

KERAGAMAN FUNGI MIKORIZA ARBUSKULA DI ZONA INTI DAN ZONA REHABILITASI TAMAN NASIONAL GUNUNG HALIMUN SALAK

Diversity of Arbuscular Mycorrhizae Fungi in the Core Zone and Rehabilitation Zone of Gunung Halimun Salak National Park

Sri Wilarso Budi^{1*}, Candra Pradana Arifandi² dan Bayu Winata³

(Diterima 21 November 2024/Disetujui 19 Desember 2024)

ABSTRACT

Mycorrhiza is a form of symbiosis between fungi and plant roots that can increase the absorption of plant nutrients, especially phosphorus (P). Mycorrhizal diversity is influenced by environmental conditions and the type of host plant. This study aims to assess mycorrhizal diversity in Gunung Halimun Salak National Park, particularly in the core zone (ZI) and rehabilitation zone which comprises of two ecosystems type, rehabilitation zone with reforestation (ZRR) and rehabilitation zone with agroforestry (ZRA). A total of 75 soil and root samples were taken from each location then used to observe spore diversity, spore density and arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) colonization. The results showed that there were 8 genera of AMF found in the three locations, namely Acaulospora, Entrophospora, Dentiscutata, Diversispora, Gigaspora, Glomus, Sclerocystis and Scutellospora. The highest spore density was found in the ZI at 22.66 spores/g of soil. The Glomus and Acaulospora were the highest genera in terms of relative frequency in all sites study (100%). Glomus had the highest relative abundance in all three sites including the ZI 52.38%, ZRR 54.16% and ZRA 47.8%. AMF colonization was negatively correlated with potential P content, but positively correlated with light intensity. The highest level of colonization was found in ZRA at 59.07%.

Keywords: amf, arbuscular mycorrhizal fungi, colonisation, diversity, gunung halimun salak national park, spores

ABSTRAK

Mikoriza merupakan bentuk simbiosis antara fungi dengan akar tumbuhan yang dapat meningkatkan penyerapan unsur hara tanaman terutama fosfor (P). Keragaman mikoriza dipengaruhi oleh kondisi lingkungan dan jenis tanaman inang. Penelitian ini bertujuan mengkaji keragaman mikoriza di zona inti (ZI) dan zona rehabilitasi yang terdiri dari dua tipe ekosistem hutan dan lahan, yaitu ekosistem hutan rehabilitasi (ZRR) dan ekosistem agroforestri (ZRA), Taman Nasional Gunung Halimun Salak. Sebanyak 75 sampel tanah dan akar diambil dari setiap lokasi yang digunakan untuk mengamati keragaman spora, kepadatan spora dan kolonisasi fungi mikoriza arbuskula (FMA). Hasil penelitian menunjukkan terdapat 8 genus FMA yang ditemukan pada ketiga lokasi yaitu Acaulospora, Entrophospora, Dentiscutata, Diversispora, Gigaspora, Glomus, Sclerocystis dan Scutellospora. Kepadatan spora tertinggi terdapat pada zona inti sebesar 22.66 spora/gram tanah. Genus Glomus dan Acaulospora memiliki frekuensi relatif tertinggi di ketiga lokasi (100%). Glomus memiliki kelimpahan relatif tertinggi di ketiga lokasi antara lain ZI 52.38%, ZRR 54.16% dan ZRA 47.8%. Kolonisasi FMA berkorelasi negatif dengan kadar P-potensial, namun berkorelasi positif dengan intensitas cahaya. Tingkat kolonisasi tertinggi terdapat pada ZRA sebesar 59.07%.

Kata kunci: FMA, fungi mikoriza arbuskula, keragaman, kolonisasi, spora, taman nasional gunung halimun salak

^{1,2,3} Departemen Silvikultur, Fakultas Kehutanan dan Lingkungan, IPB University
Jl. Ulin Kampus IPB, Dramaga, Bogor, Jawa Barat, Indonesia 16680

* Penulis korespondensi:

e-mail: swilarso@apps.ipb.ac.id

PENDAHULUAN

Mikoriza merupakan bentuk simbiosis antara fungi dengan akar tumbuhan. Secara umum, mikoriza diklasifikasikan menjadi tiga kelompok, yaitu endomikoriza, ektomikoriza dan ektendomikoriza (Basri 2018). Fungi Mikoriza Arbuskula (FMA) merupakan salah satu kelompok fungi dari golongan endomikoriza yang hidup di dalam tanah dan dicirikan dengan adanya hifa yang menembus akar secara intraseluler (Sukmawaty dan Asriani 2015). Di sisi lain, ektomikoriza merupakan kelompok fungi mikoriza yang dapat mendominasi suatu ekosistem hutan yang terdapat jenis tumbuhan inang bagi jenis fungi ektomikoriza, seperti famili Dipterocarpaceae dan Pinaceae (Smith dan Read 2008). Kolonisasi akar oleh mikoriza berperan penting dalam membantu penyerapan unsur hara bagi tumbuhan inang terutama unsur fosfor (P). Namun kolonisasi FMA juga dipengaruhi oleh kondisi lingkungan, seperti sifat kimia tanah.

Penyebaran FMA bervariasi menurut iklim, lingkungan dan tipe penggunaan lahan (Nurhalimah *et al.* 2014). Mikoriza merupakan golongan fungi yang memerlukan tanaman inang untuk berkembang, sehingga keberadaan vegetasi sangat menentukan populasi mikoriza. Selain itu, praktik-praktik agrikultur seperti rotasi tanaman, pengolahan tanah, aplikasi fungisida dan aplikasi pupuk dapat mengurangi populasi FMA dalam tanah.

Taman Nasional Gunung Halimun Salak (TNGHS) merupakan kawasan konservasi hutan hujan tropis pegunungan yang memiliki beberapa zona (zonasi) dengan karakteristik habitat (ekosistem) tertentu. Beberapa zona tersebut diantaranya, yaitu: (1). Zona inti yang merupakan hutan hujan tropis alami dan dipertahankan kondisi alamiahnya dan (2). Zona rehabilitasi yang merupakan hutan hujan tropis terganggu dan telah direhabilitasi dengan dua pendekatan, diantaranya, yaitu reforestasi (revegetasi dengan jenis pohon asli) dan sistem agroforestri (revegetasi dengan kombinasi jenis pohon dan jenis tanaman non-kehutanan).

Perbedaan kondisi dan karakteristik lingkungan dari ketiga lokasi (zona) tersebut berpotensi menyebabkan perbedaan terhadap keberadaan dan keragaman fungi mikoriza yang ada di TNGHS. Penelitian fungi mikoriza dari ketiga lokasi dengan karakteristik habitat (ekosistem) yang berbeda tersebut perlu dilakukan untuk mengetahui keberadaan dan keragaman mikoriza pada berbagai kondisi dan karakteristik ekosistem hutan di TNGHS, sehingga dapat dimanfaatkan dalam menjaga, memelihara dan/atau meningkatkan stabilitas, produktivitas, serta keberlanjutan pada ekosistem hutan hujan tropis, khususnya di TNGHS.

Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji keragaman fungi mikoriza arbuskula (FMA) pada tingkat genus, serta menganalisis penyebaran, kelimpahan, dan tingkat kolonisasi FMA pada beberapa tipe habitat (ekosistem) di TNGHS, yaitu hutan alam zona inti (ZI) serta hutan terdegradasi di zona rehabilitasi yang direhabilitasi dengan reforestasi (ZRR) dan agroforestri (ZRA).

METODE PENELITIAN

Waktu dan Tempat

Penelitian ini dilaksanakan pada bulan Juli – November 2023. Pengambilan sampel tanah dan akar dilakukan di tegakan hutan zona inti (ZI), zona rehabilitasi (ZRR) dan lahan agroforestri (ZRA), TNGHS. Pengamatan sampel penelitian dilakukan di Laboratorium Teknologi Mikoriza dan Laboratorium Pengaruh Hutan Fakultas Kehutanan dan Lingkungan, Institut Pertanian Bogor.

Alat dan Bahan

Alat yang digunakan dalam penelitian, yaitu *global positioning system* (GPS), pita ukur, sekop, plastik, kertas label, tali rafia, gelas ukur, pinset, gunting, cawan petri, kertas saring, saringan bertingkat (500 μ m, 125 μ m, dan 63 μ m), sentrifuse Gemmy PLC 03, neraca analitik, *object glass*, mikroskop stereo dan mikroskop binokuler, serta alat tulis. Adapun bahan yang digunakan Dalam studi ini, yaitu tegakan hutan pada ekosistem ZI, ZRR, dan ZA di TNGHS, sampel tanah dan akar, alkohol 70%, akuades, KOH 20%, HCl 0.2%, *trypan blue*, larutan *destaining*, larutan glukosa 60%, larutan *Melzer*, dan *polyvinyl alcohol lactoglycerol* (PVLG).

Prosedur Kerja

Pengambilan data

Data yang dikumpulkan dalam studi ini terdiri dari data primer (data klimatis, data edafis, keragaman spora, kepadatan spora dan persen kolonisasi akar) serta data sekunder (peta kawasan TNGHS dan studi literatur untuk mendukung data primer serta identifikasi jenis FMA dan ektomikoriza).

Pengambilan sampel tanah dan akar

Pengambilan sampel tanah dan akar dilakukan di dalam plot pengamatan. Plot pengamatan yang digunakan berupa plot tunggal berukuran 50 x 50 m sebanyak 5 plot yang dibangun dan ditempatkan secara acak pada setiap lokasi penelitian (ZI, ZRR, dan ZRA). Tiga unit subplot masing-masing berukuran 5 x 5 m diletakkan di dalam plot utama secara sistematis (Gambar 1). Sampel tanah diambil pada 5 titik di dalam subplot dengan jarak minimal 1 m. Selain itu, diambil juga sampel tanah dan akar pada 4 titik di sekitar tegakan dengan kedalaman 0 – 20 cm menggunakan bor tanah. Sampel tanah dikompositkan dan disimpan dalam plastik *ziplock*, sedangkan sampel akar disimpan dalam plastik berisi alkohol 70%.

Perhitungan spora dan identifikasi genus FMA

Spora FMA diisolasi dengan teknik penyaringan basah dan metode sentrifugasi gradien sukrosa (Budi dan Dewi 2016). Sebanyak 20 g sampel tanah dilarutkan dengan 500 mL air, selanjutnya disaring dengan saringan bertingkat (500 μ m, 124 μ m dan 63 μ m) di bawah air mengalir. Endapan tanah pada dua saringan terbawah (124 μ m dan 63 μ m) diambil dan dimasukkan ke dalam tabung sentrifuse, lalu ditambahkan larutan gula 60% dengan perbandingan air endapan dan larutan gula yaitu 1 : 3. Setelah itu, tabung sentrifuse berisi air endapan

tanah dan larutan gula 60% tersebut di sentrifugasi dengan kecepatan 3000 rpm selama 5 menit. Suspensi jernih dalam tabung reaksi kemudian dituang ke dalam kertas saring dan diletakan di dalam cawan petri. Spora FMA lalu diidentifikasi secara deskriptif berdasarkan morfologi spora.

Kuantifikasi kolonisasi FMA

Pengamatan kolonisasi FMA dilakukan dengan menggunakan metode Clapp *et al.* (1996). Akar tumbuhan / tanaman yang sudah dibersihkan lalu direndam dengan larutan KOH 20% sampai akar berwarna putih. Akar tersebut lalu dicuci secara hati-hati agar akar tidak rusak, kemudian direndam dalam larutan HCl 2% selama 24 jam. Setelah itu dilakukan pewarnaan menggunakan larutan *trypan blue*. Kelebihan pewarna *trypan blue* dihilangkan dengan larutan destaining. Kolonisasi akar FMA lalu diklasifikasikan ke dalam 4 kategori, yaitu 0 (tidak ada kolonisasi), < 10% (kolonisasi rendah), < 30% (kolonisasi sedang) dan > 30% (kolonisasi tinggi). Adapun persentase kolonisasi mikoriza pada akar dihitung menggunakan persamaan berikut ini (O'Connor *et al.* 2001):

$$\% \text{ kolonisasi} = \frac{\sum \text{akar bermikoriza}}{\sum \text{akar yang diamati}} \times 100\%$$

Analisis Data

Uji ANOVA menggunakan perangkat R-Studio dilakukan untuk mengetahui signifikansi perbedaan kepadatan spora FMA dan kolonisasi akar oleh FMA. Parameter lain yakni keragaman genus FMA dan jenis ektomikoriza, frekuensi spora, serta kelimpahan relatif genus FMA dianalisis secara deskriptif. Adapun parameter keberadaan dan keanekaragaman spora mikoriza dihitung dengan persamaan-persamaan berikut ini (Shi *et al.* 2007):

$$KP \text{ (spora/g)} = \frac{\sum \text{spora}}{\text{Berat tanah (20 g)}}$$

$$KS = \sum \text{genus spora yang ditemukan}$$

$$FR (\%) = \frac{\sum \text{sampel ditemukan genus}}{\sum \text{total sampel}} \times 100\%$$

$$KR (\%) = \frac{\sum \text{spora suatu genus}}{\sum \text{total spora}} \times 100\%$$

Keterangan:

KP = kepadatan spora (spora/g tanah)

KS = keragaman spora

FR = frekuensi relatif (%)

KR = kelimpahan relatif (%)

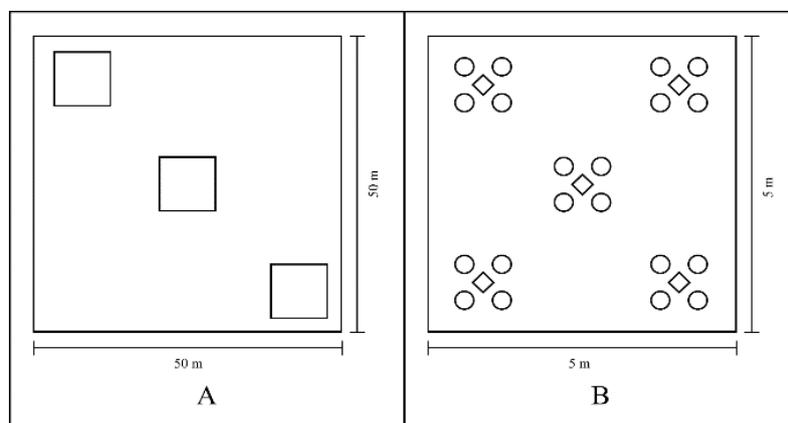
HASIL DAN PEMBAHASAN

Karakteristik Lingkungan

Faktor lingkungan yang sangat mempengaruhi keberadaan fungi mikoriza adalah kondisi tanah, diantaranya sifat kimia tanah. Parameter sifat kimia tanah yang dianalisis dalam studi ini antara lain pH tanah, P-tersedia, P-potensial, C-organik, dan N-total. Selain itu, faktor lingkungan lainnya yang dapat berpengaruh terhadap aktivitas mikoriza, yaitu intensitas cahaya (Smith dan Read 2008).

Tabel 1 menyajikan hasil analisis kimia tanah dan pengukuran tingkat intensitas cahaya pada ketiga lokasi penelitian di TNGHS. pH tanah terendah ditunjukkan oleh sampel tanah yang berasal dari ekosistem hutan alam di zona inti (ZI), yaitu 5.40. Adapun sampel tanah dari ekosistem zona rehabilitasi dengan reforestasi (ZRR) dan agroforestri (ZRA) masing-masing memiliki nilai pH sebesar 5.88 dan 6.29. Hardjowigeno (2010) mengklasifikasikan tanah-tanah dengan pH berkisar antara 4.5 – 5.5 ke dalam tanah masam, sedangkan tanah dengan pH antara 5.6 – 6.5 termasuk ke dalam tanah agak masam. Secara umum, rendahnya pH tanah pada ketiga lokasi penelitian di TNGHS, diduga dipengaruhi oleh beberapa faktor, seperti proses pelapukan tanah yang sudah lanjut, proses pencucian hara (*leaching*), dan proses aliran air permukaan (*run off*) dengan curah hujan yang relatif sangat tinggi.

Lokasi ZI memiliki kandungan C-organik dan N-total yang relatif lebih tinggi dibandingkan dengan dua lokasi lainnya. Hal tersebut diduga disebabkan oleh kondisi kerapatan vegetasi yang relatif lebih tinggi di zona inti, sehingga sumber bahan organik yang berasal dari biomassa tumbuhan dan serasah juga menjadi lebih

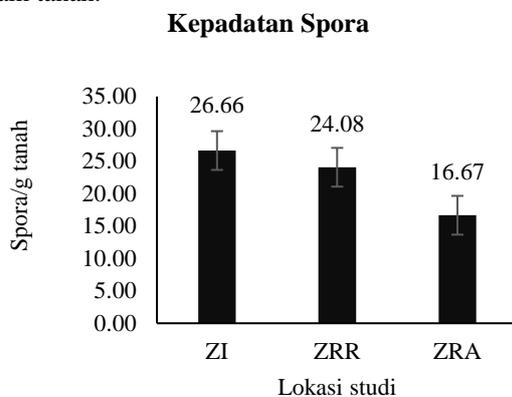


Gambar 1 Desain plot pengambilan sampel. A: plot 50 x 50 m dengan tiga unit subplot 5 x 5 m di dalamnya. B: titik pengambilan sampel di dalam subplot (◇) dan pengambilan sampel akar dan tanah komposit (○)

banyak. Mastur *et al.* (2015) menyatakan bahwa nitrogen memiliki peran yang sangat penting dalam pembentukan klorofil, organ daun, batang, akar dan berbagai macam enzim pada tumbuhan. Di sisi lain, rasio C/N tertinggi terdapat pada lokasi ZRA, sedangkan yang terendah terdapat pada lokasi ZRR. Purnomo *et al.* (2017) menyatakan bahwa rasio C/N yang relatif tinggi berpengaruh terhadap penurunan aktivitas biologi dari mikroorganismenya.

Selain itu, Isidra-Arellano *et al.* (2021) menyatakan bahwa fosfor (P) memiliki peran yang sangat penting dalam proses metabolisme dan fisiologis pada tumbuhan atau tanaman. Kandungan P-potensial pada ketiga lokasi penelitian relatif tidak jauh berbeda, yaitu berkisar antara 28.02 – 28.48 mg/100g. Adapun P-tersedia tertinggi ditemukan pada tanah di lokasi ZI (16.53), sedangkan P-tersedia terendah terdapat pada tanah di lokasi ZRA (< 1.79). Fosfor (P) merupakan unsur hara penting yang sangat dibutuhkan oleh tumbuhan. Akan tetapi keberadaan unsur P dalam bentuk tersedia pada tanah dapat menjadi faktor pembatas pertumbuhan bagi tumbuhan (tanaman). Adapun faktor-faktor yang dapat mempengaruhi ketersediaan unsur P di dalam tanah, diantaranya yaitu pH tanah, bahan organik tanah, bahan induk tanah, dan aktivitas mikroorganismenya (Bueis *et al.* 2019). Selain itu, unsur P di dalam tanah juga dapat dipengaruhi oleh faktor klimatis dalam suatu ekosistem (Deiss *et al.* 2018).

Lokasi ZI memiliki intensitas cahaya yang relatif paling rendah dibandingkan dengan kedua lokasi lainnya. Sementara itu, lokasi ZRA memiliki intensitas cahaya yang tertinggi. Hal ini mengindikasikan bahwa lokasi ZRA memiliki kerapatan vegetasi yang terendah, sedangkan lokasi ZI memiliki kerapatan vegetasi yang tertinggi. Kerapatan vegetasi mempengaruhi jumlah cahaya yang bisa masuk hingga ke lantai hutan, yang selanjutnya dapat menentukan kondisi iklim mikro di dalam suatu ekosistem. Gutiérrez-Salazar dan Medrano-Vizcaíno (2019) menyatakan bahwa faktor klimatis dapat menentukan proses dekomposisi di dalam suatu ekosistem. Sebagaimana diketahui bahwa proses dekomposisi merupakan proses biogeokimia yang sangat penting dalam pengembalian berbagai unsur hara ke dalam tanah.



Gambar 2 Kepadatan spora mikoriza pada zona inti (ZI), zona rehabilitasi dengan reforestasi (ZRR), dan zona rehabilitasi dengan agroforestri (ZRA)

Kepadatan spora merupakan jumlah total spora yang ditemukan pada suatu ekosistem dalam sampel tanah yang dianalisis. Kepadatan spora pada setiap lokasi penelitian di TNGHS disajikan pada Gambar 2.

Kepadatan spora di ketiga lokasi pengambilan sampel di TNGHS relatif sangat tinggi. Daniel dan Skipper (1982) menyatakan bahwa kepadatan spora tergolong tinggi jika ditemukan > 2000 spora dalam 100 g tanah atau 20 spora/g tanah. Kepadatan spora di lokasi ZI mencapai 26.66 spora/g, sedangkan di lokasi ZRR mencapai 24.08 spora/g tanah. Adapun kepadatan spora di lokasi ZRA kurang dari 20 spora/g, yaitu hanya sebesar 16.67 spora/g. Walaupun demikian, jumlah spora di lokasi ZRA relatif masih sangat tinggi untuk kawasan pertanian (budidaya). Sebagaimana diketahui, agroforestri merupakan kawasan yang dimanfaatkan dan dikelola dengan mengkombinasikan antara tanaman kehutanan (pohon) dan budidaya tanaman pertanian. Hasbi (2005) menyatakan bahwa kepadatan spora pada lahan untuk tanaman budidaya tergolong rendah, jika ditemukan hanya 1 – 6 spora dalam 50 g tanah.

Kepadatan spora dipengaruhi beberapa faktor, seperti pH tanah dan kandungan unsur hara tanah, khususnya unsur P di dalam tanah (Ismahan 1998; Hairiah *et al.* 2000; Prabowo 2018). Hasil pengamatan menunjukkan bahwa spora FMA lebih banyak ditemukan pada lokasi dengan pH yang relatif rendah. Hal ini diduga berkaitan dengan karakteristik fungi mikoriza itu sendiri yang merupakan organisme yang bersifat asidofilik (senang dengan kondisi masam), sehingga dapat berkembang dengan baik pada kondisi pH yang rendah. Di sisi lain, pembentukan spora juga dapat terjadi sebagai upaya preventif terhadap kondisi lingkungan yang kurang menguntungkan, disamping fungsinya sebagai alat reproduktif (Karepesina *et al.* 2021). Faktor lain yang mempengaruhi keberadaan spora yaitu musim, dimana spora akan lebih banyak ditemukan pada musim kemarau dibandingkan dengan musim penghujan (Silva *et al.* 2014).

Kepadatan spora diduga juga berkaitan erat dengan kandungan dengan C-organik tanah. Hal ini diindikasikan dengan kepadatan spora tertinggi yang ditemukan pada lokasi ZI dengan kandungan C-organik tanah sebesar 1.78%. Adapun kepadatan spora terendah ditemukan di lokasi ZRA yang memiliki kandungan C-organik hanya sebesar 1.17%. Hairiah *et al.* (2000) menyatakan bahwa kandungan C-organik pada tanah

Tabel 1 Sifat kimia tanah dan intensitas cahaya pada tiga lokasi penelitian

Parameter	Unit	Nilai		
		ZI	ZRR	ZRA
pH	-	5.40	5.88	6.29
C-org	%	1.78	1.18	1.17
N-total	%	0.84	0.73	0.39
C/N	-	2.12	1.67	3.00
P-tersedia	mg/100g	16.53	4.84	< 1.79
P-potensial	mg/100g	28.02	28.42	28.20
Intensitas cahaya	lux	865.38	1710.30	36760.60

Keterangan: ZI = zona inti, ZRR = zona rehabilitasi dengan reforestasi, dan ZRA = zona rehabilitasi dengan agroforestri.

dapat meningkatkan jumlah mikroorganisme tanah termasuk FMA, karena karbon merupakan sumber energi bagi mikroorganisme untuk menjalankan aktivitasnya.

Keragaman Spora

Keragaman genus mikoriza dapat dipengaruhi oleh perbedaan ekosistem dan keragaman jenis vegetasi di suatu lokasi. Barea *et al.* (2005) menjelaskan bahwa pada umumnya terdapat lebih dari satu spesies mikoriza dalam tanah. Tabel 2 menyajikan keragaman spora FMA yang ditemukan di lokasi penelitian di TNGHS.

Berdasarkan hasil studi, diketahui bahwa genus spora yang ditemukan pada ketiga lokasi penelitian di TNGHS relatif sama. Hal ini diduga disebabkan oleh lokasi tiap ekosistem (ZI, ZRR, dan ZRA) untuk pengambilan sampel tanah dan akar yang relatif dekat. Selain itu, banyaknya jumlah genus yang ditemukan juga mengindikasikan kondisi tanah pada ketiga lokasi pengambilan sampel masih relatif baik dan mendukung dari keberadaan fungsi mikoriza. Hal ini sesuai dengan (Zhao *et al.* 2017) yang menyatakan bahwa keragaman spora FMA akan semakin berkurang dengan tingginya tingkat gangguan lahan. Adapun karakter morfologi dari setiap genus FMA disajikan pada Gambar 3.

Genus Acaulospora

Genus Acaulospora memiliki spora berbentuk bulat sampai lonjong dengan ukuran yang bervariasi. Warna spora yang ditemukan pada genus ini yaitu coklat, merah, dan kuning dengan ukuran spora antara 100 – 200 µm. Acaulospora memiliki dinding spora terluar yang tebal, sedangkan dinding spora bagian dalam tipis. Acaulospora dapat dikenali dengan adanya cycatric dan ornamen pada dinding spora. Morfologi spora genus Acaulospora ditunjukkan pada Gambar 3 (A – C).

Genus Dentiscutata

Genus Dentiscutata memiliki bentuk bulat dengan warna hialin. Dinding spora bagian luar seperti bergerigi. Genus ini memiliki dua lapis dinding spora dan memiliki ukuran spora bervariasi. Genus Dentiscutata tidak bereaksi dengan larutan Melzer. Morfologi spora genus Dentiscutata ditunjukkan pada Gambar 3 (D – E).

Genus Diversispora

Genus Diversispora dicirikan dengan adanya permukaan seperti berlipat-lipat. Blaszkowski *et al.* (2015) melaporkan bahwa spora Diversispora memiliki dua lapisan yang berwarna hialin hingga kuning dan tidak bereaksi dengan larutan melzer. Morfologi spora genus Diversispora ditunjukkan pada Gambar 3 (F).

Genus Entrophospora

Genus Enterospora memiliki spora yang berbentuk bulat dan berwarna cenderung coklat hingga kecoklatan. Genus ini memiliki 2 – 3 dinding spora, dimana dinding terluar terlihat lebih gelap. Ciri khas dari genus ini adalah sporanya berkembang dari tengah-tengah *sporifereous saccule* dan meninggalkan bekas berupa cycatric. Morfologi spora genus Enterospora ditunjukkan pada Gambar 3 (G).

Genus Gigaspora

Genus Gigaspora dapat dikenali berdasarkan ukuran spora yang cukup besar jika dibandingkan dengan genus

Tabel 1 Keragaman spora FMA di lokasi penelitian

Lokasi	Σ genus	Genus FMA
ZI	8	Aca, Ent, Den, Div, Gig, Glo, Scl, Scu
ZRR	8	Aca, Ent, Den, Div, Gig, Glo, Scl, Scu
ZRA	8	Aca, Ent, Den, Div, Gig, Glo, Scl, Scu

Keterangan: Aca = Acaulospora, Ent = Entrophospora, Den = Dentiscutata, Div = Diversispora, Gig = Gigaspora, Glo = Glomus, Scl = Sclerocystis, Scu = Scutellospora.



Gambar 3 Morfologi spora mikoriza dengan perbesaran 40x. Acaulospora (A-C), Dentiscutata (D-E), Diversispora (F), Entrophospora (G), Gigaspora (H), Glomus (I-L), Scutellospora (M-N), Sclerocystis (O), *spore wall* (sw), ornamen spora (os), *bulbous suspensor* (bs), *substanding hyphae* (sh), *inner wall* (iw), *germination shield* (gs)

lainnya. Genus ini memiliki bentuk spora bulat sampai lonjong dengan warna kuning sampai merah. Gigaspora juga dicirikan dengan adanya *bulbous suspensor* dan memiliki dua lapis dinding. Morfologi spora genus Gigaspora ditunjukkan pada Gambar 3 (H).

Genus Glomus

Glomus merupakan genus yang memiliki jumlah spesies terbanyak dibandingkan dengan genus FMA lainnya. Genus ini berbentuk globos – sub globos, ovoid dan obovoid, berwarna kuning, merah kecoklatan, coklat, dan hitam, serta memiliki lapisan dinding antara 1 – 2 (INVAM 2024). Spora dari genus Glomus terbentuk dari pembengkakan ujung hifa sehingga seringkali masih memiliki dudukan hifa (*substanding hyphae*). Morfologi spora genus Glomus ditunjukkan pada Gambar 3 (I – L).

Genus Scutellospora

Genus Scutellospora termasuk ke dalam famili Gigasporaceae. Genus ini dapat dikenali dengan adanya *bulbous suspensor* dan *germination shield*. Spora dari genus Scutellospora berukuran antara 100 – 250 µm. Genus ini memiliki spora berwarna merah kecoklatan dan dapat bereaksi secara menyeluruh dengan larutan

Melzer. Morfologi spora genus Scutellospora ditunjukkan pada Gambar 3 (M – N).

Genus Sclerocystis

Genus Sclerocystis termasuk ke dalam famili Glomaceae. Spora dari genus Sclerocystis berkembang dalam *sporocarp* (tandan spora). Genus ini memiliki lapisan dinding spora yang menggerombol. Morfologi spora genus Sclerocystis ditunjukkan pada Gambar 3 (O).

Kelimpahan dan Frekuensi Relatif

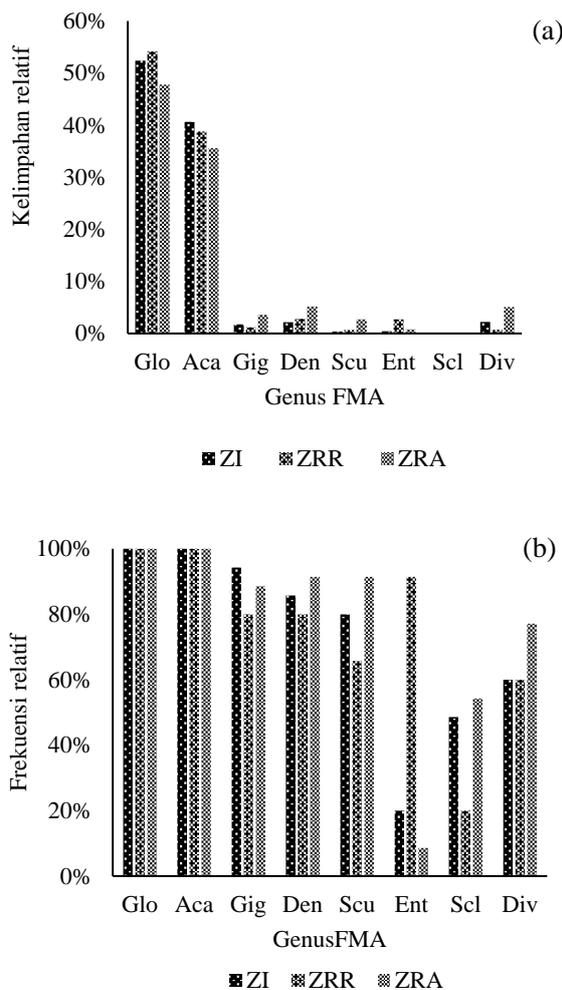
Frekuensi relatif merupakan parameter yang menunjukkan pola penyebaran relatif dari suatu genus FMA, sedangkan kelimpahan relatif menggambarkan banyaknya spora dari suatu genus FMA yang terdapat pada suatu lokasi atau ekosistem. Nilai kelimpahan dan frekuensi relatif dari genus FMA pada ketiga lokasi penelitian di TNGHS disajikan pada Gambar 4.

Genus Glomus dan Acaulospora ditemukan pada setiap sampel di ketiga lokasi pengambilan sampel dengan frekuensi relatif mencapai 100%. Kelimpahan spora Glomus tertinggi ditemukan di lokasi ZRR (54.16%), sedangkan kelimpahan spora Glomus terendah terdapat pada lokasi ZRA (47.80%). Adapun kelimpahan spora Acaulospora tertinggi terdapat pada lokasi ZI (40.65%), sedangkan yang terendah terdapat pada lokasi ZRA (35.56%).

Tingginya nilai kelimpahan dan frekuensi relatif dari Glomus dan Acaulospora menunjukkan bahwa kedua genus tersebut memiliki penyebaran yang relatif luas. Hasil penelitian Silva *et al.* (2014) menunjukkan bahwa genus Glomus dan Acaulospora ditemukan dominan pada lahan semi-kering. Tingginya kelimpahan dan frekuensi relatif Glomus dan Acaulospora juga disebabkan genus tersebut memiliki ukuran spora yang kecil dan bersifat sporogenous yang dapat memproduksi spora dalam waktu yang singkat dibandingkan genus dengan ukuran spora yang besar seperti Gigaspora dan Scutellospora (Sarkar *et al.* 2014).

Genus Gigaspora, Dentiscutata dan Scutellospora memiliki frekuensi relatif yang cukup tinggi di ketiga lokasi pengambilan sampel (Gambar 4). Kelimpahan relatif genus Gigaspora, Dentiscutata dan Scutellospora tertinggi terdapat pada lokasi ZRA. Ketiga genus tersebut termasuk ke dalam famili Gigasporaceae yang memiliki ukuran spora yang besar. Menurut Puspitasari *et al.* (2012), spora Gigaspora banyak ditemukan pada lokasi dengan tekstur tanah yang berpasir. Lokasi ZRA memiliki tanah dengan tekstur berpasir yang memiliki pori-pori yang lebih besar dibandingkan dengan tekstur liat. Hal tersebut diduga menyebabkan spora dengan ukuran yang besar lebih akan banyak ditemukan di lokasi ZRA.

Entrophospora memiliki frekuensi relatif yang relatif rendah di lokasi ZI dan ZRA masing-masing sebesar 20% dan 8.6%. Akan tetapi, frekuensi relatif genus ini menunjukkan angka yang relatif tinggi (91.4%) di lokasi ZRR. Siverding dan Oehl (2006) menyebutkan bahwa Entrophospora dapat ditemukan pada tanah dengan pH masam hingga netral (pH 3.5 – 6.7). Genus Sclerocystis memiliki frekuensi dan kelimpahan relatif yang rendah diduga disebabkan oleh jumlah spesies yang



Gambar 4 Kelimpahan dan frekuensi relatif genus FMA pada ketiga lokasi penelitian. (a). Kelimpahan relatif dan (b). Frekuensi relative

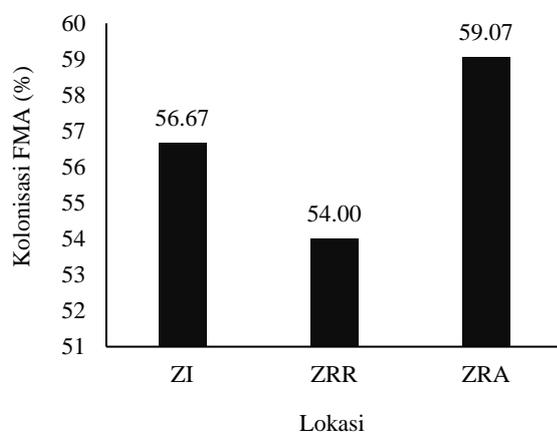
relatif sedikit dari genus ini. Frekuensi relatif dari genus *Diversispora* yang tertinggi terdapat pada lokasi ZRA, yaitu sebesar 77.1%, dan dengan kelimpahan sebesar 5.05%. Hal ini sejalan dengan penelitian Bahadur *et al.* (2019) yang menemukan genus *Diversispora* dengan frekuensi yang tinggi terdapat pada ekosistem pertanian.

Kolonisasi Akar

Kolonisasi FMA pada akar ditandai dengan adanya struktur seperti vesikula dan/atau arbuskula serta hifa eksternal. Struktur kolonisasi yang terlihat berupa apesorium, hifa internal dan eksternal, kumparan hifa (*hyphal coils*), vesikula, spora dan arbuskula. Gambar 5 menyajikan bentuk-bentuk dari struktur kolonisasi FMA dalam akar.

Hifa eksternal merupakan struktur yang berperan dalam proses penyerapan unsur hara, perbanyakan asosiasi dan pembentukan spora (Brundrett *et al.* 1996). Hifa interseluler merupakan hifa yang tumbuh melewati sela-sela sel korteks akar, sedangkan hifa intraseluler merupakan hifa yang tumbuh menembus sel korteks akar. Smith dan Read (2008) menjelaskan bahwa akar yang hanya memiliki hifa interseluler saja termasuk ke dalam kolonisasi tipe arum, sedangkan akar yang hanya ditemukan hifa intraseluler merupakan kolonisasi tipe paris. Selain itu, terdapat tipe kolonisasi intermediet yang memiliki struktur hifa interseluler dan intraseluler dalam satu akar yang sama.

Struktur arbuskula terbentuk pada sel korteks bagian dalam dari percabangan hifa internal yang menembus sel. Struktur arbuskula hanya ditemukan pada beberapa sampel akar. Hal ini disebabkan oleh singkatnya waktu hidup yang dimiliki arbuskula. Kobae dan Hata (2010) menyebutkan bahwa struktur arbuskula dapat bertahan selama 2 – 8 hari. Hasil pengamatan menunjukkan bahwa struktur berupa kumparan hifa (*hyphal coils*) yang terbentuk di dalam sel dijumpai pada beberapa akar yang tidak ditemukan adanya struktur arbuskula. Kumparan hifa merupakan hifa yang tumbuh dan melingkar antara 1 – 5 kumparan di dalam sel (Putra *et al.* 2023).



Gambar 6 Tingkat kolonisasi akar oleh FMA pada zona inti (ZI), zona rehabilitasi dengan reforestasi (ZRR), dan zona rehabilitasi dengan agroforestry (ZRA)

Tingkat kolonisasi akar pada ketiga lokasi penelitian di TNGHS menunjukkan nilai yang berbeda. Selain faktor kesesuaian tumbuhan atau tanaman inang, tingkat kolonisasi akar juga dipengaruhi oleh sifat kima tanah pada suatu lokasi. Gambar 6 menyajikan tingkat kolonisasi akar oleh FMA pada ketiga lokasi penelitian di TNGHS.

Hasil analisis tingkat kolonisasi FMA pada akar menunjukkan bahwa kolonisasi akar tertinggi terdapat di lokasi ZRA, yaitu sebesar 59.07%. Adapun kolonisasi FMA yang terkecil ditemukan terjadi pada lokasi ZRR, yaitu sebesar 54%. Uji ANOVA menunjukkan tingkat kolonisasi akar oleh FMA pada ketiga lokasi tidak berbeda secara signifikan.

Hubungan antara tingkat kolonisasi akar dan kadar P-tersedia dalam tanah, menunjukkan korelasi yang negatif ($R = -0.182$). Hal ini mengindikasikan bahwa kadar P-tersedia dalam tanah yang rendah akan meningkatkan kolonisasi mikoriza pada akar. Fakta ini sejalan dengan hasil studi dari Liu *et al.* (2020) yang menjelaskan bahwa tingkat kolonisasi FMA tertinggi didapatkan pada perlakuan penambahan 30 mg/kg P dibandingkan dengan penambahan 100 mg/kg P. Pada tanah yang memiliki konsentrasi P yang tinggi, peran FMA untuk meningkatkan penyerapan P menjadi tidak efektif, karena tanaman dapat menyerap unsur hara P dari tanah secara langsung. Sebaliknya, pada konsentrasi P yang rendah akar tanaman tidak dapat menyerap P dengan baik, sehingga tanaman akan mengalokasikan karbohidrat untuk pertumbuhan hifa karena kebutuhan karbohidrat pada hifa lebih rendah dibandingkan pertumbuhan akar (Smith dan Read 2008).

Faktor lain yang secara tidak langsung mempengaruhi kolonisasi FMA, yaitu pH tanah dan intensitas cahaya. Pada pH yang rendah, P akan berikatan dengan Al sehingga tidak dapat diserap oleh tanaman. Pada kondisi tersebut, tanaman akan merespon dengan mengeluarkan eksudat akar dalam rangka merangsang kolonisasi FMA untuk membantu penyerapan P (Smith dan Read 2008). Meskipun demikian, lokasi ZRA yang memiliki pH tanah sebesar 6.29 mempunyai tingkat kolonisasi akar tertinggi. Hal ini diduga disebabkan oleh kadar P-tersedia yang rendah (< 1.79 mg/100g). Di sisi lain, intensitas cahaya juga berpengaruh terhadap laju fotosintesis. Pada kondisi cahaya yang tinggi, tanaman mampu memproduksi eksudat akar yang cukup untuk merangsang kolonisasi FMA, sehingga antara intensitas cahaya dan kolonisasi memiliki korelasi yang positif. Lokasi ZRA memiliki kolonisasi FMA tertinggi (59.07%) dengan intensitas cahaya sebesar 36760.60 lux.

Ketiga lokasi penelitian di TNGHS memiliki komposisi jenis vegetasi yang berbeda dimana dipengaruhi oleh perbedaan kondisi lingkungan. Pada lokasi ZI, ki riung anak (*Castanopsis acuminatissima*) merupakan jenis tumbuhan yang mendominasi dengan tingkat kolonisasi akar sebesar 62.00%. Adapun *Agathis dammara* merupakan jenis tumbuhan yang mendominasi di lokasi ZRA dengan tingkat kolonisasi dalam kategori tinggi yaitu 68.70%. Di sisi lain, *Altingia excelsa* merupakan jenis tumbuhan dominan pada lokasi ZRR dengan tingkat kolonisasi akar sebesar 83.75%. Fakta ini mengindikasikan jika kolonisasi FMA juga dipengaruhi oleh jenis tanaman inang.

SIMPULAN DAN SARAN

Simpulan

Studi ini menemukan sebanyak 8 genus FMA yang terdapat pada ketiga lokasi pengamatan di TNGHS (ZI, ZRR, dan ZRA). Kedelapan genus tersebut, terdiri dari Acaulospora, Entrophospora, Dentiscutata, Diversispora, Gigaspora, Glomus, Sclerocystis dan Scutellospora. Genus Glomus dan Acaulospora merupakan jenis yang paling dominan dengan frekuensi relatif sebesar 100% pada ketiga lokasi. Glomus memiliki kelimpahan relatif yang tertinggi pada ketiga lokasi masing-masing yaitu ZI sebesar 52.38%, ZRR sebesar 54.16% dan ZRA sebesar 47.80%. Kepadatan spora tertinggi terdapat pada ZI (26.66 spora/g tanah) sedangkan kepadatan spora terendah terdapat pada ZRA (16.67 spora/g tanah). ZRA memiliki tingkat kolonisasi FMA tertinggi yaitu 59.07%, sedangkan tingkat kolonisasi terendah terdapat pada ZRR sebesar 54%.

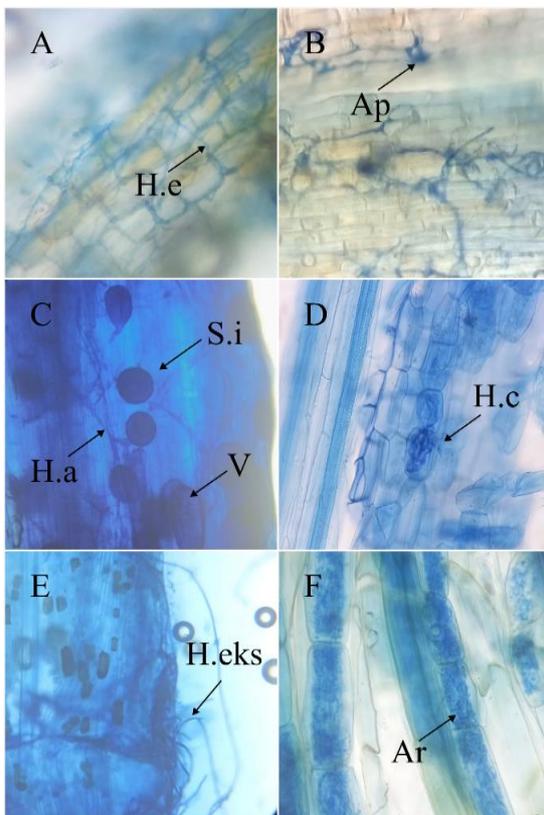
Saran

Perlu dilakukan penelitian lebih lanjut mengenai genus FMA berdasarkan klasifikasi yang terbaru. Selain itu, penelitian lebih lanjut mengenai kolonisasi FMA di TNGHS juga perlu dilakukan khususnya dalam rangka

menganalisis jenis FMA yang berasosiasi terutama dengan jenis tumbuhan yang dominan. Faktor klimatis seperti suhu tanah, suhu udara dan kelembaban lingkungan juga perlu dikaji untuk mengetahui pengaruh faktor-faktor tersebut terhadap keberadaan mikoriza di TNGHS.

DAFTAR PUSTAKA

- Alamsyah F, Husin EF. 2010. Keanekaragaman fungi ektomikoriza di rizosfer tanaman meranti (*Shorea* sp.) di Sumatera Barat. *Biospectrum* 6(3):155-160.
- Bahadur A, Jin Z, Jiang S, Chai Y, Zhang Q, Pan J, Liu Y, Feng H. 2019. Arbuscular mycorrhizal spores distribution across different ecosystems of the qinghai tibetan plateau. *Pak. J. Bot.* 51(4): 1481-1492.
- Bahram M, Pölme S, Kõljalg U, Tedersoo L. 2010. A single European aspen (*Populus tremula*) tree individual may potentially harbour dozens of *Cenococcum geophilum* ITS genotypes and hundreds of species of ectomycorrhizal fungi. *FEMS Microbiol Ecol.* 75(2011):313-320.
- Barea JM, Pozo MJ, Azcón R, Azcón-Aguilar C. 2005. Microbial co-operation in the rhizosphere. *J. Exp. Bot.* 56(1): 1761-1778.
- Basri AHH. 2018. Kajian peranan mikoriza dalam bidang pertanian. *Agrica Ekstensi* 12(2):74-78.
- Blaszkowski J, Chwat G, Góralaska A, Ryszka P, Kovács GM. 2015. Two new genera, *Dominikia* and *Kamienskia*, and *D. disticha* sp. nov. in Glomeromycota. *Nova Hedwigia* 100 (2015): 225-238.
- Brundrett M, Bougher N, Dell B, Grove T, Malajczuk N. 1996. *Working With Mycorrhizas in Forestry and Agriculture*. Canberra: ACIAR.
- Budi SW, Dewi AP. 2016. Keanekaragaman fungi mikoriza arbuskula di bawah tanaman jabon (*Anthocephalus cadamba*) di Madiun, Jawa Timur. *Jurnal Silviculture Tropika* 7(3):146-152.
- Bueis T, Bravo F, Pando V, Kissi YA, Turrión MB. 2019. Phosphorus availability in relation to soil properties and forest productivity in *Pinus sylvestris* L. plantations. *Annals of Forest Science* 76(97): 1 – 13. doi.org/10.1007/s13595-019-0882-3
- Clapp JP, Fitter AH, Merryweather JM. 1996. *Arbuscular Mycorrhiza dalam Hall GS, Lassere P, hawkwsworth DL, (eds). Methods for the examination of 26 organismal diversity in soil and sediments*. Wallingford: CAB International.
- Daniels BA, Skipper HD. 1982. Methods for the recovery and quantitative estimation of propagules from soil, p. 29 - 34. Dalam: Schenk NC (Ed.). *Methods and Principles of Michorizal Research*. Minesota: Am Phytopath Society. p 29-34.
- Deiss L, de Moraes A, Maire V. 2018. Environmental drivers of soil phosphorus composition in natural ecosystems. *Biogeosciences* 15(2018): 4575–4592. doi.org/10.5194/bg-15-4575-2018
- Gutiérrez-Salazar P, Medrano-Vizcaíno P. 2019. The effects of climate change on decomposition



Gambar 1 Struktur kolonisasi FMA didalam akar dengan perbesaran 40x. Apresorium (Ap), arbuskula (Ar), *hyphal coils* (H.c), hifa intraseluler (H.a), hifa interseluler (H.e), hifa eksternal (H.eks), spora intraradikal (S.i) dan vesikula (V).

- processes in Andean Paramo ecosystem-synthesis, a systematic review. *Applied Ecology and Environmental Research* 17(2): 4957-4970. doi: x.doi.org/10.15666/aeer/1702_49574970
- Hairiah K, Widiyanto, Noordwijk, Cadish. 2000. *Pengelolaan Tanah Masam Secara Biologi*. Bogor (ID): ICRAF.
- Hardjowigeno S. 1995. *Ilmu Tanah*. Jakarta (ID): Akademika Pressindo.
- Hasbi R. 2005. Studi diversitas cendawan mikoriza arbuskula (CMA) pada berbagai tanaman budidaya di Lahan Gambut Pontianak. *Jurnal Agrosains* 1: 46-51.
- Isidra-Arellano MC, Delaux P, Valdés-Lopéz O. 2023. The phosphate starvation response system: its role in the regulation of plant-microbe interactions. *Plant and Cell Physiology* 63(3):392-400.
- Ismahan I. 1998. Studi keanekaragaman dan potensi inokulum fungi Glomalean pada beberapa tipe pemanfaatan lahan di Jambi [tesis]. Depok: Universitas Indonesia.
- Karepesina S, Djumat JL, Latuponu H. 2021. Produksi inokulum fungi mikoriza arbuskula dengan tiga tanaman indikator *Pueraria javanica*, *Sorghum vulgare* dan *Setaria italica*. *Jurnal Agrohuta* 12(1):31-37.
- Karmilasanti, Maharani R. 2016. Keanekaragaman jenis jamur ektomikoriza pada ekosistem hutan dipterocarpa di KHDTK Labanan, Berau, Kalimantan Timur. *Jurnal Penelitian Ekosistem Dipterocarpa* 2(2):57-66.
- Kobae Y, Hata S. 2010. Dynamics of periarbuscular membranes visualized with a fluorescent phosphate transporter in arbuscular mycorrhizal roots of rice. *Plant Cell Physiol.* 51(3):341-53. doi: 10.1093/pcp/pcq 013.
- Liu M, Zhao Z, Chen L, Chen L, Wang L, Ji L, Xiao Y. 2020. Influences of arbuscular mycorrhizae, phosphorus fertiliser and biochar on alfalfa growth, nutrient status and cadmium uptake. *Ecotox. Environ. Safe* 196, 110537. doi: 10.1016/j.ecoenv.2020.110537
- Nurhalimah S, Nurhatika S, Muhibuddin A. 2014. Eksplorasi mikoriza vesikular arbuskular (MVA) *indigenus* pada tanah regosol di Pemkasan, Madura. *Jurnal Sains dan Seni Pomits* 3(1):30-34.
- O'Connor PJ, Smith SE, Smith FA. 2001. Arbuscular mycorrhizal association in the southern Simpson Desert. *Aust J Bot.* 49:493-499.
- Prabowo BA. 2018. Keanekaragaman mikoriza di hutan alam sub pegunungan dan hutan tanaman pinus Kabupaten Ciamis Jawa Barat [skripsi]. Bogor: Institut Pertanian Bogor.
- Purnomo EA, Sutrisno E, Sumiyati S. 2017. Pengaruh variasi C/N rasio terhadap produksi kompos dan kandungan kalium (K), pospat (P) dari batang pisang dengan kombinasi kotoran sapi dalam sistem vermicomposting. *Jurnal Teknik Lingkungan* 6(2):1-15.
- Putra IP, Aimi T, Shimomura N. 2023. Hyphal coil morphology and its relationship to thromboplerous hyphae in Rhizopogon roseolus. *Mycologia* 115(2):216-224. doi: 10.1080/00275514.2022.2162799.
- Riniarti M, Mansur I, Wulandari AS, Kusmana C. 2010. Karakteristik akar berektomikoriza pada *Shorea pinanga*, *Pinus merkusii*, dan *Gnetum gnemon*. *Jurnal Parennial* 6(1):11-19.
- Sarkar U, Choudhary BK, Sharma BK. 2014. Vascular Arbuscular Mycorrhiza (VAM) spore diversity and density across the soil of degraded forest and rubber plantation in Tripura, India. *American-Eurasian J Agric & Environ Sci.* 14(10):1080-1088. doi:10.5829/idosi.ajeaes.2014.14.10.12432.
- Shi ZY, Zhang LY, Li XL, Feng G, Tian CY, Christie P. 2007. Diversity of arbuscular mycorrhizal fungi associated with desert ephemerals in plant communities of junggar basin, North West China. *Journal. Applied Soil Ecology.* (35): 10 – 20.
- Sieverding E, Oehl F. 2006. Revision of Entrophospora and description of Kuklospora and Intraspora, two new genera in the arbuscular mycorrhizal Glomeromycetes. *Journal of Applied Botany and Food Quality* 80:69–81.
- Silva IR, Mello CMA, Neto RAF, Silva DKA, Melo AL, Oehl F, Maia LC. 2014. Diversity of arbuscular mycorrhizal fungi along an environmental gradient in the Brazilian semiarid. *Applied Soil Ecology* 84:166- 175.
- Smith SE, Read D. 2008. *Mycorrhizal Symbiosis Third Edition*. New York: Academic Press.
- Sukmawaty E, Asriani A. 2015. Keragaman mikoriza aebuskula Indonesia dan peranannya dalam ekosistem. *Biotek.* 3(1):45-51. https://doi.org/10.24252/jb.v3i1.1901.
- Zhao H, Li X, Zhang Z, Zhao Y, Yang J, Zhu Y. 2017. Spesies diversity and drivers of arbuscular mycorrhizal fungal communities in a semi-arid mountain in China. *PeerJ*:e4155. doi:10.7717/peerj.415.