2023

Abstract. Mining activities, especially coal, have the potential to harm the environment, one of which is to cause land damage. As for rehabilitating the land, revegetation is needed, including using the help of Arbuscular Mycorrhizal Fungi (AMF). This research aimed to determine the percentage of AMF spore colonization, which indicates the compatibility between AMF and existing vegetation on ex-coal mining land with several different slopes, thereby providing initial information to determine suitable plant types to be combined with AMF spores that support the revegetation step. The stages of the study carried out were taking soil samples from former coal mining land, identifying vegetation, extracting spores, and identifying AMF spores found. Soil sampling for analysis of soil chemical properties and observation of mycorrhizal spores on former coal mining land was carried out based on random sampling at a depth of 0-20 cm with five types of slopes, namely flat, sloping, slightly steep, steep, and extremely steep. The results of the research showed that mycorrhizal colonization in the soil of ex-coal mining land had different percentage values for each type of slope, reaching 30% (flat), 21.58% (sloping), 13.16% (slightly steep), 23.34% (steep), and 6.19% (extremely steep). The steeper the slope, the lower the colonization. Based on the frequency, *Glomus* sp. can be found on every type of slope, thus indicating that this type of AMF can have good symbiosis with plants found, among others, *Centrosema pubescens*, *Fimbristylis littoralis*, *Vigna luteola*, *Alysicarpus vaginalis*, and *Mimosa* sp. The percentage of root colonization was negatively correlated with P levels and positively correlated with Ca levels in the soil. The highest percentage of AMF spore colonization was found on flat slopes with *Centrosema pubescens*.

Keywords: arbuscular; coal; mold; mining; mycorrhiza

Abstrak. Kegiatan pertambangan khususnya batu bara berpotensi memberikan dampak negatif bagi lingkungan karena menyebabkan kerusakan lahan. Adapun guna merehabilitasi lahan tersebut diperlukan suatu tindakan revegetasi, antara lain menggunakan bantuan Fungi Mikoriza Arbuskular (FMA). Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui persentase kolonisasi spora FMA yang mengindikasikan tingkat kecocokan antara FMA dengan vegetasi eksisting di lahan pasca tambang batu bara pada beberapa kelerengan yang berbeda, sehingga diharapkan dapat diperoleh suatu informasi awal dalam menentukan jenis tanaman yang cocok untuk dikombinasikan dengan spora FMA yang mendukung langkah revegetasi tersebut. Tahapan kajian yang dilakukan adalah mengambil sampel tanah lahan bekas tambang batu bara, identifikasi vegetasi, ekstraksi spora, dan identifikasi spora FMA yang ditemukan. Pengambilan sampel tanah untuk analisis sifat kimia tanah serta pengamatan spora mikoriza pada lahan bekas tambang batu bara dilakukan berdasarkan *random sampling* pada kedalaman 0-20 cm dengan 5 tipe kelerengan, yaitu datar, landai, agak curam, curam, dan sangat curam. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kolonisasi mikoriza di dalam tanah lahan pasca tambang batu bara memiliki nilai persentase yang berbeda pada masing-masing tipe kelerengan, yaitu mencapai 30% (datar), 21,58% (landai), 13,16% (agak curam), 23,34% (curam), dan 6,19% (sangat curam). Semakin curam lereng, kolonisasi akan semakin menurun. Berdasarkan frekuensinya, *Glomus* sp. dapat ditemukan pada setiap tipe kelerengan, sehingga mengindikasikan bahwa jenis FMA tersebut mampu bersimbiosis dengan baik dengan tumbuhan yang ditemukan antara lain seperti *Centrosema pubescens*, *Fimbristylis littoralis*, *Vigna luteola*, *Alysicarpus vaginalis*, dan *Mimosa* sp. Persentase kolonisasi akar berkorelasi negatif dengan kadar P dan berkorelasi positif dengan kadar Ca dalam tanah. Persentase kolonisasi spora FMA tertinggi terjadi pada lereng datar dengan vegetasi *Centrosema pubescens*.

Kata kunci: arbuskular; batu bara; jamur; mikoriza; penambangan

PENDAHULUAN

Penambangan batu bara telah menjadi industri yang penting dan berpengaruh di Indonesia selama bertahun-tahun. Indonesia

telah menjadi salah satu produsen dan eksportir batu bara terbesar di dunia. Lahan penambangan batu bara juga relatif luas di Indonesia. Setidaknya, ada 3 (tiga) pulau

penghasil batu bara terbesar di Indonesia, yakni Kalimantan (menyimpan cadangan sebesar 25,84 miliar ton), Sumatera (55,8 miliar ton cadangan sumber daya batu bara) dan Jawa (cadangan sumber daya sebesar 58,5 juta ton) (Fajri, 2022).

Penambangan batu bara di Indonesia umumnya dilakukan dengan sistem tambang terbuka (*open pit mining*) (Oktorina, 2017). Di balik manfaat ekonomi yang diberikan, penambangan batu bara juga memiliki dampak negatif terhadap lingkungan dan masyarakat sekitar. Aktivitas penambangan mampu mengubah lanskap alam dan mengeluarkan limbah dalam jumlah yang cukup besar. Bahaya yang ditimbulkan pun cukup serius, terutama pencemaran lingkungan yang mengganggu kesehatan manusia dan agri budaya (Aipassa et al., 2020). Pengetahuan mengenai berbagai dampak buruk dari penambangan ini mengharuskan setiap perusahaan yang beroperasi di bidang batu bara untuk melakukan kegiatan restorasi dan revegetasi lahan bekas pertambangannya (Oktorina, 2017), agar tatanan ekosistem dapat berjalan normal.

Revegetasi lingkungan bertujuan untuk mengembalikan kondisi lahan bekas tambang batu bara menjadi lebih baik secara ekologis. Agar lahan bekas tambang bisa segera dilakukan penanaman komoditi pertanian adalah dengan memanfaatkan fungi mikoriza arbuskular (FMA) yang keberadaannya mampu bersimbiosis dengan tanaman inang toleran terhadap lahan-lahan terdegradasi akibat penambangan (Prasetyo et al., 2019).

Jenis mikoriza yang paling banyak dikenal adalah endomikoriza dan ektomikoriza. Sementara untuk ektomikoriza yang paling banyak ditemukan dan memiliki peran besar dalam bidang pertanian adalah arbuskular mikoriza (AM) (Basri, 2018). Ciri khas jamur mikoriza arbuskular adalah struktur yang disebut "arbuskul" yang terdapat pada bagian sel korteks perakaran tanaman (Piliarová et al., 2019). Ini adalah berbagai cabang halus yang menembus sel-

sel akar tanaman. Arbuskul memperluas area permukaan kontak antara jamur dan tanaman, memungkinkan pertukaran nutrisi yang lebih efisien.

Mikoriza tergolong jenis organisme yang bersifat fakultatif obligat. Oleh sebab itu, dalam hidupnya membutuhkan inang, berupa tumbuh-tumbuhan yang mampu berasosiasi dengan spora mikoriza. Tanaman inang memberikan karbohidrat hasil fotosintesis kepada fungi dalam pertukaran nutrisi yang berlangsung melalui mikoriza. Sebagai imbalannya, fungi membantu menyerap nutrisi seperti fosfor dan nitrogen dari tanah, meningkatkan daya serap tanaman (Tarigan et al., 2022). Tanaman yang bersimbiosis dengan mikoriza biasanya juga dapat bertahan hidup pada kondisi tercekam kekeringan, tanah salin, tanah asam, maupun pada tanah-tanah dengan kadar fosfor rendah (Hasibuan et al., 2014). Pada lahan-lahan pasca tambang, seperti tambang batu bara umumnya hanya dijumpai vegetasi beberapa jenis gulma, mengingat gulma tergolong tumbuhan yang memiliki tingkat adaptasi tinggi terhadap cekaman hara. Jenis gulma tertentu mampu bersimbiosis dengan mikoriza arbuskular, sehingga keberadaannya sangat dibutuhkan sebagai tanaman inang mikoriza. Penelitian menyebutkan pada sistem perakaran *Stenochlaena palustris* terjadi infeksi oleh FMA yaitu dengan ditemukannya struktur vesikula, arbuskula, dan hifa eksternal (Prasetyo et al., 2019).

Asosiasi antara FMA dengan tanaman inang membentuk suatu kolonisasi yang mana semakin tinggi persentase kolonisasi, maka tingkat kecocokan antara eksudat perakaran tanaman inang dengan spora mikoriza relatif tinggi. Kolonisasi akar merupakan suatu bentuk proses simbiosis antara akar tanaman inang dan FMA. Adapun proses kolonisasi akar dibedakan menjadi 4 tahapan yaitu sebelum infeksi, penetrasi hifa pada akar tanaman inang, kemudian hifa tumbuh dan berkembang pada sel akar dan tahapan terakhir FMA akan menjalankan fungsinya membantu

penyerapan hara dan air untuk tanaman inang (Muryati et al., 2016). Kolonisasi mikoriza pada akar tanaman juga dipengaruhi oleh kondisi kimia tanah, salah satunya keberadaan unsur P (fosfor). Penelitian menyebutkan kadar P berkorelasi negatif dengan kepadatan spora dan kolonisasi akar. Menurunnya kadar P pada tanah berdampak pada kenaikan kepadatan spora FMA dan peningkatan persentase kolonisasi akar (Alayya & Prasetya, 2022).

Adapun informasi dan penjelasan mengenai keeratan hubungan antara mikoriza dan tanaman inang pada lahan bekas tambang batu bara selama ini masih jarang ditemukan. Oleh karena itu, dilakukan penelitian ini yang bertujuan untuk mengetahui persentase kolonisasi spora FMA yang mengindikasikan tingkat kecocokan antara FMA dengan vegetasi eksisting di lahan pasca tambang batu bara pada beberapa kelerengan yang berbeda. Melalui kajian ini diharapkan dapat diperoleh suatu informasi awal dalam menentukan jenis tanaman yang cocok untuk dikombinasikan dengan spora FMA yang mendukung langkah revegetasi lahan pasca tambang batu bara.

METODE

Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian ini telah dilaksanakan pada bulan Februari hingga November 2023. Lokasi pengambilan sampel tanah pada lahan pasca tambang batu bara dilaksanakan di Kecamatan Talawi, Kota Sawahlunto, Provinsi Sumatera Barat.

Jumlah sampel tanah yang diambil sebanyak 10 titik sampel dengan 5 tipe kelerengan, yaitu datar, landai, agak curam, curam, dan sangat curam. Masing-masing tipe kelerengan diambil 2 titik pada kedalaman 0-20 cm dari atas permukaan tanah (Gambar 1). Adapun isolasi dan perhitungan persentase kolonisasi fungi mikoriza arbuskula (FMA) *indigenus* dilakukan di Laboratorium Fisiologi Tumbuhan, Fakultas Pertanian, Universitas

Andalas, Padang. Untuk analisis kimia tanah dilakukan di Laboratorium Pengujian Balai Pengujian Standar Instrumen Tanaman Buah Tropika, Solok.

Pengamatan Sifat Kimia Tanah

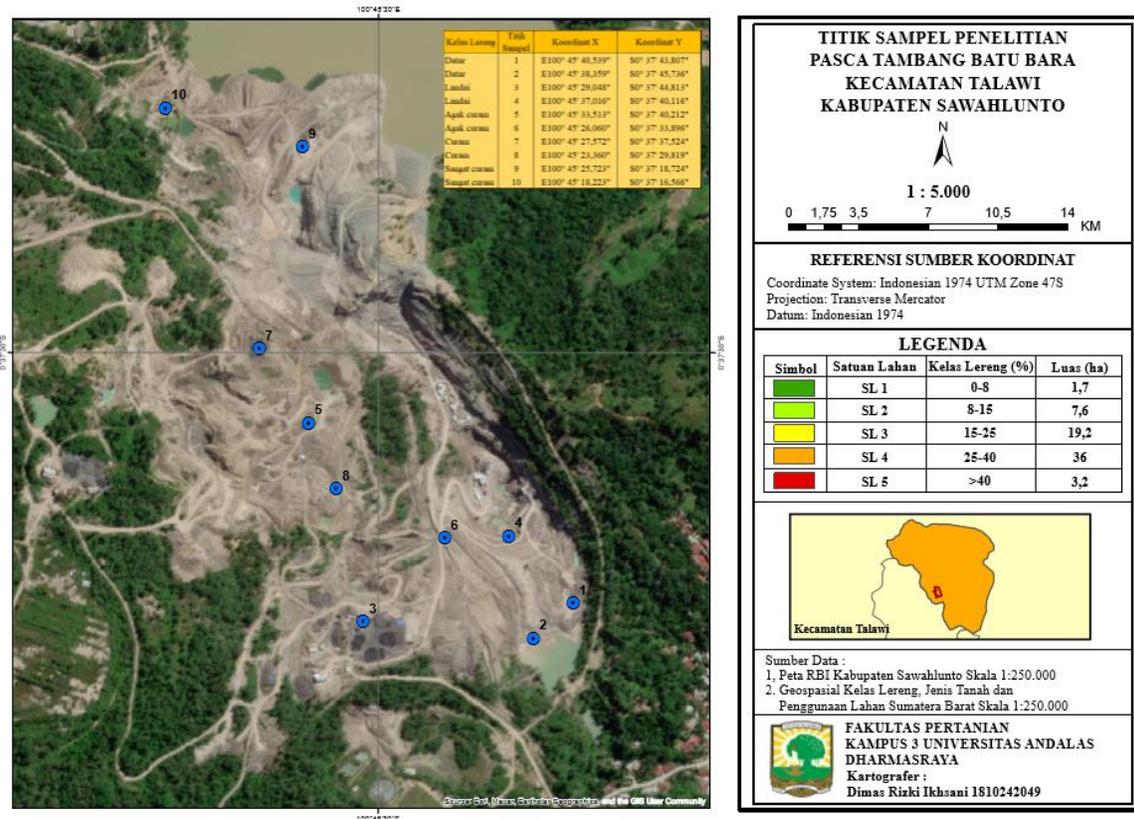
Sifat kimia tanah yang diamati adalah P-tersedia (metode Olsen), unsur hara kalium (K), kalsium (Ca) dan magnesium (Mg). Di samping itu, juga diamati sifat fisika tanah berupa tekstur tanah guna mendukung hasil kajian ini.

Ekstraksi Spora Fungi Mikoriza Arbuskular (FMA)

Sebanyak 50 g sampel tanah yang homogen dan kering diekstraksi dengan menggunakan pengayakan basah (Brundrett et al., 1994). Selanjutnya, dicampur dengan 200ml air dan kemudian disaring menggunakan multi-filter bertingkat dari ukuran 500 μ m, 300 μ m, 106 μ m, dan 45 μ m. Sampel distilat 45 μ m ditempatkan ke dalam tabung sentrifus dan ditambahkan dengan 60% glukosa, lalu disentrifugasi dengan kecepatan 2.500 rpm selama 3 menit. Hasil larutan yang disentrifugasi dituangkan ke dalam filter 45 μ m dan kemudian dibilas dengan air. Larutan supernatan yang tersisa dalam filter ini kemudian dimasukkan ke dalam gelas piala 150 ml.

Frekuensi Keberadaan Spora

Frekuensi keberadaan spora dilakukan dengan cara mengamati keberadaan spora di vegetasi yang terdapat pada lahan bekas tambang batu bara dan rizosfer aren. Apabila spora FMA *indigenus* terdapat di seluruh areal pertanaman, maka frekuensi keberadaan spora adalah 100%.



Gambar 1. Peta titik pengambilan sampel vegetasi dan tanah pasca tambang batu bara di Kecamatan Talawi, Kota Sawahlunto, Provinsi Sumatera Barat

Identifikasi Persentase Kolonisasi Akar

Untuk mengidentifikasi kolonisasi akar, penelitian ini menggunakan teknik pewarnaan akar menggunakan teknik pewarnaan *root staining*. Sampel akar segar berukuran 0,5 - 2,0 mm diambil secara acak. Sampel akar tersebut dicuci dan dibersihkan, kemudian direndam dalam KOH 10% selama 24 jam, kemudian dilanjutkan direndam dengan HCl 1% selama 10 menit. Setelah itu, akar sampel disaring dengan lacto gliserol trypan blue selama 1 jam. Sampel akar yang telah diwarnai kemudian dipilih secara acak dan dipotong dengan panjang sekitar 1 cm sebanyak 10 buah. Semua potongan akar tersebut disusun di atas kaca objek dan kemudian ditutup dengan kaca penutup. Sampel-sampel akar yang telah diwarnai tersebut kemudian diamati dengan

menggunakan mikroskop binokuler dengan perbesaran perbesaran 100x.

Analisis dan Penyajian Data

Data dianalisis menggunakan analisis sidik ragam (ANOVA) dan diuji lanjut menggunakan uji DMRT alpha 5%. Interaksi antara karakter kimia tanah dengan persentase kolonisasi akar spora FMA dianalisis korelasi dan ditampilkan dalam bentuk korelogram. Data hasil disajikan dalam bentuk tabel dan diagram batang.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Karakteristik Tanah dan Vegetasi Lahan Bekas Tambang Batu bara

Lahan pasca tambang batu bara umumnya merupakan jenis tanah yang tidak subur. Hal

ini karena sebagian besar lahan memiliki tekstur pasir dengan kemampuan menyerap hara esensial yang rendah. Di samping itu, kandungan logam berat seperti aluminium (Al), timbal (Pb) tembaga (Cu) tinggi dengan nilai pH yang asam, sehingga menyebabkan tanah bersifat toksik bagi tanaman. Kondisi ini berdampak pada lahan pasca tambang batu bara yang sulit untuk ditumbuhi vegetasi baru, karena daya dukung lahan yang minimal. Kegiatan penambahan batu bara secara terbuka (*open mining*) berdampak pada degradasi lahan dan menurunkan aktivitas mikroba tanah. Hilangnya lapisan *top soil*, kekeringan, pemadatan tanah, menurunnya kemampuan menahan air, dan akumulasi unsur hara mikro yang toksik adalah beberapa dampak yang timbul dari aktivitas pertambangan (Margarettha, 2011).

Hasil analisis tanah pada masing-masing tipe kelerengan lahan pasca tambang batu bara Kecamatan Talawi, Kota Sawahlunto

diperoleh nilai fosfor (P-tersedia) yang relatif rendah. Namun, dari masing-masing tipe kelerengan tidak menunjukkan perbedaan yang signifikan (Tabel 1). Penelitian yang sama menunjukkan bahwa pada lahan pasca tambang batu bara memiliki kadar P-tersedia yang rendah yakni hanya mencapai 3,30 ppm (Prayoga & Prasetya, 2021). Kandungan P-tersedia di angka kisaran 8,15 ppm masih tergolong sangat rendah (Puja & Atmaja, 2018). Rendahnya nilai P-tersedia ini terjadi karena kemungkinan nilai pH tanah yang bersifat asam pada lahan pasca tambang batu bara, sehingga unsur P terikat oleh ion-ion logam seperti Al^{3+} dan Fe^{3+} , sehingga bentuknya tidak tersedia bagi tanaman (Prayoga & Prasetya, 2021). Keberadaan P ini akan berpengaruh secara signifikan terhadap pertumbuhan vegetasi di atas permukaan tanah juga pertumbuhan dan perkembangan spora fungi mikoriza arbuskular (FMA).

Tabel 1. Analisis sifat kimia tanah lahan pasca tambang batu bara

Sifat Kimia Tanah	Kelas Lereng				
	Datar	Landai	Agak Curam	Curam	Sangat Curam
P ₂ O ₅ (ppm) (Olsen)	2,93	3,32	4,00	4,32	2,92
Kadar K (ppm)	84,64	85,26	62,56	29,89	56,75
Kadar Ca (ppm)	1.039,01	985,65	1.027,01	724,66	1.444,96
Kadar Mg (ppm)	296,48	318,33	236,02	209,32	304,48

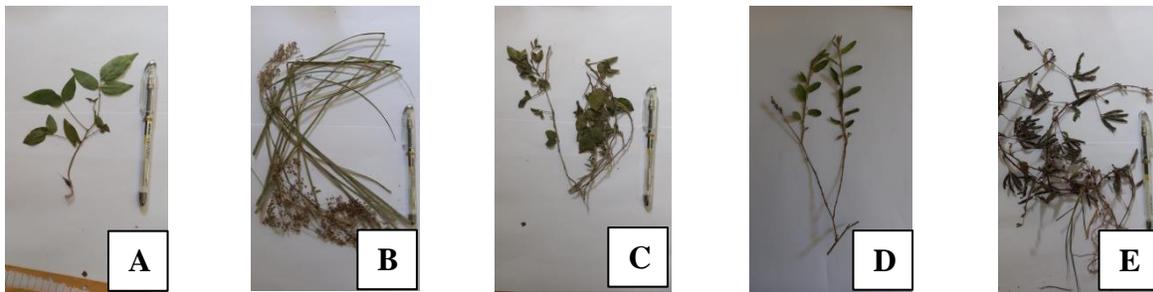
Kadar kalium (K) pada lahan pasca tambang batu bara Kecamatan Talawi, Sawahlunto tidak menunjukkan beda nyata di setiap tipe kelerengan (Tabel 1). Nilainya antara 55 – 85 ppm, yang mana kadar tersebut masih dinilai cukup untuk pertumbuhan vegetasi yang memang memiliki sifat toleransi tinggi pada tanah miskin hara. Kadar kalsium (Ca) dan magnesium (Mg) juga menunjukkan tidak adanya perbedaan yang signifikan pada masing-masing kelerengan. Nilai tersebut juga masih tergolong cukup untuk pertumbuhan vegetasi di atas permukaan tanah. Kadar Ca

dan Mg dikatakan rendah bila nilainya < 300 ppm untuk Ca dan < 35 ppm untuk Mg (Isleib, 2016). Kondisi demikian menggambarkan masih adanya vegetasi yang mampu tumbuh dengan baik pada lahan pasca tambang batu bara, sehingga simbiosis antara akar vegetasi dengan FMA sangat mungkin terjadi. Ca dalam tanah berperan dalam penyusunan dinding sel, menjaga integritas sel, dan permeabilitas membran, aktivasi enzim, serta menetralkan unsur logam berat pada tumbuhan (Wisnubroto et al., 2021). Sementara Mg dalam tanah berperan sebagai

salah satu komponen penyusun klorofil yang penting untuk mengaktifkan enzim dalam proses fosforilasi dan membantu mendistribusi fosfor ke seluruh tubuh tanaman (Wisnubroto et al., 2020). Bila kadar Mg tercukupi dalam tanah, maka dapat membantu dalam meningkatkan aktivitas pertumbuhan dan perkembangan tanaman.

Beberapa vegetasi yang ditemukan pada daerah ini merupakan jenis vegetasi yang memiliki kemampuan beradaptasi dengan baik pada lahan-lahan marginal. Vegetasi yang ditemukan berupa *Centrosema pubescens*, *Fimbristylis littoralis*, *Vigna luteola*, *Alysicarpus vaginalis*, dan *Mimosa* sp. (Gambar 2.A.) tergolong gulma yang berbunga dari suku polong-polongan. Batang sedikit berbulu, panjang batang berkisar 1 – 4

m. Daun majemuk berbentuk bundar telur. Menjadi tanaman untuk reklamasi lahan kritis bekas letusan gunung berapi. Menurut informasi dari (BPTU HPT Padang Mengatas, 2022) gulma ini tergolong cukup tahan tumbuh di tanah masam. *Fimbristylis littoralis* (Gambar 2.B) merupakan gulma jenis teki yang hidup di ekosistem padi sawah dan merupakan tumbuhan yang tahan terhadap genangan air. Batang biasanya tidak berongga dan berbentuk segitiga atau bulat. Daun tidak memiliki lidah-lidah daun (ligula) dan tersusun dalam tiga deretan. Ibu karangan bunga tidak memiliki buku. Bunga sering berada dalam bulir (spica) atau anak bulir, dan biasanya ada daun yang melindunginya, sehingga buahnya tidak membuka.



Gambar 2. (A) Lereng datar: *Centrosema pubescens*; (B) Lereng landai: *Fimbristylis littoralis*; (C) Lereng agak curam: *Vigna luteola*; (D) Lereng curam: *Alysicarpus vaginalis*; dan (E) Lereng sangat curam: *Mimosa* sp.

Vigna luteola (Gambar 2.C) adalah tumbuh yang tumbuh baik di daerah tropis di berbagai benua. Memiliki daun trifoliolate (daun majemuk dari 3 helai daun). Bunga berwarna kuning dan berpolong yang mengandung banyak biji. Jenis tumbuhan dari genus ini sebagian besar cukup toleran pada lingkungan tumbuh ber-pH di bawah 5. *Alysicarpus vaginalis* (Gambar 2.D) tergolong tumbuhan tahunan, batangnya merayap di atas tanah, dan ujung batang berdiri tegak setinggi 6 cm. Melakukan penyerbukan sendiri dan berkembang biak dengan biji. Tumbuh dan beradaptasi dengan baik pada berbagai jenis

tanah. Tumbuhan ini dapat beradaptasi dengan baik pada tanah-tanah berpasir, berkerikil hingga tanah liat (Suarna et al., 2018). *Mimosa* sp. (Gambar 2.E) umumnya tumbuh di daerah yang beriklim tropis. Memiliki duri pada batangnya. Daun kebanyakan bipinnatus. Akar dari beberapa spesies ini beracun dan lainnya mengandung zat yang dapat mengiritasi kulit. Beberapa jenis vegetasi yang mampu tumbuh baik pada lahan bekas tambang batu bara Talawi, Sawahlunto, menandakan bahwa masih ada aktivitas mikroba tanah dan ada harapan untuk difungsikan kembali guna reklamasi lahan.

Kondisi ini akan semakin membaik ketika dikombinasikan dengan aplikasi mikoriza di dalam tanah.

Identifikasi Spora Fungi Mikoriza Arbuskular (FMA)

Berdasarkan hasil identifikasi spora mikoriza di rizosfer vegetasi lahan pasca tambang batu bara diperoleh 4 jenis spora yaitu *Glomus* sp., *Acaulospora* sp., *Gigaspora* sp. dan *Sclerocystis* sp. (Tabel 2), Masing-masing jenis spora memiliki karakteristik yang berbeda. Spora *Glomus* sp. memberikan nilai frekuensi ditemukannya spora FMA pada 5 tipe lereng lahan pasca tambang batu bara yang tertinggi dibandingkan jenis spora lainnya, yakni mencapai 100% (Tabel 2). Hal ini dapat mengindikasikan bahwa spora *Glomus* sp. dapat ditemukan di setiap tipe

kelerengan dan mampu bersimbiosis dengan baik dengan setiap vegetasi yang tumbuh pada lahan tersebut. Ciri khusus spora *Glomus* sp. berbentuk agak lonjong, warnanya kuning gelap, terdapat 2 lapisan dinding spora, permukaannya bersifat halus, serta tidak bereaksi dengan larutan meltzer. Dari penemuan ini juga dapat diketahui bahwa *Glomus* sp. lebih mampu berkembang dan memperbanyak diri dengan baik pada tiap tipe kelerengan lahan pasca tambang batu bara yang mana lahan tersebut dikategorikan sebagai lahan marginal. Sesuai dengan penelitian-penelitian yang dilakukan sebelumnya bahwa *Glomus* sp. mampu berkembang dan beradaptasi dengan baik pada rizosfer gulma-gulma yang tumbuh pada jenis tanah asam (Prayoga & Prasetya, 2021).

Tabel 2. Frekuensi spora FMA pada 5 tipe kelerengan lahan pasca tambang batu bara

Frekuensi Spora	Kemunculan	Frekuensi (%)
<i>Glomus</i> sp.	10 kali	100
<i>Acaulopora</i> sp.	8 kali	80
<i>Gigaspora</i> sp.	8 kali	80
<i>Sclerocystis</i> sp.	8 kali	80

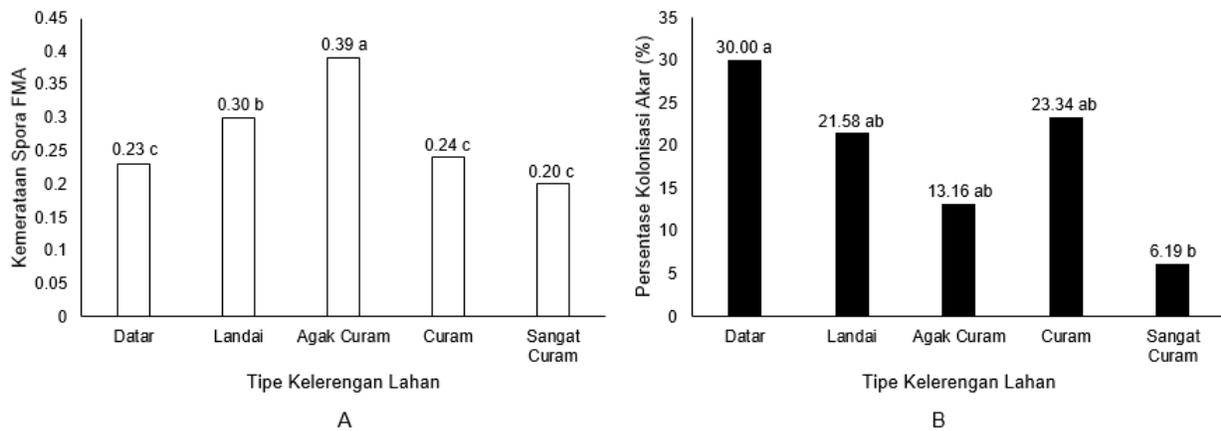
Ditinjau dari pemerataan jenisnya, diperoleh nilai yang relatif berbeda nyata pada masing-masing tipe kelerengan. Pemerataan jenis spora justru lebih merata pada lereng yang agak curam dibandingkan dengan lereng lainnya dengan nilai 0,39. Sementara untuk lereng sangat curam memberikan nilai pemerataan yang nyata paling rendah yaitu sebesar 0,20. Pada lereng datar pemerataan jenis spora FMA bernilai tidak berbeda signifikan dengan tipe lereng sangat curam (Gambar 3.A). Hal ini karena ada kemungkinan pada lereng datar beberapa jenis vegetasi yang tumbuh di atasnya tidak mendukung pertumbuhan beberapa spora FMA lainnya, sehingga beberapa titik lahan pasca tambang batu bara pada lereng datar memiliki pemerataan sebaran spora yang

rendah. Namun demikian, secara keseluruhan dapat diketahui bila tingkat kelerengan yang semakin curam berdampak pada rendahnya nilai pemerataan jenis spora FMA. Pemerataan jenis ini dipengaruhi oleh berbagai faktor, terutama tingkat kesuburan tanah maupun faktor lingkungan lainnya, serta eksudat akar tanaman yang dihasilkan oleh tanaman inang yang mana memiliki peran besar terhadap perkecambahan spora FMA. Spora FMA membengkak sebelum berkecambah dan kemudian membentuk hifa. Setelah berkecambah, spora FMA dapat masuk ke sel akar tanaman inang melalui eksudat akar yang mengandung flavonoid (Armansyah et al., 2019).

Persentase Kolonisasi Akar oleh FMA

Persentase FMA yang mengkolonisasi akar menunjukkan kapasitas sistem perakaran tanaman untuk berinteraksi dengan spora. Secara umum, kolonisasi dibentuk oleh spora yang kompatibel dengan proses fisiologi di akar. Adapun jenis kolonisasi ini umumnya bersifat simbiosis mutualisme, yang berarti bahwa tanaman dan fungi saling menguntungkan satu sama lain. Dapat dikatakan nilai persentase kolonisasi yang terbentuk menandakan tingkat kemampuan terjadinya simbiosis mutualisme antara FMA dengan tumbuhan inang. Kemampuan fungi untuk berkembang biak di rizosfer terkait dengan persentase kolonisasi.

Dalam kajian ini diperoleh nilai persentase kolonisasi akar tertinggi terdapat pada lereng datar mencapai 30%. Untuk lereng landai, agak curam, dan curam memberikan nilai persentase kolonisasi akar yang tidak berbeda secara signifikan. Sedangkan untuk lereng sangat curam nilai persentasenya nyata paling rendah dari semua tipe kelerengan dengan nilai hanya 6,19%. Rendahnya nilai persentase kolonisasi akar pada lereng yang sangat curam disebabkan karena rendahnya faktor kesuburan tanah. Akibatnya, vegetasi tidak mampu tumbuh dengan optimal dan berdampak pada rendahnya eksudat akar berupa karbohidrat yang sangat diperlukan oleh spora FMA untuk tumbuh dan berkembang



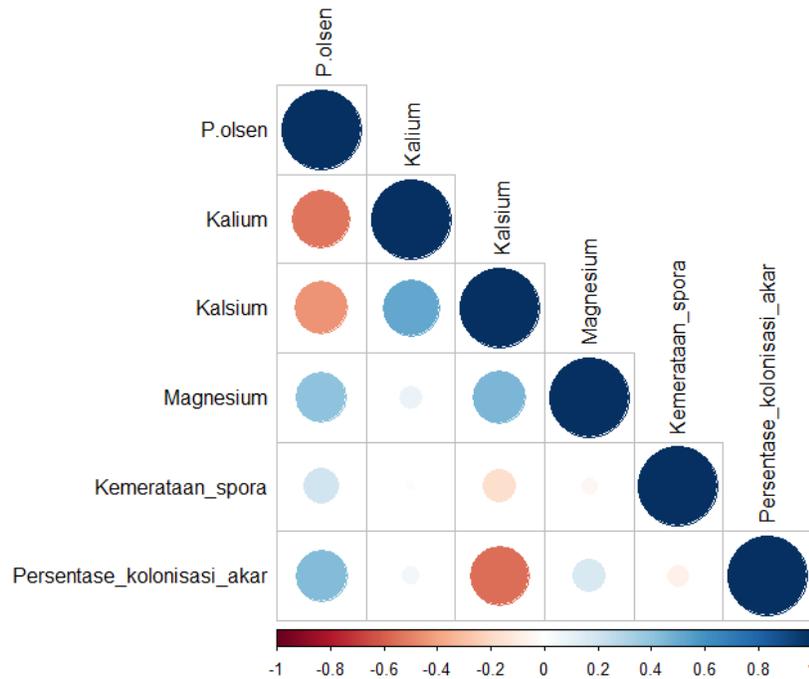
Gambar 3. (A) Kemerataan dan (B) persentase kolonisasi akar spora FMA pada rizosfer lahan pasca tambang batu bara. angka yang diikuti huruf yang sama menunjukkan tidak berbeda nyata pada uji DMRT (taraf kepercayaan 95%), angka yang diikuti huruf berbeda menunjukkan perbedaan yang nyata pada uji DMRT (taraf kepercayaan 95%).

Tingginya persentase kolonisasi akar pada lereng datar (Gambar 3.B) menandakan spora FMA mampu berkembang dan bersimbiosis dengan baik pada tingkat kesuburan tanah di lokasi lahan pasca tambang batu bara yang di atas permukaan tanahnya ditumbuhi gulma *Centrosema pubescens* (Gambar 2.A). *Centrosema pubescens* tergolong jenis gulma

yang memang bersifat tahan terhadap keasaman tinggi. *Centrosema pubescens* mampu mengeluarkan berbagai senyawa fitokimia yang memberikan banyak manfaat bagi perkembangan mikoriza. (Murugan et al., 2020) menyebutkan kadar karbohidrat hasil ekstraksi *Centrosema pubescens* mencapai >35 mg GE/g, protein >2 mg BSA/g dan asam

amino mencapai >29 mg LE/g. Begitu pula dengan senyawa fenol, dan flavonoid yang dihasilkan relatif banyak. Adanya senyawa-

senyawa fitokimia ini mampu menunjang perkembangan FMA sebagai stimulan dalam perkecambahan spora FMA



Gambar 4. Korelogram karakteristik tanah dengan spora FMA di lahan pasca tambang batu bara

Kolonisasi mikoriza juga dipengaruhi oleh bentuk perakaran suatu jenis vegetasi. Tanaman dengan sistem perakaran yang luas dan dalam memiliki peluang yang tinggi untuk terbentuknya koloni dengan mikoriza (Prayoga & Prasetya, 2021). Sebagai contoh rumput banteng yang memiliki bentuk perakaran serabut dengan banyak terbentuknya akar halus.

Keberadaan akar halus ini dapat meningkatkan efektivitas mikoriza terhadap inang yang berpengaruh terhadap respon simbiotik mikoriza dalam mengkolonisasi secara maksimal. Di samping itu, koloni mikoriza dipengaruhi juga oleh sifat kimia tanah. Beberapa ahli berpendapat bahwa asosiasi mikoriza pada perakaran tumbuhan dipengaruhi oleh kondisi pH, ketersediaan unsur P, serta kelembaban tanah. pH tanah

yang rendah pada lahan bekas tambang batu bara mampu menyebabkan penurunan kadar P tersedia dalam tanah. Apabila kadar P dalam tanah cukup tinggi, hal tersebut justru berpotensi menurunkan kolonisasi mikoriza pada perakaran tanaman (Prayoga & Prasetya, 2021).

Hubungan antara kadar P dalam tanah dan kolonisasi mikoriza dapat digambarkan dalam hubungan korelasi negatif (Gambar 4). Dari korelogram tersebut diketahui terdapat bulatan berwarna biru besar pada variabel persentase kolonisasi akar dan P-tersedia (P.olsen). Artinya semakin berwarna biru bulatan tersebut, nilai korelasinya semakin negatif.

Maksud dari korelasi negatif ini adalah, semakin tinggi kadar P dalam tanah, persentase kolonisasi akar justru akan semakin menurun, karena zat karbohidrat justru lebih banyak ditranslokasikan ke tajuk maupun ke ujung meristematik lainnya, sehingga eksudat akar untuk perkembangan mikoriza menurun (Prayoga & Prasetya, 2021)

Adapun hubungan antara persentase kolonisasi akar dengan kadar kalsium (Ca) dalam tanah berupa korelasi positif (Gambar 4), yang mana semakin tinggi kadar Ca tingkat kolonisasi akar semakin tinggi. Adanya ion Ca^{2+} dalam tanah bisa membantu meningkatkan nilai pH tanah, sehingga tingkat keasaman akan semakin berkurang (Novitasari et al., 2019). Semakin tinggi nilai pH, kadar P dalam tanah akan menurun, sehingga aktivitas eksudasi akar dapat berlangsung optimal. Dampaknya pertumbuhan dan perkembangan spora FMA akan lebih optimal, sehingga meningkatkan nilai kolonisasi akar.

Proses kolonisasi mikoriza pada perakaran tanaman dimulai dengan infeksi hifa, yang kemudian membentuk vesikula dan arbuskula di dalam jaringan akar. Vesikula merupakan struktur dengan bentuk lonjong atau membulat dengan fungsi sebagai tempat penyimpanan makanan yang terbentuk diantara sel akar atau berkembang sebagai klamidospora (organ reproduksi). Arbuskular adalah struktur hifa yang bercabang dan berbentuk seperti pohon dengan fungsi sebagai tempat pertukaran nutrisi antara mikoriza dengan tanaman inang (Pulungan, 2013). Hifa eksternal berfungsi sebagai akumulator unsur P yang tersedia dalam tanah. P diserap dan diakumulasi pada hifa eksternal kemudian diubah menjadi senyawa polifosfat menggunakan enzim fosfatase, selanjutnya akan dipecah menjadi fosfat anorganik yang dilepaskan dalam jaringan tanaman melalui arbuskula (Nurhayati, 2019).

Dengan demikian, diketahui bahwa terdapat banyak faktor yang memengaruhi kolonisasi FMA dengan sistem perakaran

tanaman, termasuk kestabilan ekologi tanah, jenis FMA, eksudat yang diekskresikan oleh perakaran tanaman, dan kesesuaian FMA dengan akar tanaman. Kolonisasi akar oleh FMA juga ditentukan oleh tingkat efektivitas dan kesesuaian FMA dengan tanaman inang. Adapun tingkat kesesuaian yang lebih tinggi menunjukkan simbiosis yang terjalin lebih kuat antara FMA dan tanaman inang. Persentase kolonisasi yang berbeda disebabkan oleh rendahnya tingkat kecocokan antara perakaran tanaman dengan masing-masing spora mikoriza.

SIMPULAN

Kolonisasi mikoriza di dalam tanah lahan pasca tambang batu bara memiliki nilai persentase yang berbeda pada masing-masing tipe kelerengan, yaitu mencapai 30% (datar), 21,58% (landai), 13,16% (agak curam), 23,34% (curam), dan 6,19% (sangat curam). Semakin curam lereng, kolonisasi akan semakin menurun. Berdasarkan frekuensinya, *Glomus* sp. dapat ditemukan pada tiap tipe kelerengan, sehingga mengindikasikan bahwa mikoriza tersebut mampu bersimbiosis dengan baik dengan gulma *Centrosema pubescens*, *Fimbristylis littoralis*, *Vigna luteola*, *Alysicarpus vaginalis*, dan *Mimosa* sp. Persentase kolonisasi akar berkorelasi negatif dengan kadar P dan berkorelasi positif dengan kadar Ca dalam tanah. Semakin tinggi kadar P, tingkat kolonisasi spora FMA semakin rendah, sedangkan semakin tinggi Ca dalam tanah, persentase kolonisasi akan semakin meningkat. Persentase kolonisasi spora FMA tertinggi terjadi pada lereng datar dengan vegetasi *Centrosema pubescens*.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terimakasih disampaikan kepada Lembaga Penelitian dan Pengabdian kepada Masyarakat Universitas Andalas yang telah menyediakan pendanaan untuk penelitian ini dengan hibah nomor: T/24/UN16.19/PT.01.03/IS-RDP/2023

DAFTAR PUSTAKA

- Aipassa, M. I., Zainuddin, Z., & Hasan, H. (2020). Tingkat keberhasilan reklamasi lahan bekas tambang batu bara pada PT Bukit Baiduri Energi Kabupaten Kutai Kartanegara Kota Samarinda Kalimantan Timur. *Dinamika Lingkungan Indonesia*, 7(2), 102. <https://doi.org/10.31258/dli.7.2.p.102-110>
- Alayya, N. P., & Prasetya, B. (2022). Kepadatan spora dan persen koloni mikoriza vesikula arbuskula (MVA) pada beberapa tanaman pangan di lahan pertanian Kecamatan Jabung Malang. *Jurnal Tanah dan Sumberdaya Lahan*, 9(2), 267–276. <https://doi.org/10.21776/ub.jtsl.2022.009.2.7>
- Armansyah, A., Herawati N., & Kristina N. (2019). Keanekaragaman fungi mikoriza arbuskula (FMA) di rizosfer tanaman bengkuang (*Pachyrizhus erosus* (L) Mrb). *Jagur Jurnal Agroteknologi*, 3(1), 8–14. <https://doi.org/10.25077/jagur.3.1.8-14.2019>
- Basri, A. H. H. (2018). Kajian peranan mikoriza dalam bidang pertanian. BPTU HPT Padang Mengatas. (2022). *Centrosema pubescens*. <https://bptupdgmengatas.ditjenpkh.pertanian.go.id/informasipublik/view/281/8bptupatas@pertanian.go.id>
- Brundrett, M., Melville, L., & Peterson, L. (1994). Practical Methods in Mycorrhiza Research: Based on a Workshop Organized in Conjunction with the Ninth North American Conference on Mycorrhizae, University of Guelph, Guelph, Ontario, Canada. *Mycologue Publications*.
- Fajri, D. L. (2022). Daftar Daerah Penghasil Batu bara di Indonesia - Nasional Katadata.co.id. *Katadata.co.id*. <https://katadata.co.id/safrezi/berita/61fc66ac67956/daftar-daerah-penghasil-batu-bara-di-indonesia>
- Hasibuan, D. S., Sabrina, T., & Lubis, A. (2014). Potensi berbagai tanaman sebagai inang inokulum mikoriza arbuskular dan efeknya terhadap pertumbuhan tanaman jagung dan kedelai di tanah ultisol. *Jurnal Online Agroteknologi*, 2(2), 905–914.
- Isleib, J. (2016). Soil calcium-to-magnesium ratios should not concern most farmers. *Michigan State University Extension*.
- Margarettha. (2011). Eksplorasi dan identifikasi mikoriza indigen asal tanah bekas tambang batu bara. *Jurnal Ilmu-Ilmu Hayati*, 10(5), 641–647.
- Murugan, M., Rajendran, K., Velmurugan, T., Muthu, S., Gundappa, M., & Thangavel, S. (2020). Antagonistic and antioxidant potencies of *Centrosema pubescens* benth extracts against nosocomial infection pathogens. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 29. <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2020.101776>
- Muryati, S., Mansur, I., Sri, D., & Budi, W. (2016). Keanekaragaman fungi mikoriza arbuskula (FMA) pada rhizosfer *Desmodium* spp. asal PT. Cibaliung Sumberdaya, Banten. *Jurnal Silvikultur Tropika*, 7(3), 188–197.
- Novitasari, A., Suntari, R., & Cahyono, P. (2019). Effect of dosage of various calcium fertilizers on initial growth of pineapple plant at PT. Great Giant Pineapple Lampung. *Jurnal Tanah dan Sumberdaya Lahan*, 6(1), 1065–1074. <https://doi.org/10.21776/ub.jtsl.2019.006.1.5>
- Nurhayati. (2019). Perbanyak mikoriza dengan metode kultur pot. *Wahana Inovasi*, 8(1), 8–13.
- Oktorina, S. (2017). Kebijakan reklamasi dan revegetasi lahan bekas tambang (studi kasus tambang batu bara Indonesia). www.al-ard.uinsby.ac.id
- Piliarová, M., Ondřejková, K., Hudcovicová, M., Mihálik, D., &

- Kraic, J. (2019). Arbuscular mycorrhizal fungi - their life and function in ecosystem. *Agriculture (Pol'nohospodarstvo)*, 65(1), 3–15. <https://doi.org/10.2478/agri-2019-0001>
- Prasetyo, R., Sasli, I., & Ramadhan, D. T. H. (2019). Keragaman vegetasi dan identifikasi fungi mikoriza arbuskula (FMA) pada lahan bekas tambang. *Jurnal Agronomi Indonesia (Indonesian Journal of Agronomy)*, 47(2), 217–223. <https://doi.org/10.24831/jai.v47i2.25050>
- Prayoga, M. H., & Prasetya, B. (2021). Eksplorasi mikoriza arbuskula indigenous pada rhizosfer lahan pasca tambang batu bara. *Jurnal Tanah dan Sumberdaya Lahan*, 8(2), 349–357. <https://doi.org/10.21776/ub.jtsl.2021.008.2.6>
- Puja, I. N., & Atmaja, I. W. D. (2018). Kajian status kesuburan tanah untuk menentukan pemupukan spesifik lokasi tanaman padi. *Agrotrop: Journal on Agriculture Science*, 8(1), 1–10. <https://doi.org/10.24843/AJoAS.2018.v08.i01.p01>
- Pulungan, A. S. S. (2013). Infeksi fungi mikoriza arbuskula pada akar tanaman tebu (*Saccharum officinarum L.*). *Jurnal Biosains Unimed*, 1(1), 43–46.
- Suarna, I. W., Suryani, N. N., & Budiasa, K. M. (2018). Potensi dan adaptasi tumbuhan pakan *Alysicarpus vaginalis* di Provinsi Bali. *Pastura*, 8(1), 10–12.
- Tarigan, M. J., Rai, I. N., & Wiraatmaja, I. W. (2022). Respon pertumbuhan dan hasil kakao (*Theobroma cacao L.*) terhadap prototipe pupuk hayati FMA indigenus dengan media pembawa berbeda dan konsentrasi pupuk hayati cair. *Agro Bali : Agricultural Journal*, 5(3), 504–512. <https://doi.org/10.37637/ab.v5i3.1002>
- Wisnubroto, M. P., Putra, E. T. S., & Kurniasih, B. (2020). Tanggapan Biokemis, Fisiologi, dan Agronomis Kedelai (*Glycine Max L. Merrill*) terhadap Pemupukan NPK Berperekat Spent dan Doiled Bleaching Earth (Unpublished master's thesis). *Yogyakarta: Universitas Gadjah Mada.*
- Wisnubroto, M. P., Putra, E. T. S., & Kurniasih, B. (2021). Effects of spent and deoiled bleaching earth filler-based NPK fertilization on the soil nutrient status and growth of soybean (*Glycine max (L.) Merrill*). *Caraka Tani: Journal of Sustainable Agriculture*, 36(2), 213–226. <https://doi.org/10.20961/carakatani.v36i2.43847>