

Eksplorasi dan Identifikasi Fungi Mikoriza Arbuskular (FMA) serta Karakteristik Tanah Lahan Pasca Tambang Batu Bara pada Tingkat Kelerengan Berbeda di Kecamatan Talawi, Kota Sawahlunto

Muhammad Parikesit Wisnubroto^{1*}, Armansyah², Aswaldi Anwar², dan Dede Suhendra¹

¹Program Studi Agroekoteknologi, Fakultas Pertanian, Universitas Andalas
Kampus III Unand, Jl. Lintas Sumatera Km. 4, Pulau Punjung, Dharmasraya, Sumatera Barat
27573

²Program Studi Agroteknologi, Fakultas Pertanian, Universitas Andalas
Kampus Unand Limau Manis, Pauh, Padang, Sumatera Barat 25163

*Alamat korespondensi: muhammadparikesit@agr.unand.ac.id

INFO ARTIKEL	ABSTRACT/ABSTRAK
Diterima: 28-02-2024 Direvisi: 28-04-2024 Dipublikasi: 30-04-2024	Exploration and identification of arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) and soil characteristics of ex-coal mining land at different slope levels in Talawi District, Sawahlunto City
Keywords: CEC value, Indigenous AMF, Marginal soil, P content, Revegetation, Soil pH, Spore	Mining activities provide significant economic benefits for a country, one of which is coal mining. However, the impact on environmental damage is relatively large. Land revegetation can be achieved by the use of arbuscular mycorrhizal fungi (AMF). This study aimed to obtain indigenous AMF from former coal mining land in Talawi District, Sawahlunto City to be developed as an inoculum source, so that it can be applied in land revegetation efforts. The research was conducted by taking ten soil samples from ex-coal mining land, which were divided into five types of slope, namely flat, sloping, steep, slightly steep, and extremely steep. Based on the results of soil analysis, the ex-coal mining land was classified as marginal soil with a low fertility level, characterized by the dominance of the sand fraction, low pH, low levels of P, N, K, Ca, Mg, and CEC nutrients, and high level of Al and Pb. Four types of AMF spores were found from the five slope categories, namely <i>Glomus</i> sp., <i>Acaulospora</i> sp., <i>Gigaspora</i> sp., and <i>Sclerocystis</i> sp. Flat slopes provided the highest number of spores compared to other slopes. <i>Glomus</i> sp. were considered to have a higher adaptability on all types of slopes. The higher soil pH and P content decreased the number and diversity of spores. Meanwhile, the higher the soil CEC value, the higher the number and diversity of spores, up to a certain optimal limit, depending on the adaptability of each AMF spore.
Kata Kunci: FMA indigen, Kadar P, KTK tanah, pH tanah, Revegetasi, Spora, Tanah marginal	Kegiatan penambangan memberikan nilai keuntungan ekonomi yang cukup besar bagi suatu negara, salah satunya tambang batu bara. Akan tetapi, dampak kerusakan lingkungan yang ditimbulkan juga relatif besar. Upaya revegetasi lahan dapat dicapai antara lain dengan penggunaan fungi mikoriza arbuskular (FMA). Penelitian ini bertujuan untuk memperoleh FMA indigen dari lahan bekas tambang batu bara di Kecamatan Talawi, Kota Sawahlunto untuk dikembangkan sebagai sumber inokulum, sehingga dapat diaplikasikan dalam upaya revegetasi lahan. Penelitian dilakukan dengan mengambil sampel tanah dari lahan bekas tambang batu bara sebanyak sepuluh titik yang dibedakan menjadi lima macam tipe kelerengan yaitu datar, landai, curam, agak curam, dan sangat curam. Hasil analisis tanah menunjukkan bahwa lahan bekas tambang batu bara tergolong tanah marginal dengan tingkat kesuburan rendah

ditandai dengan dominasi fraksi pasir, pH rendah, kadar hara P, N, K, Ca, Mg, dan KTK yang rendah serta memiliki kandungan unsur logam Al dan Pb yang tinggi. Adapun dari lima kategori kelerengan ditemukan empat jenis spora FAM yaitu *Glomus* sp., *Acaulospora* sp., *Gigaspora* sp., dan *Sclerocystis* sp. Lereng datar memberikan jumlah spora tertinggi dibanding lereng lainnya. *Glomus* sp. memiliki kemampuan adaptasi yang lebih tinggi di semua tipe lereng dibandingkan jenis lain. Semakin tinggi pH dan kadar P dalam tanah, jumlah dan keanekaragaman spora akan semakin menurun. Sementara itu, semakin tinggi nilai KTK tanah, jumlah dan keanekaragaman spora akan semakin tinggi sampai batas optimal tertentu bergantung dari kemampuan adaptasi masing-masing spora FMA.

PENDAHULUAN

Indonesia merupakan salah satu negara yang memiliki sumberdaya alam berupa bahan tambang yang melimpah, diantaranya seperti batu bara, nikel, emas, bauksit, tembaga, dan lain sebagainya (Samal *et al.*, 2020). Dari seluruh bahan tambang tersebut, sektor batu bara memberikan kontribusi terbesar yaitu mencapai 70-80% bagi pendapatan negara dari sektor pertambangan (Paulina dkk., 2018). Namun demikian, industri tambang batu bara di Indonesia juga tak lepas dari beberapa tantangan yang perlu dihadapi. Salah satunya adalah masalah lingkungan yang muncul akibat aktivitas pertambangan dan pembakaran batu bara. Kegiatan penambangan batu bara bisa tergolong sebagai eksploitasi sumber daya alam yang tidak dapat diperbarui (*non-renewable resource*), yang mana dapat berdampak pada kerusakan ekosistem. Dengan kata lain aktivitas penambangan ini mengakibatkan suatu ekosistem tidak mampu lagi menjalankan fungsinya secara optimal, seperti perubahan bentang lahan, penurunan tingkat kesuburan tanah (hilangnya lapisan *top soil*), terjadinya ancaman terhadap keanekaragaman hayati (*biodiversity*), hilangnya kemampuan tanah menahan air, pencemaran udara dan akumulasi unsur-unsur logam yang bersifat toksik bagi tanaman (Fitriyanti, 2016). Setelah masa operasi tambang berakhir, reklamasi dan revegetasi lingkungan menjadi langkah penting untuk mengembalikan lahan bekas tambang menjadi kondisi yang lebih baik.

Permasalahan yang dihadapi dalam menjalankan program reklamasi maupun revegetasi lahan pasca tambang ialah sulitnya tanaman untuk tumbuh di lahan tersebut. Lahan bekas tambang umumnya berada di kawasan terbuka luas dengan intensitas cahaya matahari yang tinggi, temperatur tinggi (terkadang ekstrim), nilai pH rendah serta

degradasi flora, fauna dan mikroorganisme yang terdapat pada tanah. Selain itu, beberapa lahan pasca tambang batubara memiliki tekstur yang kasar, kandungan bahan organik rendah, laju infiltrasi air rendah, serta sangat kompak. Dari segi hara, tergolong ke dalam lahan marginal dengan kandungan hara makro sangat rendah, terutama N, P, K, Na dan Ca dengan tingkat keasaman tinggi dan nilai Kapasitas Tukar Kation (KTK) yang rendah (Subhan dkk., 2019). Salah satu upaya yang dapat dilakukan ialah dengan memanfaatkan fungi mikoriza arbuskular (FMA). Mikoriza merupakan suatu struktur yang terbentuk karena asosiasi simbiosis mutualisme antara cendawan tanah (fungi) dengan akar tanaman tingkat tinggi. Ada beberapa jenis mikoriza yang ditemukan di alam, (i) *Ectomycorrhiza*, (ii) *Ericoid mycorrhiza*, (iii) *Orchidaceous mycorrhiza* dan (iv) *Arbuscular mycorrhiza* (Bagyaraj, 2014). Jenis mikoriza yang menguntungkan dalam bidang pertanian tipe arbuskular yang mana berperan penting dalam memulihkan lahan bekas tambang, salah satunya lahan bekas tambang batu bara. Dalam upaya rehabilitasi, mikoriza berperan dalam peningkatan penyerapan nutrisi tanaman, stabilisasi tanah, rehabilitasi mikroba tanah, dan peningkatan ketahanan tanaman.

Manfaat mikoriza bagi tanaman inang antara lain meningkatkan serapan hara, menjadi penghalang terhadap infeksi patogen akar, meningkatkan toleransi tanaman inang terhadap cekaman kekeringan, meningkatkan hormon pertumbuhan, dan memperlancar terjadinya siklus biogeokimia (Setiadi & Setiawan, 2011). Jamur mikoriza arbuskular secara signifikan meningkatkan penyerapan nutrisi penting seperti K, Mg, dan Ca, mengurangi efek kerusakan cekaman kekeringan melalui sistem pertahanan antioksidan, sintesis osmolit, dan mempertahankan kadar fitohormon

pada tanaman. Mikoriza memiliki beberapa mekanisme aksi yang membantu pertumbuhan tanaman seperti penyerapan nutrisi, fiksasi nitrogen, fitohormon, asam organik, produksi enzim, dan perlindungan terhadap patogen (Husein *et al.*, 2022). Pada simbiosis ini, fungi memperoleh keuntungan nutrisi (karbohidrat dan zat tumbuh lainnya) untuk mendukung pertumbuhan dan perkembangannya dari akar tanaman (Purba dkk., 2014). Fungi mikoriza arbuskular dapat dikatakan sebagai suatu mikroorganisme tanah yang mampu membantu dalam siklus hara tanah. Mikroorganisme ini memiliki struktur hifa yang panjang dan halus, sehingga mampu menjelajah ke dalam tanah untuk absorpsi air, hara makro, dan mikro yang tidak dapat dijangkau oleh akar tanaman (Muryati dkk., 2016). Hifa FMA mampu menghasilkan glomalin yang berperan sebagai pengatur stabilisasi agregasi tanah (Rillig & Steinberg, 2002). Selain itu, dapat meningkatkan ketahanan inang terhadap serangan patogen penyebab penyakit akar (Suharti dkk., 2011). Pada lahan-lahan marginal tercemar logam berat, penggunaan FMA dinilai dapat membantu dalam proses fitoremediasi (Suharno & Sancayaningsih, 2013).

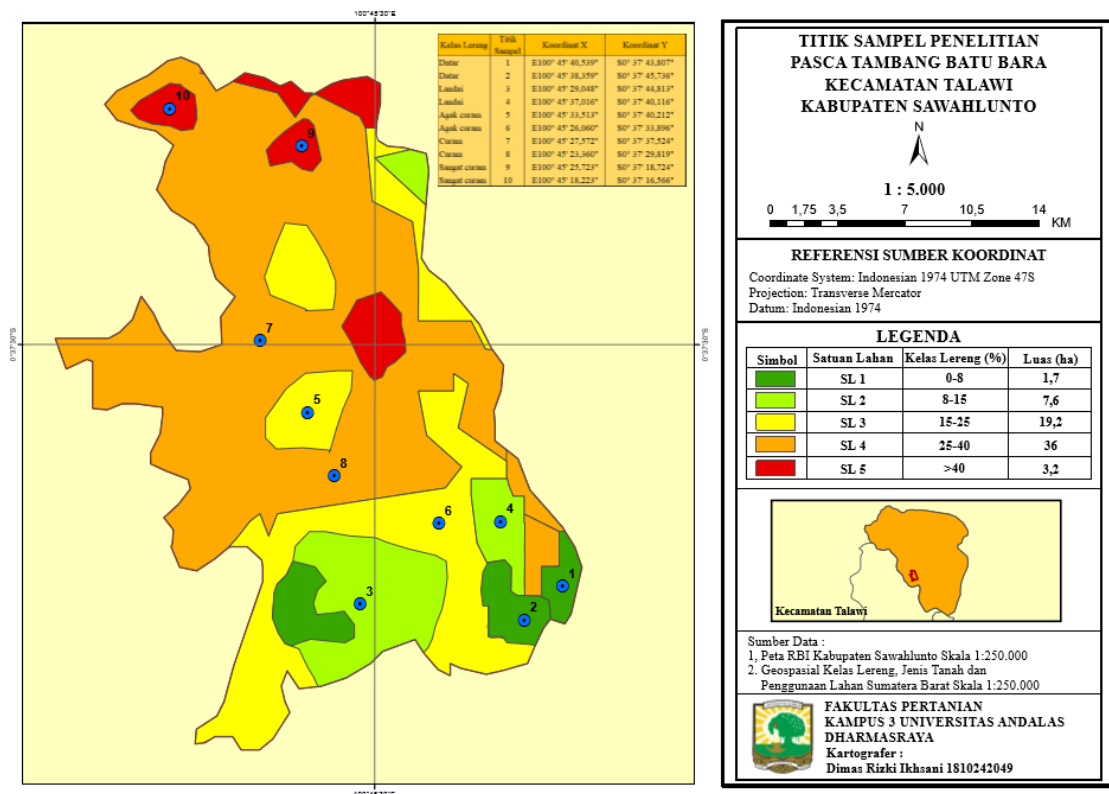
Mikoriza indigen dinilai lebih efektif untuk digunakan pada lahan pasca tambang batu bara karena bersifat lebih adaptif (Prayoga & Prasetya, 2021). Secara keseluruhan, FMA dalam asosiasinya memiliki kisaran inang yang cukup luas, mencapai sekitar 80% dengan tanaman teresterial. Akan tetapi, tingkat efektifitas masing-masing tanaman inang berbeda-beda. Hal ini disebabkan beberapa jenis FMA menunjukkan spesifikasi untuk memilih dan berasosiasi dengan jenis tanaman inang tertentu saja (Zulfiqar *et al.*, 2018). Jenis tanaman inang dan kondisi lingkungan ini berpotensi sangat menentukan tingkat kolonisasi akar, jumlah spora dan keragaman tipe spora (Muryati dkk., 2016). Di samping tipe vegetasi tanaman inang, kemiringan lereng secara tidak langsung juga dapat mempengaruhi keragaman dan populasi mikoriza arbuskular (Arifin dkk., 2020). Daerah dengan kemiringan yang lebih curam mungkin memiliki kondisi mikro lingkungan yang berbeda, seperti drainase yang lebih baik atau lebih buruk, eksposur terhadap cahaya matahari, dan pola aliran air. Semua

faktor ini dapat mempengaruhi jenis mikoriza yang dominan dalam ekosistem tertentu. Semakin curam tingkat kelerengan lahan, semakin sedikit vegetasi yang mampu tumbuh. Akibatnya, jumlah dan keragaman mikoriza yang ditemukan semakin rendah. Oleh sebab itu, perlu kajian lebih lanjut untuk mengetahui keberadaan dan keragaman FMA pada tanah bekas tambang batu bara pada tingkat kelerengan yang berbeda. Identifikasi FMA ini dinilai sangat penting guna mendapatkan informasi terkait sumber inokulum dan mengetahui jenis FMA yang memiliki toleransi tinggi pada lahan bekas tambang batu bara. Hasil identifikasi yang diperoleh juga dapat dimanfaatkan sebagai sumber inokulum sebagai mikroba potensial berperan aktif dalam mempercepat proses keberhasilan revegetasi pada lahan pasca tambang batu bara.

BAHAN DAN METODE

Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian dilaksanakan dari bulan Februari sampai Agustus 2023. Pengambilan contoh tanah berasal dari areal bekas timbunan pertambangan batu bara di Kecamatan Talawi, Kota Sawahlunto, Provinsi Sumatera Barat pada titik koordinat - 0.5759406363304879° Lintang Selatan (LS); 100.74745528371727° Lintang Utara (LU). Sampel tanah diambil pada lima tipe kelerengan yaitu datar (0-8%), landai (8-15%), agak curam (15-25%), curam (25-40%) dan sangat curam (>40%) pada kedalaman 0-20 cm dari atas permukaan tanah dengan masing-masing tipe kelerengan diambil sebanyak dua kali sampel (Gambar 1). Jenis vegetasi yang ditemui di masing-masing tipe kelerengan antara lain *Centrosema pubescens*, *Fimbristylis littoralis*, *Vigna luteola*, *Alysicarpus vaginalis*, *Mimosa* sp., dan *Digitaria* sp. (Wisnubroto dkk., 2023). Adapun isolasi dan identifikasi fungi mikoriza arbuskular (FMA) indigen dilakukan di Laboratorium Fisiologi Tumbuhan, Fakultas Pertanian, Universitas Andalas, Padang. Sementara itu, analisis terkait sifat fisika dan kimia tanah dilakukan di Laboratorium Pengujian Balai Pengujian Standar Instrumen Tanaman Buah Tropika, Solok serta Laboratorium Tanah Balai Pengkajian Teknologi Pertanian Yogyakarta.



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

Pengamatan Sifat Fisik dan Kimia Tanah

Sifat kimia tanah yang diamati adalah C-organik (metode Walkley dan Black), N-total (metode Kjeldhal), P-tersedia (metode Bray I), K-dd (metode NH_4OAC 1 N pH 7,0), pH (metode pH meter), Al-dd (metode titrasi KCl 1 N), kapasitas tukar kation (metode NH_4OAC 1 N pH 7,0), serta unsur logam lain seperti Fe dan Pb (ekstraksi DTPA).

Ekstraksi Spora Fungi Mikoriza Arbuskular (FMA)

Sekitar 50 g dari sampel tanah yang homogen dan kering diekstraksi dengan menggunakan pengayakan basah (Brundrett *et al.*, 1994). Sampel-sampel tersebut dicampur dengan 200 ml air dan kemudian disaring menggunakan multi-filter bertingkat dari ukuran 500 μm , 300 μm , 106 μm , dan 45 μm . Sampel distilat 45 μm 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 μm dan kemudian dibilas dengan air. Larutan supernatan yang tersisa dalam filter ini kemudian dimasukkan ke dalam gelas piala 150 ml.

Perhitungan Jumlah Spora

Larutan supernatan dipipet ke dalam gelas piala 50 ml, dan 1 ml larutan ini dimasukkan ke dalam cawan Petri. Jumlah spora kemudian diamati dan dihitung dengan menggunakan mikroskop binokuler dengan perbesaran 40x. Jumlah spora dihitung dengan menggunakan rumus (Wolf *et al.*, 2003):

$$\frac{A}{B} = \frac{X}{Y}$$

Keterangan :

A = Jumlah spora yang diamati dalam 1 ml volume sampel

B = volume sampel, 1 ml

X = Jumlah spora yang diamati dalam 50 ml volume sampel

Y = volume sampel, 50 ml

Frekuensi Keberadaan Spora

Frekuensi keberadaan spora dilakukan dengan cara mengamati keberadaan spora di vegetasi yang terdapat pada lahan bekas tambang batu bara. Apabila spora FMA indigen terdapat di seluruh areal pertanaman, maka frekuensi keberadaan spora adalah 100%. Perhitungan frekuensi didasarkan pada rumus sebagai berikut (Husna dkk., 2018):

$$\text{Frekuensi relatif keberadaan spora} = \frac{\text{Frekuensi spora jenis } X}{\text{Total semua jenis spora di sampel } Y} \times 100\%$$

Keanekaragaman dan Kekayaan spora

Keanekaragaman spora diamati dengan menghitung beberapa jumlah spora tertentu (yang dituju) dengan jumlah spora total di salah satu sampel yang diamati. Perhitungan ini menggunakan pendekatan kekayaan atau kepadatan spora mikoriza. Adapun kepadatan spora di hitung dengan rumus sebagai berikut (Syamsiyah & Yuliani, 2019):

$$\text{Kepadatan spora} = \frac{\text{Jumlah spora yang diamati}}{\text{berat tanah yang dianalisis}}$$

Identifikasi Morfologi Spora

Identifikasi tipe morfologi spora ditentukan dengan metode yang dikembangkan oleh (Brundrett, 2004) melalui pengamatan warna, ukuran, dan bentuk spora menggunakan mikroskop binokuler dengan perbesaran 100x.

Analisis dan Penyajian Data

Analisis data dilakukan menggunakan analisis ragam (anova) taraf kepercayaan 95% dengan *software* R-studio dan SAS. Beda nyata tiap perlakuan kelerengan diuji lanjut DMRT. Hubungan antar variabel dianalisis korelasi dengan hasil berupa korelogram. Kekuatan hubungan antara variabel satu dengan yang lain dianalisis regresi. Data hasil pengamatan disajikan dalam bentuk tabel dan kurva regresi dari masing-masing sampel yang diujikan. Kategorisasi masing-masing variabel spora FMA disesuaikan dengan standar dari beberapa penelitian yang telah dilakukan sebelumnya.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Karakteristik Lahan Bekas Tambang Kecamatan Talawi, Kota Sawahlunto

Lahan bekas tambang biasanya tergolong sebagai lahan marginal dengan tingkat kesuburan yang rendah, termasuk lahan bekas tambang batu bara di Kecamatan Talawi, Kota Sawahlunto, Provinsi Sumatera Barat (Gambar 1). Adanya kegiatan penambangan ini berdampak pada hilangnya lapisan *top soil*, kekeringan, pemadatan tanah, menurunkan kemampuan menahan air, miskin hara (terutama unsur hara makro seperti nitrogen (N) dan fosfor (P)), terjadinya akumulasi unsur mikro yang bersifat toksik serta memiliki pH tanah yang rendah (Margarettha, 2011). Kondisi tersebut berdampak pada sulitnya lahan untuk Kembali ditumbuhi oleh

vegetasi. Bahkan, hanya beberapa vegetasi saja yang memang bersifat toleran terhadap lingkungan tumbuh yang tidak menguntungkan. Dari hasil pengujian sampel tanah sebanyak 10 titik di lahan bekas tambang batu bara, Talawi, Sawahlunto, terlihat bahwa fraksi pasir lebih mendominasi dibanding fraksi debu dan liat pada masing-masing titik sampel. Hasil uji lanjut DMRT taraf kepercayaan 95% tidak menunjukkan adanya perbedaan yang signifikan pada tiap-tiap fraksi tanah pada masing-masing tipe kelerengan. Akan tetapi, dapat dikatakan semakin curam tipe kelerengan jumlah fraksi pasir pada tanah bekas tambang batu bara akan semakin tinggi. Hal ini justru berbanding terbalik dengan fraksi debu dan liat yang mana kedua fraksi tersebut nilainya akan semakin menurun seiring dengan meningkatnya jumlah fraksi pasir (Tabel 1).

Nilai pH tanah (pH H₂O) memberikan rentan yang cukup masam hingga basa. Kategori kelerengan datar, landai dan curam memberikan nilai pH tanah yang tergolong, sedangkan kelerengan agak curam dan sangat curam ber-pH basa. Namun demikian, dari 5 kelerengan yang diujikan hasil yang diperoleh tidak menunjukkan beda nyata yang signifikan menurut uji lanjut DMRT alpha 5%. (Tabel 1). Lahan bekas tambang batu bara umumnya memang memiliki tingkat kesuburan rendah, salah satunya ditandai dengan nilai pH rendah, bahkan pH yang dihasilkan bisa sangat masam mencapai 4 (Nursanti, 2018). Rentang pH tanah yang baik untuk pertumbuhan tanaman ialah 5,6–6,0. Dari Tabel 1, pH tanah terlihat bernilai < 5,5 dan > 6,0 sehingga unsur-unsur hara esensial tanaman jumlahnya rendah seperti kadar nitrogen (N), fosfor (P), kalium (K), karbon (C), kalsium (Ca), dan magnesium (Mg) yang nilainya relatif rendah. Jumlah nitrogen pada tiap kelerengan tidak menunjukkan perbedaan signifikan, akan tetapi nilainya sangat rendah. Jumlah tersebut tentunya sangat minim bagi kebutuhan tanaman. Nitrogen memiliki peran penting dalam sebagian besar proses pertumbuhan tanaman. Unsur ini memegang peran besar sebagai komponen penyusun protein, hormon, klorofil, vitamin dan enzim yang penting untuk menunjang pertumbuhan tanaman (Wisnubroto *et al.*, 2021). Kadar N yang rendah pada lahan pasca tambang batu bara menjadi bukti bahwa lahan tersebut merupakan lahan yang miskin hara yang perlu perbaikan kesuburan.

Unsur hara P juga memiliki nilai yang relatif sedikit pada tiap-tiap kelerengan. Nilai tertinggi hanya mencapai 3,6 ppm (Tabel 1) pada kategori curam dan sangat curam. Kadar K memberikan nilai yang berbeda dari tiap jenis kelerengan. Kalium (K) paling rendah justru terdapat pada tipe kelerengan yang curam. Apabila ditarik garis besarnya, kadar K akan semakin menurun seiring dengan kenaikan tingkat kelerengan lahan. Unsur K memiliki peran besar dalam sistem buka-tutup stomata. Hara K yang rendah, menyebabkan tekanan turgor pada sel penjaga stomata menurun, sehingga berdampak pada menutupnya stomata (Wisnubroto, 2020) vegetasi di

lahan pasca tambang batu bara. Akibatnya, pertumbuhan dan perkembangan vegetasi mengalami penurunan, tentunya hal ini akan berpengaruh keberlangsungan hidup mikoriza di perakaran. Semakin tinggi lereng, lapisan tanah *top soil* mudah hilang akibat terbawa aliran air maupun terdampak proses *leaching* lainnya, sehingga kadar hara esensial menjadi rendah. Kadar C, Ca dan Mg tanah bekas tambang batu bara tidak menunjukkan perbedaan yang signifikan, baik pada tingkat kelerengan yang datar, landai, agak curam, curam, maupun sangat curam.

Tabel 1. Hasil analisis fisik dan kimia 50 g sampel tanah pada lahan bekas tambang batu bara

Sifat fisik dan kimia tanah	Kelas lereng				
	Datar (0-8%)	Landai (8-15%)	Agak curam (15-25%)	Curam (25-40%)	Sangat curam (>40%)
Fraksi Pasir (%)	38,46 a	43,81 a	60,25 a	59,68 a	59,25 a
Fraksi Debu (%)	36,35 a	31,19 a	27,11 a	26,59 a	28,21 a
Fraksi Liat (%)	24,03 a	23,96 a	11,99 a	13,09 a	11,93 a
pH H ₂ O	5,55 a (AM)	5,25 a (M)	6,84 a (N)	4,99 a (M)	6,96 a (N)
Kadar N (%)	0,15 a (R)	0,15 a (R)	0,07 a (SR)	0,12 a (R)	0,05 a (SR)
P ₂ O ₅ (ppm) (Bray I)	1,83 a (SR)	1,52 a (SR)	3,31 a (SR)	3,67 a (SR)	3,60 a (SR)
Kadar K (cmol(+)/kg)	0,30 a (R)	0,16 bc (R)	0,27 ab (R)	0,10 c (SR)	0,18 abc (R)
Kadar C (%)	1,47 a (R)	1,58 a (R)	0,63 a (SR)	1,33 a (R)	0,52 a (SR)
Kadar Ca (cmol(+)/kg)	7,12 a (S)	5,66 a (S)	6,93 a (S)	4,95 a (R)	7,52 a (S)
Kadar Mg (cmol(+)/kg)	2,81 a (T)	2,66 a (T)	2,23 a (T)	2,42 a (T)	2,39 a (T)
KTK (cmol(+)/kg)	8,67 a (R)	5,61 b (R)	4,59 b (SR)	5,61 b (R)	5,10 b (R)
Kadar Al (ppm)	5.608,60 b (ST)	7.905,85 a (ST)	5.974,40 ab (ST)	4.627,40 b (ST)	6.158,30 ab (ST)
Kadar Fe (ppm)	17,83 b (T)	24,69 a (T)	17,94 b (T)	14,66 b (T)	15,93 b (T)
Kadar Pb (ppm)	40,05 a	40,05 a	37,60 a	30,05 a	38,50 a

Keterangan: Angka yang diikuti huruf yang sama pada baris yang sama menunjukkan tidak berbeda nyata pada uji DMRT dengan taraf kepercayaan 95%; angka yang diikuti huruf berbeda menunjukkan perbedaan yang nyata pada uji DMRT dengan taraf kepercayaan 95%. SR = Sangat Rendah, R = Rendah; S = Sedang, N = Netral, T = Tinggi, ST = Sangat Tinggi. Kriteria pH H₂O: SM = Sangat Masam; M = Masam; AM = Agak Masam; N = Netral; AA = Agak Alkalis; A = Alkalis (Sulaeman dkk., 2005).

Kapasitas tukar kation (KTK) berkaitan dengan kemampuan tanah dalam menyerap dan menukarkan kembali kation-kation yang terdapat di dalam tanah. Hasil uji tanah lahan bekas tambang batu bara memberikan nilai KTK < 10 cmol(+)/kg pada masing-masing kelerengan (Tabel 1). Terdapat perbedaan yang nyata antara lereng datar dengan keempat lereng lainnya. KTK pada lereng yang datar mencapai 8,67 cmol(+)/kg. Akan tetapi, nilai tersebut masih tergolong rendah sebagaimana pengujian KTK tanah lahan pasca tambang batu bara di Tanjung Pauh dengan nilai 15,21 cmol(+)/kg yang mana masih tergolong dalam kategori rendah (Nursanti, 2018). Rendahnya nilai KTK ini disebabkan karena fraksi penyusun tanah yang didominasi oleh pasir, sehingga

kemampuan untuk menyerap dan menukarkan ion-ion sangat rendah. Di samping itu, KTK juga dipengaruhi oleh pH tanah. pH yang asam ataupun basa membuat beberapa unsur tidak tersedia karena KTK tanahnya rendah. Sebagai contoh, unsur P tersedia pada tanah ketika berada pada kisaran pH 6,0–6,5, sementara rentang pH tanah bekas tambang batu bara berada di bawah dan di atas 6,0–6,5. Hal inilah yang membuat kadar P pada semua tipe kelerengan rendah dan bisa dikatakan tidak tersedia bagi tanaman karena terikat dengan ion Al³⁺ dan Fe³⁺ (Prayoga & Prasetya, 2021). Kondisi ini diperkuat dengan hasil uji kadar unsur logam. Dari setiap titik sampel tanah yang diuji, rata-rata memiliki kadar

aluminium (Al) yang sangat tinggi, yakni > 4500 ppm, serta timbal (Pb) yang mencapai > 20 ppm.

Kadar Al pada tipe lereng landai mencapai 7.905,85 ppm yang nyata lebih tinggi dibandingkan kadar Al lereng lainnya, sementara Pb pada tipe lereng datar dan landai yang mencapai 40,05 ppm (Tabel 1). Hasil pengujian ini jelas menunjukkan bahwa tanah di Talawi, Sawahlunto banyak mengandung unsur-unsur yang bersifat toksik bagi tanaman. Sementara untuk unsur besi (Fe) belum termasuk ke dalam kategori toksik bagi tanaman yang mana beberapa ahli menyebutkan bahwa rentang toksisitas Fe bagi tanaman berkisar 500–2000 ppm (Tabel 2). Kadar Al pada tanah pada konsentrasi 2–5

ppm bersifat toksik bagi sebagian besar tanaman (Tóth *et al.*, 2021) dan > 5 ppm justru toksik pada tanaman toleran Al. Penelitian lain menyebutkan kadar Al pada tanah > 3 me/100 g adalah kondisi yang tidak baik untuk pertumbuhan tanaman karena bersifat toksik (Setiadi dkk., 2015). Ambang batas Pb untuk tanaman berada pada kisaran 2 ppm, sementara untuk tanah-tanah pertanian memiliki batas kritis Pb sebanyak 50–300 ppm. Dengan demikian, kadar Pb di lahan bekas tambang Talawi, Sawahlunto yang mencapai 24–52 ppm sudah termasuk kategori tanah yang tidak baik untuk pertumbuhan dan perkembangan tanaman.

Tabel 2. Ambang kritis logam berat yang bersifat toksik bagi tanaman pertanian

Logam berat	Ambang kritis (ppm)	Gejala toksisitas	Referensi
Al	2–5	Hambatan pertumbuhan, sistem perakaran tidak berkembang dengan baik	Tóth <i>et al.</i> , 2021
Fe	500–2000	Tinggi tanaman menurun, jumlah tunas berkurang, kadar klorofil rendah, sehingga daun menguning dan klorosis	Noor dkk., 2012
Pb	50–300	Hambatan pertumbuhan dan mengalami klorosis ringan	Zulfiqar <i>et al.</i> , 2018

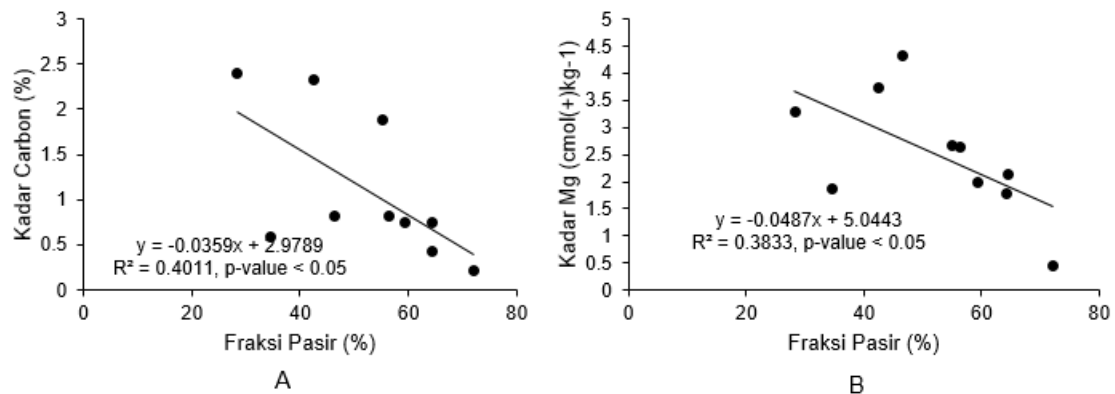
Dominansi fraksi pasir pada tanah berpengaruh signifikan terhadap kadar hara yang esensial bagi tanaman. Bukan hanya fraksi pasir saja, namun nilai pH tanah juga turut serta mempengaruhi kadar hara. Hubungan antar variabel fisik dan kimia maupun antar variabel kimia tanah dapat digambarkan dengan kurva regresi yang disajikan pada Gambar 2. Gambar 2A mengindikasikan fraksi pasir mempengaruhi kadar C dalam tanah secara linear negatif. Semakin tinggi persentase fraksi pasir atau semakin besar suatu jenis tanah didominasi oleh fraksi pasir, jumlah kadar hara C akan semakin menurun. Selain berpengaruh terhadap kadar karbon, persentase fraksi pasir juga mempengaruhi kadar magnesium di dalam tanah. Pengaruhnya ditunjukkan dengan hubungan linear negatif (Gambar 2B). Semakin tinggi persentase fraksi pasir pada tanah bekas tambang batu bara, kadar Mg akan semakin menurun. Kadar C yang rendah terjadi karena rendahnya bahan organik pada tanah bertekstur pasir. Beberapa penelitian terkait kadar hara pada tanah-tanah pasca tambang juga menunjukkan hasil yang sama, yakni memiliki tingkat kesuburan rendah, salah satunya bisa ditunjukkan dengan kadar C dan Mg yang rendah (Nursanti, 2018). Hubungan korelasi negatif antara fraksi pasir dengan C-organik juga terlihat pada jenis tanah-tanah marginal lainnya yang memang

didominasi pasir. Fraksi pasir merupakan penyusun tanah yang berperan untuk meningkatkan aerasi tanah. Semakin tinggi pasir semakin baik pertukaran udara tanah yang selanjutnya berpengaruh terhadap oksidasi bahan organik tanah menjadi mineral-mineral tanah. Fraksi pasir yang terlalu tinggi berpeluang pada tingginya oksidasi bahan organik dan berdampak pada kadar C yang rendah (Tangketasik dkk., 2012).

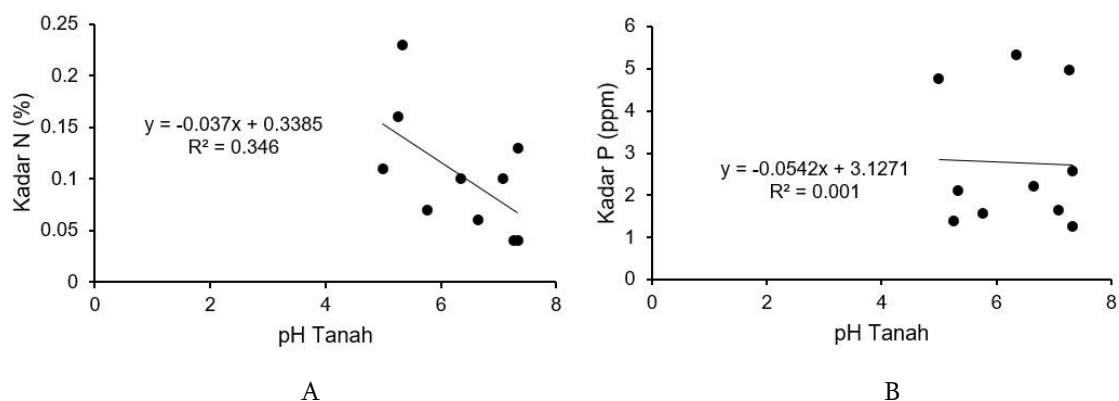
Nitrogen (N) menjadi salah satu hara esensial yang keberadaannya sangat dibutuhkan guna menunjang pertumbuhan dan perkembangan tanaman. Ketersediaannya sangat dipengaruhi oleh nilai keasaman tanah. Adapun pH yang terlalu masam dan basa berdampak pada rendahnya ketersediaan hara N yang bisa diserap oleh tanaman. Hubungan antara pH tanah dengan kadar N pada lahan bekas tambang batu bara dapat digambarkan dengan kurva regresi linear negative (Gambar 3). Semakin tinggi nilai pH tanah kadar N akan semakin menurun. Meskipun demikian, kadar hara N yang diperoleh dari hasil pengujian tanah masih tergolong rendah, meskipun berada pada kisaran pH di angka 5 (Tabel 1). Sementara itu, fosfor (P) merupakan unsur makro esensial yang bersifat *immobile* dalam tanah. Unsur ini berfungsi sebagai penyusun DNA, membran sel serta merupakan komponen dari senyawa ATP yang berperan sebagai sumber energi untuk pertumbuhan

tanaman. Adapun hubungan antara pH tanah dengan kadar P pada lahan bekas tambang batu bara dapat digambarkan dengan kurva regresi linear negatif. Semakin tinggi nilai pH tanah, maka kadar P akan semakin menurun. Subhan dkk. (2019) menyebutkan bahwa kadar nitrogen dan fosfor pada analisis tanah

bekas tambang batu bara di Provinsi Kalimantan Tengah sangatlah rendah akibat dari rendahnya nilai pH tanah. Dengan demikian, sangat jelas bahwa lahan bekas tambang batu bara tergolong jenis lahan marginal yang memiliki tingkat kesuburan rendah.



Gambar 2. Hubungan persentase fraksi pasir pada tanah bekas tambang batu bara dengan kadar karbon (A) dan kadar magnesium (B).



Gambar 3. Pengaruh pH tanah terhadap kadar nitrogen (A) dan fosfor (B) pada tanah bekas tambang batu bara.

Identifikasi dan Morfologi Fungi Mikoriza Arbuskular (FMA)

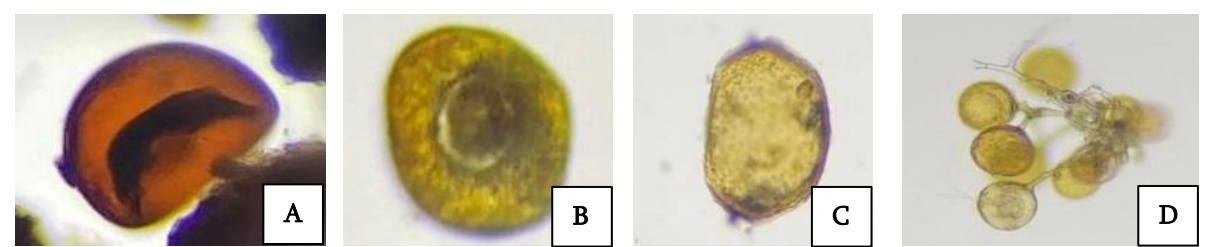
Kegiatan identifikasi ini dilakukan pada sepuluh titik sampel tanah bekas tambang batu bara yang telah diambil sebelumnya. Dari hasil pengamatan ditemukan empat jenis FMA yang masing-masing memiliki karakteristik berbeda-beda, seperti *Glomus* sp., *Acaulospora* sp., *Gigaspora* sp., dan *Sclerocystis* sp. (Gambar 4). *Glomus* sp. (Gambar 4A) bentuknya agak lonjong, berwarna kuning gelap, memiliki dua lapisan dinding spora, permukaan halus, dan tidak bereaksi dengan larutan meltzer. *Acaulospora* sp. (Gambar 4B) memiliki bentuk bulat, berwarna kuning kecoklatan, permukaan halus, bagian dalam spora bereaksi terhadap larutan meltzer

berwarna coklat gelap, terdapat tiga lapis dinding spora, dan memiliki saccule. *Gigaspora* sp. (Gambar 4C) umumnya berbentuk oval dengan spora berwarna merah cerah dan permukaannya berbintik-bintik, bereaksi dengan meltzer secara menyeluruh, dan memiliki dua lapisan dinding spora. *Sclerocystis* sp. (Gambar 4D) memiliki spora yang berbentuk bulat, tidak bereaksi dengan larutan meltzer, lolos saringan 300 µm, berwarna kuning kecoklatan, permukaan agak halus dengan dinding spora tebal, serta memiliki bulbous suspensor.

Fungi mikoriza arbuskular tergolong jenis mikroba tanah yang umumnya berasosiasi dengan perakaran tumbuhan. Beberapa famili tumbuhan yang mampu membentuk FMA antara lain

Juglandaceae, *Tiliaceae*, *Myrtaceae*, *Salicaceae*, *Fagaceae* dan *Caesalpiniaceae* (Bagyaraj, 2014). FMA berkembang biak menggunakan spora. Akan tetapi, spora FMA bersifat fakultatif obligat yang mana tidak mampu tumbuh dan berkembangbiak dengan baik bila tidak berasosiasi dengan tanaman inang (Armansyah dkk., 2019). Spora FMA yang tersebar di wilayah pengambilan sampel diamati menggunakan metode ekstraksi. Empat jenis spora yang ditemukan dari hasil ekstraksi 50 g tanah di lahan bekas tambang batu bara memberikan nilai jumlah spora yang berbeda. Jumlah dan frekuensi spora FMA yang ditemukan pada tiap tipe kelerengan tidak sama (Tabel 3). Hal ini menunjukkan masing-masing FMA memiliki tingkat kesesuaian dengan karakteristik tanah (Tabel 1) dan lingkungan rhizosfer yang

berbeda-beda pula. *Glomus* sp. memberikan nilai jumlah spora yang tidak berbeda nyata dari masing-masing tipe kelerengan. Sementara untuk *Acaulospora* sp. terdapat perbedaan yang signifikan. Spora *Acaulospora* sp. paling banyak ditemukan pada tipe kelerengan yang curam, sedangkan pada kelerengan yang agak curam tidak ditemukan *Acaulospora* sp. Hal ini diduga berkaitan erat dengan tipe vegetasi yang berada pada masing-masing kelerengan. Jumlah spora *Gigaspora* sp. lebih banyak ditemukan pada tipe kelerengan curam, sedangkan agak curam tidak ditemukan. FMA *Sclerocystis* sp. dapat ditemukan pada masing-masing tipe kelerengan dengan hasil yang tidak berbeda signifikan.



Gambar 4. Fungi mikoriza arbuskular yang ditemukan pada sampel tanah bekas tambang batu bara. (A) *Glomus* sp., (B) *Acaulospora* sp., (C) *Gigaspora* sp., (D) *Sclerocystis* sp. Pengamatan dengan perbesaran okuler 100X.

Tabel 3. Jumlah spora fungi mikoriza arbuskular (FMA) lahan bekas tambang batu bara

Jenis Spora FMA	Jumlah Spora 50 g Tanah ⁻¹				
	Datar (0-8%)	Landai (8-15%)	Agak Curam (15-25%)	Curam (25-40%)	Sangat Curam (>40%)
<i>Glomus</i> sp.	60 a	60 a	65 a	30 a	40 a
<i>Acaulospora</i> sp.	35 a	20 ab	0 b	40 a	25 a
<i>Gigaspora</i> sp.	20 abc	10 bc	0 c	35 a	27,5 ab
<i>Sclerocystis</i> sp.	25 a	20 a	25 a	15 a	12,5 a
Jumlah spora 50 g tanah ⁻¹	140 a	110 ab	90 b	120 ab	105 b

Keterangan: Angka yang diikuti huruf yang sama pada baris yang sama menunjukkan tidak berbeda nyata pada uji DMRT dengan taraf kepercayaan 95%; angka yang diikuti huruf berbeda menunjukkan perbedaan yang nyata pada uji DMRT dengan taraf kepercayaan 95%.

Jumlah spora FMA dari tiap kelerengan memiliki nilai yang berbeda dan yang terbanyak terdapat pada kategori lereng datar. Hasil analisis tanah lereng datar masih memberikan nilai pH tanah yang aman bagi tanaman dan KTK tanah yang relatif lebih tinggi dibanding kategori kelerengan lainnya (Tabel 1). Informasi ini bisa menjadi asumsi bahwa beberapa jenis gulma masih dapat tumbuh dengan baik, sehingga bisa menjadi inang alternatif bagi beberapa FMA, termasuk jenis FMA yang ditemukan

pada lahan bekas tambang batu bara. Jumlah spora FMA sebanyak 14–161 per 100 g tanah masih termasuk ke dalam kategori tinggi (Padri dkk., 2015), sehingga dengan jumlah spora 90–140 per 150 g (Tabel 3) tanah dapat dikatakan spora yang ada masih berjumlah cukup banyak. Dari Tabel 3 juga diperoleh informasi bahwa *Glomus* sp. lebih sering ditemui di lima tipe kelerengan yang diujikan dibanding spora FMA lainnya. Penemuan ini dapat diartikan *Glomus* sp. lebih mampu untuk beradaptasi dan

memperbanyak diri dengan baik dibandingkan dengan *Acaulospora* sp., *Gigaspora* sp., maupun *Sclerocystis* sp. Sesuai dengan penelitian yang dilakukan oleh Armansyah dkk. (2019) yang juga menyebutkan bahwa spora *Glomus* sp. mampu lebih banyak berkembang dan beradaptasi dengan baik pada rizosfer tanaman bengkuang (*Pachyrhizus erosus* L.), maupun pada gulma-gulma yang tumbuh pada jenis tanah masam (Prayoga & Prasetya, 2021).

Tipe kelerengan memberikan nilai keanekaragaman spora FMA yang berbeda nyata antara lereng datar dengan lereng sangat curam. Keanekaragaman terbanyak terdapat pada tipe lereng datar. Lereng datar dan sangat curam memberikan hasil yang tidak berbeda nyata, sementara lereng agak curam memiliki tingkat kekayaan jenis FMA yang lebih rendah (Tabel 4). Tingginya nilai keanekaragaman dan kekayaan jenis FMA pada lereng datar dapat terjadi karena FMA masih mampu beradaptasi dengan baik pada karakteristik tanah di tipe lereng datar. Ditinjau dari nilai KTK tanah (Tabel

1), dapat diasumsikan beberapa hara masih mampu ditukarkan sehingga vegetasi di atasnya masih bisa tumbuh dan mampu memberikan eksudat yang bermanfaat bagi perkembangan spora FMA. Perbedaan keanekaragaman dan kekayaan jenis FMA pada lahan bekas tambang batu bara dipengaruhi oleh beberapa faktor, termasuk ketersediaan hara, jenis vegetasi, ketinggian tempat, Cahaya dan lain sebagainya serta kondisi musim saat pengambilan sampel dilakukan. Pada pengujian kali ini pengambilan sampel dilakukan pada Februari yang mana masih terdapat hujan. Ketika musim penghujan, mikoriza tidak aktif bersporulasi dibandingkan musim kemarau, sehingga jumlah spora yang berhasil diidentifikasi tidak begitu banyak. Sebaliknya pada musim kering, aktivitas sporulasi dan perkembangan mikoriza sangat tinggi, karena pembentukan spora baru akan berkurang ketika kelembaban tanah sangat tinggi (Margarettha, 2011).

Tabel 4. Identifikasi spora fungi mikoriza arbuskular (FMA) pada lahan bekas tambang batu bara

Karakter spora FMA	Kelerengan				
	Datar (0-8%)	Landai (8-15%)	Agak curam (15-25%)	Curam (25-40%)	Sangat curam (>40%)
Keanekaragaman FMA	0,32 a	0,30 ab	0,24 b	0,29 ab	0,28 b
Kekayaan FMA	0,61 a	0,41 ab	0,21 c	0,52 ab	0,63 a

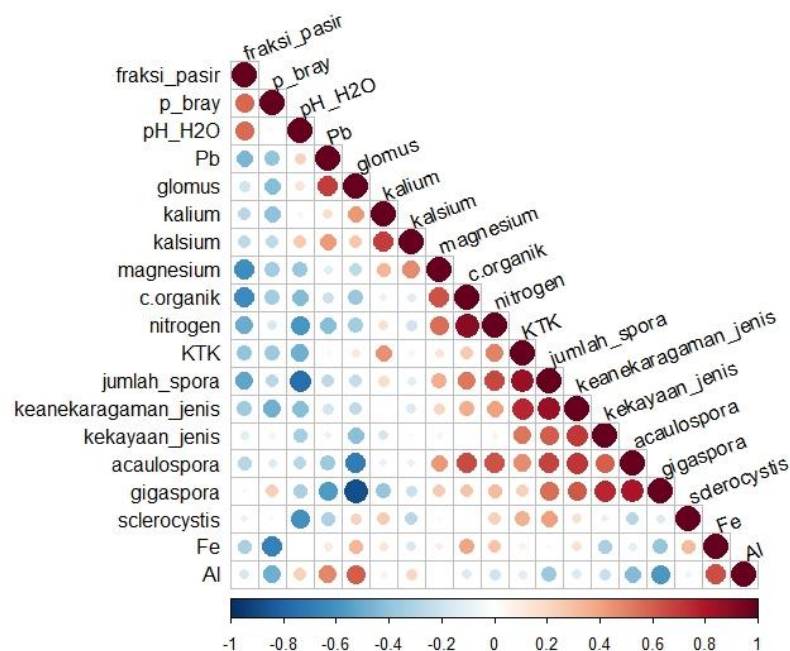
Keterangan: Angka yang diikuti huruf yang sama menunjukkan tidak berbeda nyata pada uji DMRT dengan taraf kepercayaan 95%; angka yang diikuti huruf berbeda menunjukkan perbedaan yang nyata pada uji DMRT dengan taraf kepercayaan 95%.

Karakteristik Fisika dan Kimia Tanah Terhadap Spora Fungi Arbuskular Mikoriza

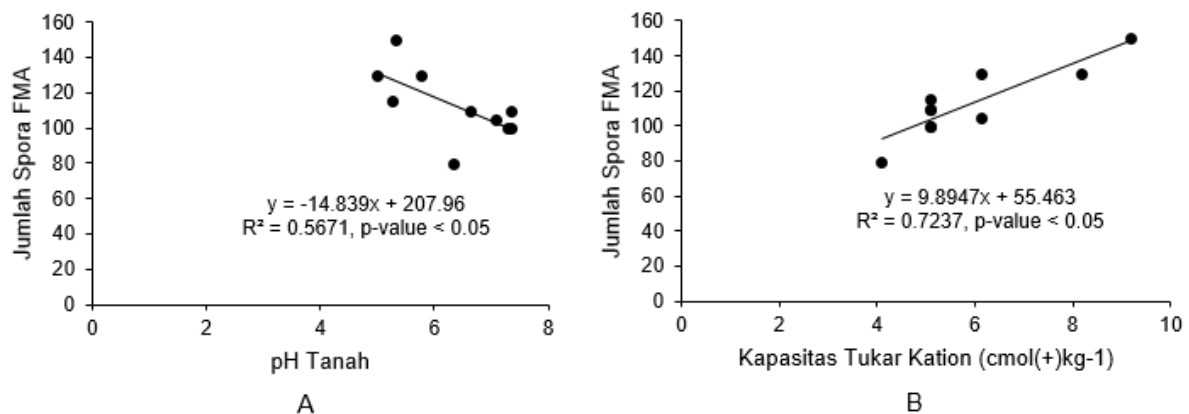
Pertumbuhan dan perkembangan spora FMA sangat bergantung dari beberapa faktor, baik faktor internal maupun eksternal. Faktor internal umumnya berkaitan dengan viabilitas, genetik dan kemampuan adaptasi spora. Sementara faktor eksternal dapat berupa kesuburan tanah, cuaca, iklim dan tanaman inang. Kesuburan tanah dapat diamati berdasarkan sifat fisik maupun kimiawi tanah di lokasi pengujian, yakni lahan bekas tambang batu bara. Korelasi antara karakter fisik dan kimia tanah dengan karakter spora FMA dapat diilustrasikan pada korelogram sebagaimana tertampil pada Gambar 5.

Nilai keasaman (pH) tanah berkorelasi negatif dengan jumlah spora. Semakin tinggi pH (basa), jumlah spora akan semakin menurun. Kolonisasi dan perkembangan mikoriza akan semakin menurun ketika tanah dalam kondisi terlalu basa (Yasier dkk., 2022). pH yang optimum untuk pertumbuhan mikoriza ialah 4,0–6,0 (Yusra, 2005). Ketika pH tanah

berada di luar batas optimum (terlalu asam ataupun basa), banyak spora mikoriza yang inaktif, sehingga proses sporulasi mikoriza akan terganggu. Sebaliknya, ketika kondisi pH tanah semakin asam, sporulasi spora FMA akan semakin tinggi (Saputra dkk., 2015) yang mana pengaruhnya dapat dilihat dari hubungan linear (Gambar 6A) antara kedua variabel (Alayya & Prasetya, 2022). Meskipun demikian, masing-masing mikoriza memiliki daya adaptasi terhadap lingkungan yang berbeda-beda, sehingga pH optimum untuk sporulasi mikoriza juga memiliki rentang yang berbeda pula. Kekuatan hubungan antara pH tanah dengan jumlah spora dapat digambarkan dengan kurva regresi linear negatif (Gambar 6A). Dari kurva tersebut diketahui semakin tinggi nilai pH, jumlah spora akan semakin menurun. Sebaliknya, peningkatan nilai KTK tanah akan semakin meningkatkan jumlah spora FMA di lahan bekas tambang batu bara. Pengaruhnya dapat digambarkan dengan kurva regresi linear positif (Gambar 6B).



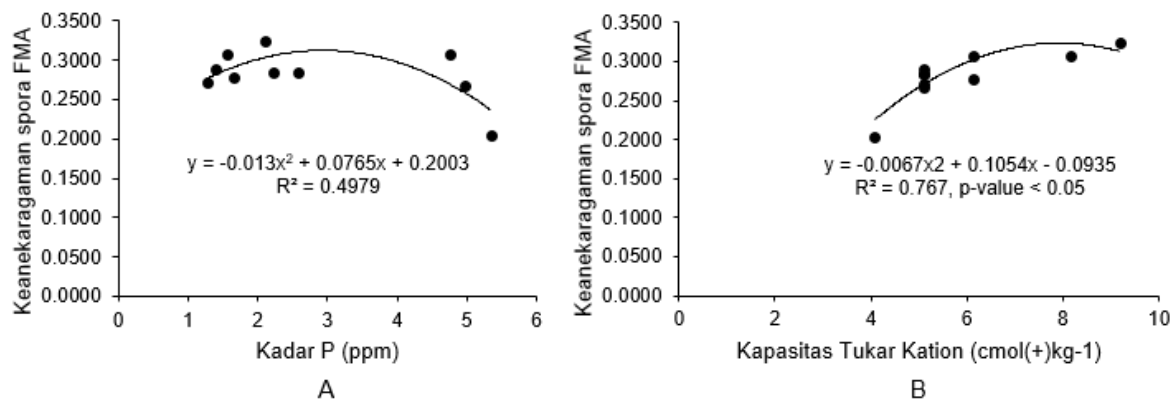
Gambar 5. Korelogram karakteristik fisika dan kimia tanah bekas tambang batu bara terhadap variabel pengamatan spora FMA. Semakin berwarna biru menandakan kedua variabel memiliki pengaruh yang kuat secara negatif (mendekati -1), sedangkan semakin berwarna merah pengaruhnya semakin kuat secara positif (mendekati +1).



Gambar 6. Pengaruh pH tanah (A) dan kapasitas tukar kation (KTK) (B) terhadap jumlah spora FMA pada tanah bekas tambang batu bara.

Kapasitas tukar kation (KTK) tanah memberikan nilai korelasi positif dengan jumlah spora dan keanekaragaman spora FMA (Gambar 7). Diketahui nilai koefisien korelasi yang mendekati +1. KTK tanah yang tinggi mengindikasikan tingginya jumlah kation yang mampu dijerap dan ditukarkan oleh koloid tanah. Oleh sebab itu, dapat diasumsikan hara tersedia yang terdapat pada tanah berada dalam kondisi yang cukup untuk pertumbuhan tanaman. Ketersediaan hara yang cukup tentunya memperbaiki

pertumbuhan dan perkembangan vegetasi di atas permukaan tanah. Pertumbuhan vegetasi yang optimal menginisiasi optimalnya jumlah eksudat akar, sehingga mampu mendukung pertumbuhan dan perkembangan spora FMA. Jumlah spora yang meningkat pada suatu jenis tanah mengindikasikan tingginya keanekaragaman spora FMA. Makin tinggi nilai KTK tanah akan meningkatkan jumlah spora yang diikuti dengan peningkatan keanekaragaman spora pada lahan bekas tambang batu bara.



Gambar 7. Pengaruh kadar fosfor (A) dan kapasitas tukar kation (KTK) terhadap keanekaragaman spora FMA lahan bekas tambang batu bara.

Keanekaragaman spora FMA di tanah bekas tambang batu bara dipengaruhi oleh kadar P dan KTK dalam tanah (Gambar 7A dan 7B). Keduanya berpengaruh secara polynomial kuadratik, yang dapat diartikan bahwa peningkatan kadar P dan KTK akan meningkatkan keanekaragaman spora FMA, namun hanya sampai batas optimum saja. Dari Gambar 7A dan 7B diketahui bahwa keanekaragaman spora FMA mencapai nilai optimum ketika kadar P sebesar 3 ppm dan KTK 8%. Setelah kadar P > 3 ppm dan KTK > 8% keanekaragaman spora menurun, karena hanya beberapa macam jenis FMA yang mampu beradaptasi pada lingkungan tertentu. Kadar P yang tinggi dalam tanah dapat berakibat pada hambatan kolonisasi mikoriza, karena menurunnya eksudasi akar tanaman. Ketika kandungan P tinggi di dalam tanah lalu kemudian diubah dan ditranslokasikan dalam bentuk hasil fotosintat, justru akan lebih banyak ditranslokasikan ke tajuk tanaman guna pembentukan jaringan baru maupun tunas daripada ke akar. Akibatnya, jumlah asimilat yang ditranslokasikan ke akar lebih sedikit sehingga berdampak pada rendahnya esudat akar yang diperlukan untuk pertumbuhan dan perkembangan spora mikoriza (Prayoga & Prasetya, 2021).

SIMPULAN

Eksplorasi dan identifikasi Fungi Mikoriza Arbuskular (FMA) pada lahan bekas tambang batu bara pada lima tipe kelerengan mendapatkan empat (4) jenis spora yaitu *Glomus* sp., *Acaulospora* sp., *Gigaspora* dan *Sclerocystis* sp. Lereng datar cenderung memberikan jumlah spora tertinggi dibanding lereng lainnya. *Glomus* sp. dinilai memiliki kemampuan adaptasi yang lebih tinggi di semua tipe lereng. Lahan bekas tambang batu bara

tergolong tanah marginal dengan tingkat kesuburan rendah ditandai dengan dominasi fraksi pasir, pH rendah, kadar hara P, N, K, Ca, Mg dan KTK yang rendah serta memiliki kandungan unsur logam Al dan Pb yang tinggi. Semakin tinggi pH dan kadar P dalam tanah, jumlah dan keanekaragaman spora akan semakin menurun. Sementara semakin tinggi nilai KTK tanah, jumlah dan keanekaragaman spora akan semakin tinggi sampai batas optimal tertentu bergantung dari kemampuan adaptasi masing-masing spora FMA.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih 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

- Alayya, NP dan B Prasetya. 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.
- Arifin, AJ, B Prasetya, dan S Kurniawan. 2020. Keragaman jenis dan populasi mikoriza arbuskula dalam berbagai kelompok umur pinus tumpangsari kopi di UB Forest. Jurnal Tanah dan Sumberdaya Lahan. 8(1): 9–17.
- Armansyah, A, N Herawati, dan N Kristina. 2019. Keanekaragaman fungi mikoriza arbuskula (FMA) di rizosfer tanaman bengkuang

- (*Pachyrhizus erosus* (L) Mrb). Jagur Jurnal Agroteknologi. 3(1): 8–14.
- Bagyaraj, DJ. 2014. Mycorrhizal fungi. Proceedings of the Indian National Science Academy. 80(2): 415–428.
- Brundrett, M, L Melville, and L Peterson. 1994. Practical Methods in Mycorrhiza Research. Mycologue Publications. Guelph.
- Brundrett, M. 2004. Diversity and classification of mycorrhizal associations. Biological Reviews. 79: 473–495.
- Fitriyanti, R. 2016. Pertambangan batu bara : dampak lingkungan, sosial dan ekonomi. Jurnal Redoks Teknik Kimia. 1(1): 34–40.
- Husein, M, N Umami, A Pertiwinigrum, MM Rahman, and D Ananta. 2022. The role of arbuscular mycorrhizal fungi density and diversity on the growth and biomass of corn and sorghum forage in trapping culture. Tropical Animal Science Journal. 45(1): 37–43.
- Husna, FD Tuheteru, Lidia, A Arif, Albasri, Basrudin, WR Nurdin. 2018. Keragaman Fungi Mikoriza Arbuskula pada Rizosfer Angsana (*Pterocarpus indicus* Willd) di Kecamatan Gu Kabupaten Buton Tengah. Prosiding Seminar Nasional Mikoriza: Mikoriza untuk Pembangunan Pertanian dan Kehutanan Berkelanjutan. Hlm. 69–84.
- Margareththa, M. 2011. Eksplorasi dan identifikasi mikoriza indigen asal tanah bekas tambang batu bara. Jurnal Ilmu-Ilmu Hayati. 10(5): 641–647.
- Muryati, S, I Mansur, D Sri, dan W Budi. 2016. Keanekaragaman fungi mikoriza arbuskula (FMA) pada rhizosfer *Desmodium* spp. asal PT. Cibaliung Suberdaya, Banten. Jurnal Silviculture Tropika. 7(3): 188–197.
- Noor, A, I Lubis, M Ghulamahdi, MA Chozin, K Anwar, dan D Wirnas. 2012. Pengaruh konsentrasi besi dalam larutan hara terhadap gejala keracunan besi dan pertumbuhan tanaman padi. Jurnal Agronomi Indonesia. 40(2): 91–98.
- Nursanti, I. 2018. Karakteristik tanah area pasca penambangan di Desa Tanjung Pauh. Jurnal Media Pertanian. 3(2): 54–60.
- Padri, MH, B Burhanuddin, dan R Herawatiningsih. 2015. Keberadaan fungi mikoriza arbuskula pada jabon putih di lahan gambut. Jurnal Hutan Lestari. 3(3): 401–410.
- Paulina, M, I Mansur, dan A Junaedi. 2018. Tanggap pertumbuhan aren (*Arenga pinnata* [Wurmb] Merr.) diinokulasi dengan fungi mikoriza arbuskula terhadap pengapuran di lahan pasca tambang batu bara. Journal of Tropical Silviculture. 9(3): 196–204.
- Prayoga, MH, dan B Prasetya. 2021. Eksplorasi mikoriza arbuskula indigen pada rhizosfer lahan pasca tambang batu bara. Jurnal Tanah dan Sumberdaya Lahan. 8(2): 349–357.
- Purba, PRO, N Rahmawati, EH Kardhinata, dan A Sahar. 2014. Efektivitas beberapa jenis fungi mikoriza arbuskular terhadap pertumbuhan tanaman karet (*Hevea brasiliensis* Muell. Arg.) di pembibitan. Jurnal Online Agroteknologi. 2(2): 919–932.
- Rillig, MC, and PD Steinberg. 2002. Glomalin production by an arbuscular mycorrhizal fungus: A mechanism of habitat modification?. Soil Biology and Biochemistry. 34(9): 1371–1374.
- Samal, I, I Mansur, A Junaedi, dan H Kirmi. 2020. Evaluasi pertumbuhan aren (*Arenga pinnata* [Wurmb]) di lahan pasca tambang PT Berau Coal Kalimantan Timur. Media Konservasi. 25(2): 103–112.
- Saputra, B, R Linda, dan I Lovadi. 2015. Jamur mikoriza vesikular arbuskular (MVA) pada tiga jenis tanah rhizosfer tanaman pisang nipah (*Musa paradisiaca* L. var. nipah) di Kabupaten Pontianak. Protobiont. 4(1): 160–169.
- Setiadi, Y, dan A Setiawan. 2011. Studi status fungi mikoriza arbuskula di areal rehabilitasi pasca penambangan nikel (Studi kasus PT INCO Tbk. Sorowako, Sulawesi Selatan). Jurnal Silviculture Tropika. 3(1): 88–95.
- Setiadi, Y, D Fiona, dan C Anira. 2015. Deteksi dini keracunan aluminium tanaman *Bridelia monoica* Merr. pada tanah pasca tambang batu bara PT. Jorong Barutama Greston Kalimantan Selatan. Jurnal Silviculture Tropika. 6(2): 101–106.
- Subhan, E, S Salampak, AE Embang, dan M Masliani. 2019. Analisis tingkat kesuburan tanah lahan bekas penambangan batu bara PT. Senamas Energindo Mineral Kabupaten Barito Timur Provinsi Kalimantan Tengah. Media Ilmiah Teknik Lingkungan. 4(2): 34–40.
- Suharno, S, dan RP Sancayaningsih. 2013. Fungi mikoriza arbuskula: potensi teknologi mikorizoremediasi logam berat dalam rehabilitasi lahan tambang. Bioteknologi. 10(1): 23–34.

- Suharti, N, T Habazar, N Nasir, D Dachryanus, dan J Jamsari. 2011. Induksi ketahanan tanaman jahe terhadap penyakit layu *Ralstonia solanacearum* ras 4 menggunakan fungi mikoriza arbuskular (FMA) indigenus. Jurnal Hama dan Penyakit Tumbuhan Tropika. 11(1): 102–111.
- Sulaeman, Suparto, dan Eviati. 2005. Petunjuk Teknis Analisis Kimia Tanah, Tanaman, Air dan Pupuk. Balai Penelitian Tanah. Bogor.
- Syamsiyah, F, dan Yuliani. 2019. Kepadatan spora dan status infeksi mikoriza vesikula arbuskula di rizosfer tembakau (*Nicotiana tabacum* L.) varietas lokal Jawa Timur pada lahan cekaman kekeringan. LenteraBio. 8(2): 120–126.
- Tangketasik, A, NM Wikarniti, NN Soniari, dan IW Narka. 2012. Kadar bahan organik tanah pada tanah sawah dan tegalan di Bali serta hubungannya dengan tekstur tanah. Argotrop. 2(2): 101–107.
- Tóth, B, MJ Moloi, L Szoke, M Danter, and MA Grusak. 2021. Cultivar differences in the biochemical and physiological responses of common beans to aluminum stress. Plants. 10(10): 1–19.
- Wisnuboto, MP. 2020. Tanggapan Biokemis, Fisiologi, dan Agronomis Kedelai (*Glycine max* L. Merrill) terhadap Pemupukan NPK Berperekat Spent dan Doiled Bleaching Earth. [Tesis]. Universitas Gadjah Mada. Yogyakarta.
- Wisnubroto, MP, ETS Putra, and B Kurniasih. 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.
- Wisnubroto, MP, A Armansyah, A Anwar, dan D Suhendra. 2023. Kolonisasi fungi mikoriza arbuskular (FMA) pada rizosfer beberapa vegetasi di lahan pasca tambang batu bara dengan tingkat kelerengan berbeda. Agro Bali: Agricultural Journal. 6(3): 771–782.
- Wolf J, NC Johnson, DL Rowland, and PB Reich. 2003. Elevated carbon dioxide and plant species richness impact arbuscular mycorrhizal fungal spore communities. New Phytologist. 157(3): 579–588.
- Yasier, I, S Syakur, dan H Helmi. 2022. Aplikasi jenis mikoriza terhadap pH dan P-tersedia pada ultisol yang ditanami kacang tanah (*Arachis hypogaea* L.). Jurnal Sains Riset. 12(2): 355–358.
- Yusra, Y. 2005. Pengaruh lateks dan cendawan mikoriza terhadap P-total, P-tersedia dan pH tanah ultisols. Jurnal Ilmiah Pertanian Kultura. 40(2): 100–105.
- Zulfiqar, U, M Farooq, S Hussain, M Maqsood, M Hussain, M Ishfaq, M Ahmad, and MZ Anjum. 2019. Lead toxicity in plants: Impacts and remediation. Journal of Environmental Management. 250:109557. DOI: 10.1016/j.jenvman.2019.109557.