



APLIKASI MIKORIZA DAN *PLANT GROWTH-PROMOTING RHIZOBACTERIA* UNTUK MENINGKATKAN PERTUMBUHAN MORFOLOGI TANAMAN KOPI LIBERIKA

Elis Kartika¹, Lizawati Lizawati², Made Deviani Duaja³, Gusniwati Gusniwati⁴

^{1,2,3,4} Universitas Jambi, Jambi, Indonesia

Email penulis korespondensi: elisk63@unja.ac.id

Abstract

The development of Liberica coffee on Ultisol is a strategic alternative to support agricultural extensification and sustainability in Indonesia. However, the low fertility, acidic reaction, and limited nutrient availability of Ultisols constrain plant growth and productivity. Biological approaches such as mycorrhiza and Plant Growth-Promoting Rhizobacteria (PGPR) are potential solutions to improve nutrient uptake and enhance plant vigor. This study aimed to evaluate the interaction effects of mycorrhiza and PGPR on the morphological growth of Liberica coffee in Ultisol. The experiment was arranged in a factorial Randomized Block Design (RBD) with two factors: (1) mycorrhizal inoculation (with and without mycorrhiza), and (2) six levels of PGPR concentration (0, 30, 60, 90, 120, and 150 mL L⁻¹). One-year-old Liberica coffee seedlings produced through intraspecific grafting were used. Growth parameters observed included plant height, leaf number, stem diameter, branch number, leaf area, and mycorrhizal infection percentage. Data were analyzed using analysis of variance and Duncan's Multiple Range Test at the 5% level. The results indicated that mycorrhiza and PGPR acted synergistically to enhance morphological growth of Liberica coffee in Ultisol. The best morphological growth was obtained with mycorrhiza combined with 60 mL L⁻¹ PGPR, while in the absence of mycorrhiza, the highest morphological growth was achieved at 120 mL L⁻¹ PGPR.

Keywords: Biofertilizer, Liberica Coffee, Morphology, PGPR, Ultisol

PENDAHULUAN

Kopi Liberika (*Coffea liberica*) merupakan komoditas yang memiliki prospek besar untuk dikembangkan di Indonesia, khususnya di lahan-lahan marginal. Jenis kopi ini dikenal memiliki karakter morfologi dan fisiologi yang relatif lebih toleran terhadap kondisi lingkungan ekstrem dibandingkan jenis kopi lain, serta menawarkan cita rasa unik yang semakin diminati pasar domestik maupun global. Oleh karena itu, pengembangannya menjadi salah satu strategi potensial dalam memperluas kawasan perkebunan kopi berkelanjutan.

Salah satu lahan yang berpotensi digunakan untuk ekstensifikasi adalah ultisol, karena luas penyebarannya cukup besar di Indonesia. Akan tetapi, tanah ultisol memiliki keterbatasan utama berupa tingkat kesuburan yang rendah, reaksi masam, kapasitas tukar kation rendah, serta ketersediaan unsur hara yang terbatas (Prasetyo *et al.*, 2006). Kondisi tersebut berimplikasi pada terhambatnya pertumbuhan tanaman, termasuk kopi Liberika, sehingga diperlukan pendekatan inovatif untuk memperbaiki kualitas lahan sekaligus meningkatkan produktivitas tanaman.

Pendekatan berbasis agens hayati, seperti Fungi Mikoriza Arbuskula (FMA) dan Plant Growth-Promoting Rhizobacteria (PGPR), menjadi salah satu alternatif yang menjanjikan. Mikoriza terbukti mampu meningkatkan serapan hara esensial, terutama fosfor (Suparno *et al.*, 2015; Kartika *et al.*, 2016; Ashwin *et al.*, 2018; Kartika *et al.*, 2018; Kartika *et al.*, 2019; Gao *et al.*, 2020; Kartika *et al.*, 2021; Kartika *et al.*, 2022; Kartika *et al.*, 2024), memperbaiki struktur tanah (Smith & Smith, 2012), meningkatkan toleransi tanaman terhadap cekaman abiotik seperti kekeringan, salinitas, maupun logam berat (Emamverdian *et al.*, 2015; Santander *et al.*, 2017; Atakan *et al.*, 2018; Haque *et al.*, 2018; Evelin *et al.*, 2019; Gong *et al.*, 2019; Feng *et al.*, 2020; Diagne *et al.*, 2020; Tian *et al.*, 2023), serta mendukung ketahanan terhadap serangan organisme pengganggu (Ahammed *et al.*, 2020; Dowarah *et al.*, 2022;

Campo *et al.*, 2020; Deja-Sikora *et al.*, 2020). Sementara itu, PGPR berperan penting dalam meningkatkan pertumbuhan melalui mekanisme fiksasi nitrogen, pelarutan fosfat, produksi fitohormon, serta proteksi terhadap patogen tanah (Backer *et al.*, 2018; Choudhury *et al.*, 2022). Selain itu, PGPR juga dapat mendukung efisiensi penggunaan hara dan pengembangan sistem perakaran yang lebih sehat (Kunal *et al.*, 2023; Gu *et al.*, 2023; Gupta *et al.*, 2023).

Meski demikian, efektivitas PGPR sangat ditentukan oleh konsentrasi aplikasinya. Beberapa penelitian menunjukkan adanya hubungan dosis-respons, di mana konsentrasi terlalu rendah tidak efektif, sedangkan konsentrasi terlalu tinggi dapat mengganggu keseimbangan mikrobioma rizosfer (Sharma *et al.*, 2020; El-Sawah *et al.*, 2021). Simbolon *et al.* (2022) melaporkan bahwa pemberian PGPR 15 mL L⁻¹ memberikan hasil pertumbuhan terbaik pada sistem monokultur. Penelitian Kasifah *et al.* (2022) menunjukkan bahwa dosis 30 mL L⁻¹ merupakan konsentrasi paling efektif untuk pertumbuhan bibit kopi Arabika, ditandai dengan peningkatan tinggi tanaman, jumlah daun, bobot segar, dan bobot kering yang lebih tinggi dibandingkan dengan dosis 10 mL L⁻¹, 20 mL L⁻¹, maupun kontrol. Temuan ini menegaskan bahwa konsentrasi PGPR yang optimal mampu memacu pertumbuhan vegetatif tanaman secara signifikan. Di sisi lain, kombinasi mikoriza dan PGPR berpotensi memberikan efek sinergis, karena mikoriza memperluas jangkauan serapan akar, sementara PGPR meningkatkan bioavailabilitas hara di zona rizosfer (Asra *et al.*, 2024]. Hasil penelitian Aswad *et al.* (2023) juga menunjukkan bahwa kombinasi FMA dosis 20 g/tanaman dan PGPR 25 mL L⁻¹ mampu menghasilkan pertumbuhan dan hasil tanaman terbaik.

Hingga saat ini, kajian mengenai interaksi mikoriza dan PGPR pada kopi Liberika di lahan ultisol masih sangat terbatas. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan mengevaluasi pengaruh kombinasi keduanya terhadap pertumbuhan vegetatif, efisiensi pemanfaatan hara, dan adaptasi fisiologis tanaman kopi Liberika pada kondisi ultisol. Penelitian ini diharapkan dapat menghasilkan formulasi bio-input yang lebih aplikatif, efisien, serta mendukung pengembangan kopi Liberika di lahan marginal secara berkelanjutan.

METODE

Desain Penelitian

Percobaan ini menggunakan Rancangan Acak Kelompok faktorial dengan dua faktor perlakuan yaitu faktor perlakuan mikoriza yang terdiri dari 2 taraf yaitu :

m0 = tanpa inokulasi

m1 = diinokulasi mikoriza

Faktor kedua adalah perlakuan Plant Growth Promoting Rhizobacteria (PGPR), yang terdiri dari 6 taraf perlakuan, yaitu :

z0 = Tanpa PGPR

z1 = PGPR 30 mL L⁻¹

z2 = PGPR 60 mL L⁻¹

z3 = PGPR 90 mL L⁻¹

z4 = PGPR 120 mL L⁻¹

z5 = PGPR 150 mL L⁻¹

Percobaan dilakukan di Teaching and Research Farm Fakultas Pertanian Universitas Jambi, Desa Mendalo Indah, Kecamatan Jambi Luar Kota Kabupaten Muaro Jambi. Lokasi penelitian terletak pada ketinggian 35 mdpl dengan tipe tanah ultisol. Penelitian ini dilaksanakan selama kurang lebih 2 bulan, dari bulan Juli hingga Agustus 2025.

Target/Subjek Penelitian

Pada percobaan ini disusun 12 kombinasi perlakuan. Setiap kombinasi perlakuan diulang 3 kali, sehingga terdapat 36 satuan percobaan. Setiap satuan percobaan terdiri dari 4 tanaman, sehingga bibit yang diperlukan berjumlah 144 bibit. Tanaman sampel diambil sebanyak 2 tanaman pada setiap satuan percobaan, yang ditentukan secara acak.

Prosedur Penelitian

Tahapan penelitian dilakukan sebagai berikut :

Persiapan Lahan

Sebelum pelaksanaan penelitian, lahan dibersihkan dari gulma dan sisa-sisa tanaman untuk memastikan kebersihan area tanam. Permukaan tanah kemudian diratakan guna mempermudah proses penanaman kopi. Setelah pembersihan, dilakukan pembuatan lubang tanam berukuran 40 x 40 x 40 cm, dengan jarak tanam antar tanaman ditetapkan sebesar 3 × 3 meter.

Persiapan Bibit dan Inokulasi Mikoriza

Bibit yang digunakan dalam penelitian ini merupakan bibit kopi Liberika (*Coffea liberica*) berumur satu tahun, hasil perbanyakan melalui teknik sambung intraspesifik. Sebelum digunakan, bibit diseleksi dan dikelompokkan terlebih dahulu berdasarkan tinggi tanaman untuk memperoleh homogenitas pertumbuhan.

Inokulum mikoriza yang digunakan adalah isolat mikoriza indigenous yang berasal dari rizosfer tanaman kopi Liberika di lahan gambut Kabupaten Tanjung Jabung Barat, yang merupakan koleksi Kartika *et al.* (2017) Isolat yang digunakan dalam penelitian ini yaitu *Glomus* sp-1a dan *Glomus* sp-3c. Inokulum mikoriza diaplikasikan sebanyak 10 gram per polybag, ditempatkan di sekitar perakaran bibit, yang dilakukan tiga bulan sebelum penanaman di lapangan. Selama masa pembibitan, bibit dipelihara hingga mencapai umur satu tahun.

Penanaman Bibit Kopi Liberika

Penanaman bibit kopi Liberika di lahan ultisol dilakukan pada pagi hari untuk menghindari stres tanaman akibat suhu tinggi. Bibit beserta media tanam dikeluarkan dari polybag secara hati-hati agar tidak merusak sistem perakaran. Selanjutnya, bibit ditanam pada lubang tanam yang telah disiapkan sebelumnya. Bibit kopi Liberika dimasukkan ke dalam lubang tanam, kemudian ditimbun menggunakan tanah ultisol di sekitarnya hingga akar tertutup sempurna.

Pemberian PGPR dan Pupuk An-organik

Aplikasi PGPR dilakukan satu minggu setelah penanaman dan diulang setiap dua minggu sekali dengan konsentrasi sesuai dengan perlakuan yang ditetapkan. Sedangkan pemberian pupuk NPK Mutiara dilakukan satu minggu setelah tanam (1 MST) dengan metode ditugal sedalam 5 cm di area perakaran, tepat di bawah tajuk tanaman kopi. Dosis pupuk anorganik yang diberikan adalah 50% dari dosis anjuran.

Pemeliharaan Tanaman

Pemeliharaan tanaman meliputi kegiatan penyiraman, penyiangan gulma, serta pengendalian hama dan penyakit. Penyiraman dilakukan sesuai kondisi kelembaban tanah, apabila terjadi hujan penyiraman tidak diperlukan. Penyiangan dilakukan secara manual dengan interval satu minggu sekali, yaitu mencabut gulma di sekitar tanaman secara hati-hati agar tidak merusak perakaran. Pengendalian hama dan penyakit dilakukan secara berkala melalui pemeliharaan intensif, dan pada tingkat serangan ringan dapat dilakukan secara manual.

Instrumen dan Teknik Pengumpulan Data

Pengamatan

Peubah yang diamati dalam penelitian ini meliputi pertambahan tinggi tanaman, jumlah daun, diameter batang, jumlah cabang, tingkat infeksi mikoriza, serta serapan unsur hara N, P, dan K.

Pengamatan kolonisasi mikoriza pada akar tanaman contoh dilakukan dengan teknik pewarnaan akar (staining akar) yang mengacu pada metode yang dikembangkan oleh Kormanik dan Mc. Graw (1982), yaitu (1) Dipilih akar tanaman yang segar dan dibersihkan dengan mencucinya menggunakan air mengalir, (2) Disiapkan larutan KOH 10% untuk merendam contoh akar tersebut hingga akar menjadi jernih, (3) Selanjutnya membuang larutan KOH dan dilakukan pencucian contoh akar selama 5-10 menit dengan air mengalir, (4) Selama 30 menit contoh akar direndam dalam larutan HCl 5% dan setelah itu secara perlahan-lahan larutan HCl tersebut dibuang, (5) Merendam contoh akar di dalam larutan staining (Trypan blue 0.05 %) dan selama 10 menit contoh akar tersebut dipanaskan pada plat pemanas, (6) Selanjutnya adalah proses destaining yaitu proses membuang larutan Trypan blue dan menggantinya dengan larutan lacto glycerol. Setelah itu, dilakukan pengamatan terhadap contoh akar tersebut.

Persentase kolonisasi akar dihitung berdasarkan metode panjang slide (slide length) dari Giovannetti dan Mosse (1980) dengan cara mengambil potongan-potongan akar yang telah diwarnai secara acak dengan panjang ± 1 cm sebanyak 10 potongan akar dan disusun dalam preparat slide. Keberadaan hifa, vesikula, arbuskula atau salah satu dari ketiganya menunjukkan adanya kolonisasi akar

oleh mikoriza. Kolonisasi mikoriza diamati di bawah mikroskop dengan cara mengamati semua bidang pandang (field of view/fov) mikroskop, dengan memberi tanda (+) untuk yang terjadi kolonisasi dan tanda (-) untuk yang tidak terkolonisasi. Dalam satu potongan akar diamati 10 buah bidang pandang. Rumus yang digunakan untuk menghitung persentase kolonisasi akar oleh mikoriza sebagai berikut:

$$\% \text{ kolonisasi} = \frac{\Sigma \text{ field of view (+)}}{\Sigma \text{ field of view}} \times 100 \%$$

Teknik analisis data

Analisis data

Untuk mengetahui pengaruh perlakuan terhadap variabel yang diamati, data hasil pengamatan dianalisis secara statistik menggunakan analisis ragam (ANOVA), dan apabila terdapat perbedaan yang nyata, dilanjutkan dengan uji lanjut Duncan pada taraf signifikansi $\alpha = 5\%$.

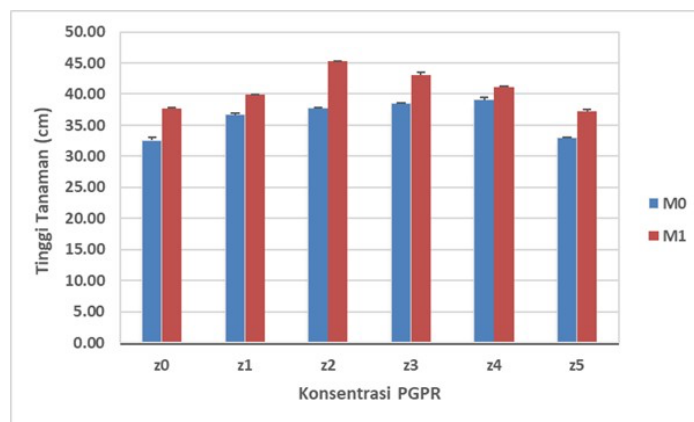
HASIL DAN PEMBAHASAN

Tinggi Tanaman Kopi

Tinggi tanaman kopi Liberika umur 8 minggu setelah tanam (MST) di lahan ultisol pada perlakuan mikoriza dan berbagai konsentrasi PGPR disajikan pada Gambar 1 dan 2. Berdasarkan Gambar 1 terlihat bahwa tanaman kopi liberika bermikoriza memiliki tinggi tanaman yang lebih tinggi dibandingkan tanaman tanpa mikoriza pada semua konsentrasi PGPR. Tanaman kopi Liberika bermikoriza tertinggi diperoleh pada konsentrasi PGPR 60 mL⁻¹. Peningkatan ini menunjukkan bahwa mikoriza berperan penting dalam memperbaiki serapan hara, khususnya fosfor (P) dan unsur hara makro lainnya yang ketersediaannya rendah di tanah Ultisol. Hifa eksternal mikoriza mampu memperluas daerah jelajah akar sehingga meningkatkan efisiensi penyerapan hara dan air, yang selanjutnya mendukung pembelahan serta pemanjangan sel pada jaringan tanaman, termasuk batang (Backer *et al.*, 2018; Begum *et al.*, 2019).

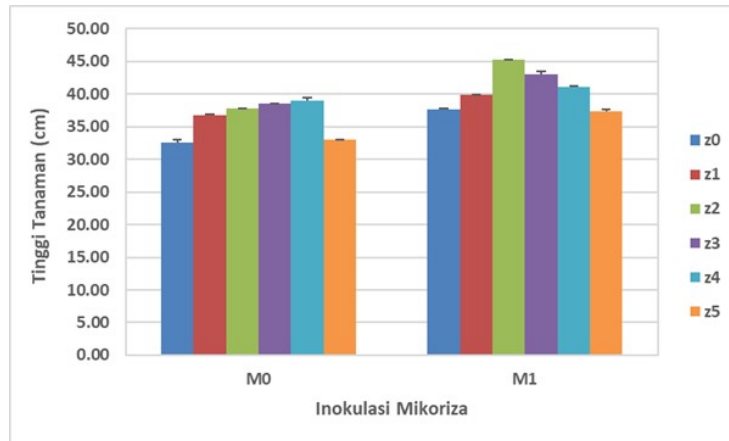
Tinggi tanaman kopi Liberika tertinggi diperoleh pada kombinasi mikoriza dengan PGPR pada konsentrasi 60 mL L⁻¹. Hal ini diduga karena adanya efek sinergis antara mikoriza dan PGPR dalam mendukung pertumbuhan vegetatif tanaman. PGPR diketahui mampu menghasilkan fitohormon seperti auksin, sitokinin, dan giberelin yang berperan dalam merangsang pertumbuhan tunas dan pemanjangan batang (Kumar *et al.*, 2019; Liu *et al.*, 2020).

Konsentrasi 60 mL L⁻¹ diduga merupakan dosis optimum, di mana keseimbangan antara populasi bakteri PGPR dan ketersediaan eksudat akar masih terjaga dengan baik. Pada konsentrasi ini, bakteri dapat berkolonisasi secara efektif di perakaran dan berinteraksi dengan mikoriza tanpa menimbulkan kompetisi yang berlebihan. Kondisi ini menghasilkan pertumbuhan tinggi tanaman yang maksimal. Sebaliknya, pada konsentrasi yang lebih tinggi, efektivitas kolonisasi PGPR mungkin menurun karena adanya kejenuhan atau kompetisi antar-mikroba, sehingga tidak memberikan peningkatan pertumbuhan yang signifikan (Olanrewaju *et al.*, 2017).



Keterangan : M0 = tanpa inokulasi mikoriza; M1 = Diinokulasi mikoriza; z0 = Tanpa PGPR; z1 = PGPR 10 mL L⁻¹; z2 = PGPR 20 mL L⁻¹; z3 = PGPR 30 mL L⁻¹; z4 = PGPR 40 mL L⁻¹; z5 = PGPR 50 mL L⁻¹;

Gambar 1. Tinggi tanaman kopi liberika umur 8 MST pada berbagai konsentrasi PGPR



Keterangan : M0 = tanpa inokulasi mikoriza; M1 = Diinokulasi mikoriza; z0 = Tanpa PGPR; z1 = PGPR 10 mL L⁻¹; z2 = PGPR 20 mL L⁻¹; z3 = PGPR 30 mL L⁻¹; z4 = PGPR 40 mL L⁻¹; z5 = PGPR 50 mL L⁻¹;
Gambar 2. Tinggi tanaman kopi liberika umur 8 MST pada perlakuan mikoriza

Gambar 2 menunjukkan bahwa pada tanaman kopi Liberika tanpa mikoriza, tinggi tanaman tertinggi diperoleh pada konsentrasi PGPR 120 mL L⁻¹, sedangkan pada tanaman yang diinokulasi mikoriza, tinggi tanaman tertinggi dicapai pada konsentrasi 60 mL L⁻¹. Hal ini mengindikasikan bahwa keberadaan mikoriza sangat menentukan efisiensi pemanfaatan PGPR. Tanaman tanpa mikoriza membutuhkan konsentrasi PGPR yang lebih tinggi untuk memacu pertumbuhan karena akar tidak mendapat bantuan hifa eksternal dalam memperluas penyerapan hara. Pada kondisi ini, PGPR berperan lebih dominan melalui mekanisme produksi fitohormon (auksin, sitokinin, giberelin) serta peningkatan ketersediaan hara nitrogen dan fosfor (Ruiz-Sánchez *et al.*, 2010; Kumar *et al.*, 2019). Dengan konsentrasi yang lebih tinggi (120 mL L⁻¹), populasi bakteri PGPR cukup besar untuk mengimbangi keterbatasan sistem perakaran tanaman tanpa mikoriza sehingga menghasilkan pertumbuhan tinggi yang lebih optimal.

Sebaliknya, pada tanaman yang diinokulasi mikoriza, tinggi tanaman tertinggi dicapai pada konsentrasi PGPR 60 mL L⁻¹. Hal ini menunjukkan adanya efek sinergis antara mikoriza dan PGPR. Mikoriza memperluas serapan hara melalui jaringan hifa, terutama fosfor yang menjadi faktor pembatas di tanah Ultisol (Backer *et al.*, 2018; Begum *et al.*, 2019). Sementara itu, PGPR mendukung pertumbuhan melalui produksi hormon pertumbuhan dan peningkatan ketersediaan nitrogen serta mineral lain. Kombinasi kedua mikroorganisme ini pada konsentrasi 60 mL L⁻¹ sudah cukup untuk menciptakan keseimbangan antara kolonisasi PGPR dan asosiasi mikoriza, sehingga memberikan respons pertumbuhan tanaman yang optimal (Smith & Read, 2008; Santoyo *et al.*, 2021).

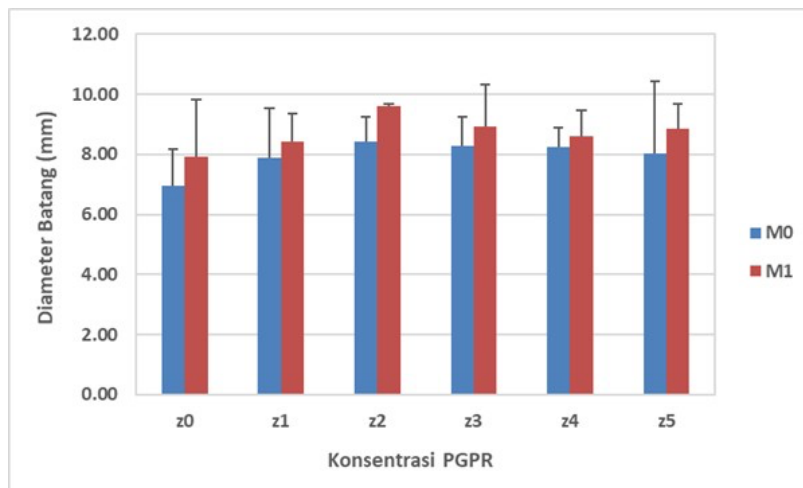
Apabila konsentrasi PGPR ditingkatkan melebihi dosis optimum, misalnya 120–150 mL L⁻¹, efektivitas sinergi dengan mikoriza justru dapat menurun karena terjadi kompetisi antar-mikroba dalam memanfaatkan eksudat akar (Olanrewaju *et al.*, 2017). Oleh karena itu, kombinasi mikoriza dan PGPR pada konsentrasi 60 mL L⁻¹ merupakan dosis yang paling efisien dalam mendukung pertumbuhan tinggi tanaman kopi Liberika pada lahan Ultisol.

Diameter Batang Tanaman Kopi Liberika

Diameter batang tanaman kopi Liberika umur 8 minggu setelah tanam (MST) di lahan ultisol pada perlakuan mikoriza dan berbagai konsentrasi PGPR disajikan pada Gambar 3 dan 4. Berdasarkan Gambar 3 terlihat bahwa tanaman kopi liberika bermikoriza memiliki diameter batang tanaman yang lebih tinggi dibandingkan tanaman tanpa mikoriza pada semua konsentrasi PGPR. Diameter batang tanaman kopi Liberika bermikoriza tertinggi diperoleh pada konsentrasi PGPR 60 mL L⁻¹. Peningkatan diameter batang ini menunjukkan bahwa mikoriza berperan penting dalam memperbaiki status nutrisi tanaman melalui perluasan daerah serapan akar. Hifa eksternal mikoriza mampu meningkatkan ketersediaan fosfor, nitrogen, dan unsur hara mikro yang sangat terbatas di tanah Ultisol, sehingga mendukung pembelahan dan pembesaran sel pada jaringan batang (Backer *et al.*, 2018; Begum *et al.*, 2019). Pertumbuhan diameter batang yang lebih besar juga menandakan bahwa tanaman memiliki akumulasi biomassa dan transportasi fotosintat yang lebih baik (Taiz *et al.*, 2015).

Diameter batang tertinggi pada tanaman kopi Liberika bermikoriza diperoleh pada kombinasi dengan PGPR konsentrasi 60 mL L⁻¹. Hal ini disebabkan adanya efek sinergis antara mikoriza dan PGPR dalam mendukung pertumbuhan vegetatif. PGPR diketahui menghasilkan fitohormon seperti auksin, sitokinin, dan giberelin yang berperan penting dalam pembelahan dan diferensiasi sel batang, sehingga mendorong penambahan diameter (Kumar *et al.*, 2019; Liu *et al.*, 2020). Selain itu, PGPR juga meningkatkan ketersediaan hara melalui mekanisme fiksasi nitrogen dan pelarutan fosfat (Smith & Read, 2008), yang memperkuat peran mikoriza dalam mendukung pertumbuhan tanaman.

Konsentrasi PGPR 60 mL L⁻¹ diduga merupakan dosis optimum karena pada taraf ini terjadi keseimbangan kolonisasi PGPR dengan simbiosis mikoriza tanpa menimbulkan kompetisi yang berlebihan terhadap eksudat akar. Pada dosis yang lebih tinggi, efektivitas kolonisasi dapat menurun sehingga tidak lagi meningkatkan diameter batang secara signifikan (Olanrewaju *et al.*, 2017; Santoyo *et al.*, 2021). Dengan demikian, kombinasi mikoriza dan PGPR 60 mL L⁻¹ mampu memberikan pertumbuhan diameter batang yang optimal pada tanaman kopi Liberika di tanah Ultisol.



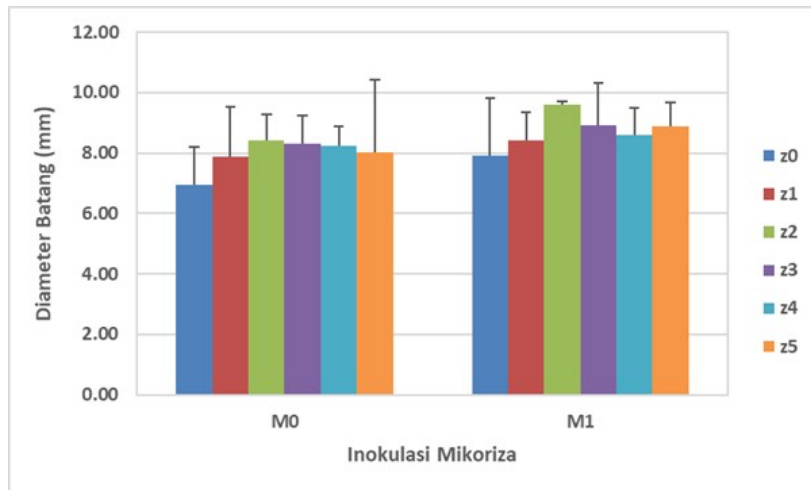
Keterangan : M0 = tanpa inokulasi mikoriza; M1 = Diinokulasi mikoriza; z0 = Tanpa PGPR; z1 = PGPR 10 mL L⁻¹; z2 = PGPR 20 mL L⁻¹; z3 = PGPR 30 mL L⁻¹; z4 = PGPR 40 mL L⁻¹; z5 = PGPR 50 mL L⁻¹;

Gambar 3. Diameter Batang tanaman kopi liberika umur 8 MST pada berbagai konsentrasi PGPR

Berdasarkan Gambar 3 terlihat bahwa tanaman kopi liberika bermikoriza memiliki diameter batang tanaman yang lebih tinggi dibandingkan tanaman tanpa mikoriza pada semua konsentrasi PGPR. Tanaman kopi Liberika bermikoriza tertinggi diperoleh pada konsentrasi PGPR 60 mL L⁻¹. Peningkatan diameter batang ini menunjukkan bahwa mikoriza berperan dalam meningkatkan ketersediaan hara, khususnya fosfor (P) dan nitrogen (N), yang sangat terbatas di tanah Ultisol. Hifa eksternal mikoriza memperluas daerah jelajah akar sehingga penyerapan air dan hara lebih efisien, mendukung proses pembelahan dan pembesaran sel pada jaringan batang, yang pada akhirnya meningkatkan diameter batang tanaman (Backer *et al.*, 2018; Begum *et al.*, 2019).

Diameter batang tertinggi diperoleh pada kombinasi mikoriza dengan PGPR pada konsentrasi 60 mL L⁻¹. Hal ini menunjukkan adanya efek sinergis antara mikoriza dan PGPR dalam mendorong pertumbuhan vegetatif. PGPR diketahui menghasilkan fitohormon seperti auksin, sitokinin, dan giberelin yang berperan dalam stimulasi pembelahan dan diferensiasi sel batang (Kumar *et al.*, 2019; Liu *et al.*, 2020). Selain itu, PGPR meningkatkan ketersediaan nitrogen melalui fiksasi biologis serta melarutkan fosfat yang tidak tersedia, sehingga memperkuat kontribusi mikoriza terhadap penyerapan hara esensial (Smith & Read, 2008).

Konsentrasi PGPR 60 mL L⁻¹ diduga merupakan dosis optimum karena pada taraf ini kolonisasi PGPR berlangsung efektif tanpa menimbulkan kompetisi berlebihan terhadap mikoriza. Sinergi ini menghasilkan suplai hara dan hormon pertumbuhan yang seimbang, sehingga mendukung pertumbuhan diameter batang yang maksimal. Sebaliknya, pada konsentrasi yang lebih tinggi, kolonisasi PGPR dapat menjadi kurang efisien akibat kejenuhan atau kompetisi antar-mikroba, sehingga peningkatan diameter batang tidak lagi signifikan (Olanrewaju *et al.*, 2017; Santoyo *et al.*, 2021).



Keterangan : M0 = tanpa inokulasi mikoriza; M1 = Diinokulasi mikoriza; z0 = Tanpa PGPR; z1 = PGPR 10 mL L⁻¹; z2 = PGPR 20 mL L⁻¹; z3 = PGPR 30 mL L⁻¹; z4 = PGPR 40 mL L⁻¹; z5 = PGPR 50 mL L⁻¹;

Gambar 4. Diameter batang tanaman kopi liberika umur 8 MST pada perlakuan mikoriza

Gambar 4 menunjukkan bahwa pada tanaman kopi Liberika tanpa mikoriza, perlakuan tanpa PGPR menghasilkan diameter batang terendah dibandingkan dengan perlakuan yang diberi PGPR. Sementara itu, pada tanaman yang diinokulasi mikoriza, diameter batang tanaman tertinggi diperoleh pada konsentrasi 60 mL L⁻¹. Kondisi ini mengindikasikan bahwa PGPR berperan penting dalam mendukung pertumbuhan vegetatif tanaman ketika mikoriza tidak hadir. PGPR diketahui mampu meningkatkan pertumbuhan tanaman melalui beberapa mekanisme, antara lain produksi fitohormon (auksin, sitokinin, giberelin), pelarutan fosfat, serta fiksasi nitrogen, sehingga memperbaiki ketersediaan hara yang terbatas di tanah Ultisol dan memacu pertumbuhan jaringan batang (Ruiz-Sánchez *et al.*, 2010; Kumar *et al.*, 2019). Oleh karena itu, meskipun tanpa mikoriza, aplikasi PGPR masih dapat meningkatkan diameter batang tanaman kopi Liberika.

Sementara itu, pada tanaman yang diinokulasi mikoriza, diameter batang tertinggi diperoleh pada kombinasi dengan PGPR konsentrasi 60 mL L⁻¹. Hal ini menunjukkan adanya efek sinergis antara mikoriza dan PGPR dalam mendukung pertumbuhan batang. Mikoriza memperluas daerah jelajah akar melalui hifa eksternal, sehingga meningkatkan serapan hara terutama fosfor dan unsur hara mikro yang menjadi faktor pembatas di tanah Ultisol (Backer *et al.*, 2018; Begum *et al.*, 2019). PGPR kemudian melengkapi peran tersebut dengan meningkatkan ketersediaan nitrogen dan menghasilkan hormon pertumbuhan yang mempercepat pembelahan serta pembesaran sel batang (Liu *et al.*, 2020; Santoyo *et al.*, 2021).

Kombinasi keduanya pada konsentrasi 60 mL L⁻¹ diduga merupakan dosis optimum, di mana kolonisasi PGPR berjalan efektif dan bersinergi dengan mikoriza tanpa menimbulkan kompetisi yang berlebihan terhadap eksudat akar. Pada dosis lebih tinggi, potensi kompetisi antar-mikroba atau kejenuhan koloni dapat menurunkan efektivitas interaksi, sehingga pertambahan diameter batang tidak meningkat secara signifikan (Smith & Read, 2008; Olanrewaju *et al.*, 2017). Oleh sebab itu, kombinasi mikoriza dengan PGPR 60 mL L⁻¹ merupakan perlakuan terbaik dalam meningkatkan diameter batang tanaman kopi Liberika di tanah Ultisol.

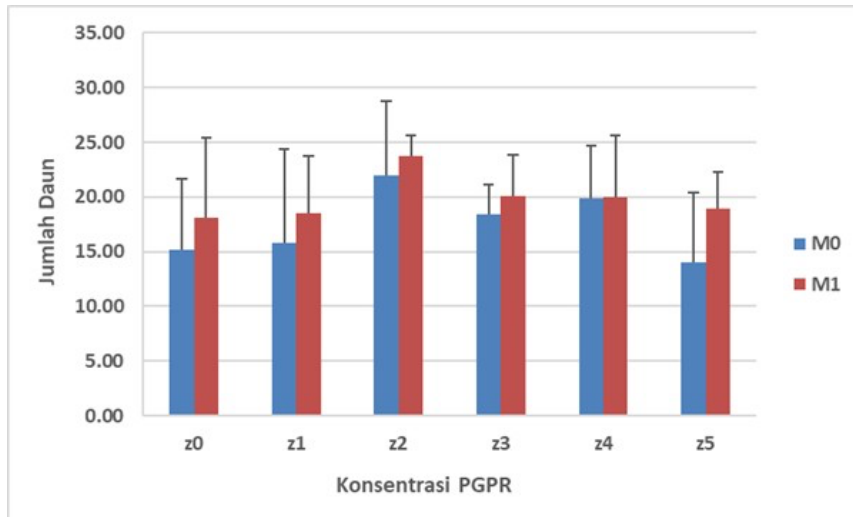
Jumlah Daun Tanaman Kopi Liberika

Jumlah daun tanaman kopi Liberika umur 8 minggu setelah tanam (MST) di lahan ultisol pada perlakuan mikoriza dan berbagai konsentrasi PGPR disajikan pada Gambar 5 dan 6. Berdasarkan Gambar 5 terlihat bahwa tanaman kopi liberika bermikoriza memiliki jumlah daun tanaman yang lebih tinggi dibandingkan tanaman tanpa mikoriza pada semua konsentrasi PGPR. Jumlah daun tanaman kopi Liberika bermikoriza tertinggi diperoleh pada konsentrasi PGPR 60 mL L⁻¹. Hal ini menunjukkan bahwa mikoriza berperan penting dalam mendukung pembentukan daun melalui peningkatan serapan hara makro dan mikro, terutama fosfor (P) yang berperan dalam proses pembelahan sel dan fotosintesis. Penyerapan hara yang lebih baik meningkatkan ketersediaan energi (ATP) dan metabolit penting untuk pembentukan daun baru (Backer *et al.*, 2018; Begum *et al.*, 2019).

Jumlah daun tertinggi diperoleh pada kombinasi mikoriza dengan PGPR pada konsentrasi 60 mL L⁻¹. Efek sinergis ini dapat dijelaskan melalui peran PGPR yang menghasilkan fitohormon seperti

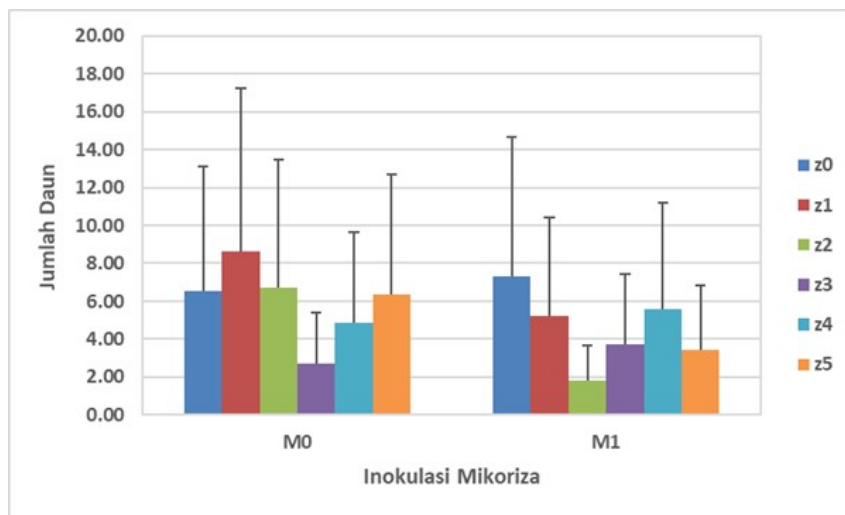
sitokinin dan auksin, yang berfungsi merangsang pertumbuhan tunas lateral dan pembentukan daun (Kumar *et al.*, 2019; Liu *et al.*, 2020). Sitokinin diketahui menginduksi pembentukan primordia daun pada meristem pucuk, sedangkan auksin berperan dalam memperkuat diferensiasi jaringan daun (Vejan *et al.*, 2016).

Selain itu, PGPR juga meningkatkan ketersediaan nitrogen melalui fiksasi biologis, yang sangat penting dalam sintesis protein dan klorofil sebagai penyusun utama jaringan daun. Dengan dukungan mikoriza yang memperbaiki penyerapan fosfor dan air, kombinasi keduanya pada konsentrasi 60 mL L⁻¹ menghasilkan kondisi optimal bagi tanaman untuk membentuk lebih banyak daun. Sebaliknya, pada konsentrasi PGPR yang lebih tinggi, efektivitas kolonisasi bakteri dapat menurun akibat kejenuhan atau kompetisi antar-mikroba, sehingga pembentukan daun tidak bertambah signifikan (Olanrewaju *et al.*, 2017; Santoyo *et al.*, 2021).



Keterangan : M0 = tanpa inokulasi mikoriza; M1 = Diinokulasi mikoriza; z0 = Tanpa PGPR; z1 = PGPR 10 mL L⁻¹; z2 = PGPR 20 mL L⁻¹; z3 = PGPR 30 mL L⁻¹; z4 = PGPR 40 mL L⁻¹; z5 = PGPR 50 mL L⁻¹;

Gambar 5. Jumlah daun tanaman kopi liberika umur 8 MST pada berbagai konsentrasi PGPR



Keterangan : M0 = tanpa inokulasi mikoriza; M1 = Diinokulasi mikoriza; z0 = Tanpa PGPR; z1 = PGPR 10 mL L⁻¹; z2 = PGPR 20 mL L⁻¹; z3 = PGPR 30 mL L⁻¹; z4 = PGPR 40 mL L⁻¹; z5 = PGPR 50 mL L⁻¹;

Gambar 6. Jumlah daun tanaman kopi liberika umur 8 MST pada perlakuan mikoriza

Gambar 6 menunjukkan bahwa pada tanaman kopi Liberika tanpa mikoriza dan diberi mikoriza, perlakuan tanpa PGPR menghasilkan jumlah daun terendah dibandingkan dengan perlakuan yang diberi PGPR. Baik tanaman yang diinokulasi mikoriza maupun yang tidak, jumlah daun tanaman tertinggi diperoleh pada konsentrasi 60 mL L⁻¹. Hal ini menegaskan bahwa PGPR berperan penting dalam mendukung pembentukan daun melalui mekanisme biologisnya. PGPR diketahui menghasilkan fitohormon seperti sitokinin, auksin, dan giberelin yang berperan dalam merangsang pembelahan sel dan pertumbuhan pucuk, sehingga mendorong pembentukan primordia daun baru (Vejan *et al.*, 2016; Backer

et al., 2018). Selain itu, PGPR dapat meningkatkan ketersediaan nitrogen melalui fiksasi biologis serta melarutkan fosfat, yang keduanya sangat penting untuk sintesis protein dan klorofil dalam jaringan daun (Smith & Read, 2008; Ruiz-Sánchez *et al.*, 2010).

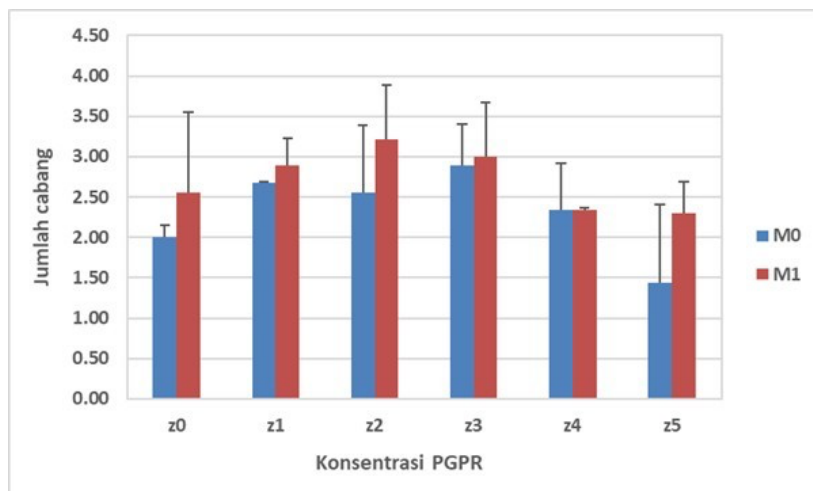
Baik pada tanaman bermikoriza maupun tanpa mikoriza, jumlah daun tertinggi diperoleh pada konsentrasi PGPR 60 mL L⁻¹. Hal ini mengindikasikan bahwa 60 mL L⁻¹ merupakan dosis optimum bagi kolonisasi dan aktivitas PGPR dalam merangsang pertumbuhan daun. Pada taraf ini, PGPR dapat berkolonisasi dengan baik di rhizosfer dan menghasilkan metabolit yang mendukung pertumbuhan vegetatif secara maksimal. Pada tanaman bermikoriza, keberadaan mikoriza memperkuat efek PGPR melalui peningkatan serapan hara, terutama fosfor dan air, sehingga energi yang dihasilkan lebih besar untuk pembentukan daun (Backer *et al.*, 2018; Begum *et al.*, 2019).

Sebaliknya, pada konsentrasi PGPR yang lebih tinggi (≥ 120 mL L⁻¹), efektivitas PGPR menurun akibat kompetisi antar-mikroba dalam memanfaatkan eksudat akar atau kejenuhan kolonisasi, sehingga peningkatan jumlah daun tidak lagi signifikan (Olanrewaju *et al.*, 2017; Santoyo *et al.*, 2021). Dengan demikian, kombinasi mikoriza dengan PGPR pada konsentrasi 60 mL L⁻¹ merupakan perlakuan paling efektif untuk meningkatkan jumlah daun tanaman kopi Liberika di tanah Ultisol.

Jumlah Cabang Tanaman Kopi Liberika

Jumlah cabang tanaman kopi Liberika umur 8 minggu setelah tanam (MST) di lahan ultisol pada perlakuan mikoriza dan berbagai konsentrasi PGPR disajikan pada Gambar 7 dan 8. Berdasarkan Gambar 7 terlihat bahwa tanaman kopi liberika bermikoriza memiliki jumlah cabang yang lebih tinggi dibandingkan tanaman tanpa mikoriza pada semua konsentrasi PGPR. Jumlah daun tanaman kopi Liberika bermikoriza tertinggi diperoleh pada konsentrasi PGPR 60 mL L⁻¹. Hal ini menunjukkan peran mikoriza dalam mendukung pembentukan cabang melalui peningkatan serapan hara dan air di tanah Ultisol yang miskin unsur hara. Penyerapan fosfor (P) oleh mikoriza sangat berperan dalam pembelahan sel, pembentukan energi (ATP), serta sintesis asam nukleat yang dibutuhkan untuk perkembangan organ vegetatif, termasuk percabangan (Backer *et al.*, 2018; Begum *et al.*, 2019).

Jumlah cabang tertinggi diperoleh pada kombinasi mikoriza dengan PGPR pada konsentrasi 60 mL L⁻¹. Efek ini disebabkan oleh sinergi antara mikoriza dan PGPR. PGPR diketahui menghasilkan hormon pertumbuhan seperti sitokinin dan auksin yang berperan penting dalam merangsang pembentukan tunas lateral dan percabangan (Vejan *et al.*, 2016; Backer *et al.*, 2018). Sitokinin memicu inisiasi tunas samping pada meristem aksilar, sementara auksin berperan dalam diferensiasi jaringan, sehingga kombinasi keduanya mendorong pertumbuhan cabang baru (Vejan *et al.*, 2016).

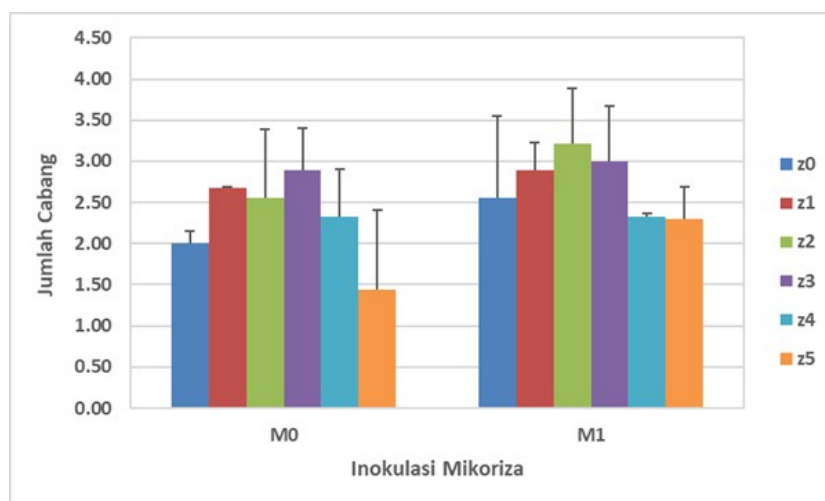


Keterangan : M0 = tanpa inokulasi mikoriza; M1 = Diinokulasi mikoriza; z0 = Tanpa PGPR; z1 = PGPR 10 mL L⁻¹; z2 = PGPR 20 mL L⁻¹; z3 = PGPR 30 mL L⁻¹; z4 = PGPR 40 mL L⁻¹; z5 = PGPR 50 mL L⁻¹;

Gambar 7. Jumlah cabang tanaman kopi liberika umur 8 MST pada berbagai konsentrasi PGPR

Selain itu, PGPR meningkatkan ketersediaan nitrogen melalui fiksasi biologis dan melarutkan fosfat, yang memperkuat fungsi fotosintesis dan metabolisme tanaman. Hal ini memberikan suplai energi yang cukup untuk pembentukan cabang. Konsentrasi 60 mL L⁻¹ tampaknya merupakan dosis optimum karena pada taraf ini populasi PGPR mampu berkolonisasi dengan baik dan bersinergi dengan mikoriza tanpa kompetisi berlebihan. Pada konsentrasi lebih tinggi (≥ 120 mL L⁻¹), efektivitas kolonisasi cenderung

menurun akibat kejenuhan mikroba, sehingga peningkatan jumlah cabang tidak signifikan (Olanrewaju *et al.*, 2017; Santoyo *et al.*, 2021).



Keterangan : M0 = tanpa inokulasi mikoriza; M1 = Diinokulasi mikoriza; z0 = Tanpa PGPR; z1 = PGPR 10 mL L⁻¹; z2 = PGPR 20 mL L⁻¹; z3 = PGPR 30 mL L⁻¹; z4 = PGPR 40 mL L⁻¹; z5 = PGPR 50 mL L⁻¹;

Gambar 8. Jumlah cabang tanaman kopi liberika umur 8 MST pada perlakuan mikoriza

Gambar 8 menunjukkan bahwa pada tanaman kopi Liberika tanpa mikoriza, perlakuan tanpa PGPR menghasilkan jumlah cabang terendah dibandingkan dengan perlakuan yang diberi PGPR. Tanaman yang diinokulasi mikoriza, jumlah cabang tanaman tertinggi diperoleh pada konsentrasi 60 mL L⁻¹ sedangkan pada tanaman tanpa mikoriza jumlah cabang tertinggi dicapai pada 120 mL L⁻¹. Hal ini menegaskan bahwa PGPR berperan penting dalam merangsang pembentukan cabang melalui mekanisme biologisnya. PGPR diketahui menghasilkan fitohormon seperti sitokinin dan auksin, yang berperan dalam mengaktifkan meristem aksilar sehingga mendorong inisiasi tunas lateral (Kumar *et al.*, 2019; Liu *et al.*, 2020). Selain itu, PGPR juga meningkatkan ketersediaan nitrogen dan fosfor melalui fiksasi nitrogen serta pelarutan fosfat, yang mendukung pertumbuhan vegetatif termasuk percabangan (Smith & Read, 2008; Ruiz-Sánchez *et al.*, 2010).

Pada tanaman yang diinokulasi mikoriza, jumlah cabang tertinggi diperoleh pada kombinasi dengan PGPR konsentrasi 60 mL L⁻¹. Hal ini menunjukkan bahwa mikoriza memperkuat efek PGPR melalui peningkatan serapan hara, khususnya fosfor dan unsur hara mikro yang terbatas di tanah Ultisol. Hifa eksternal mikoriza mampu memperluas penyerapan hara dan air, sehingga menyediakan suplai energi dan metabolit yang lebih baik untuk mendukung pembentukan cabang baru (Ruiz-Sánchez *et al.*, 2010; Begum *et al.*, 2019).

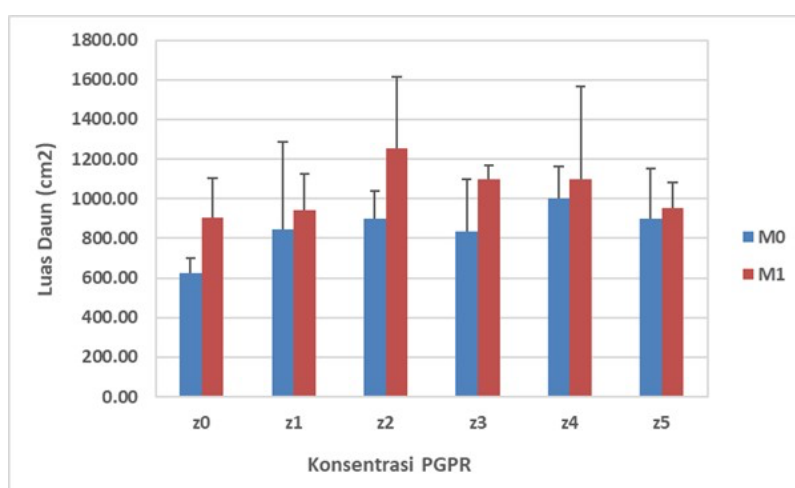
Sementara itu, pada tanaman tanpa mikoriza, jumlah cabang tertinggi dicapai pada konsentrasi PGPR 120 mL L⁻¹. Hal ini mengindikasikan bahwa tanpa dukungan mikoriza, tanaman memerlukan dosis PGPR yang lebih tinggi untuk memperoleh efek fisiologis yang sama. Peningkatan dosis PGPR memberikan kontribusi lebih besar dalam suplai hormon pertumbuhan dan ketersediaan hara, sehingga dapat menutupi keterbatasan penyerapan hara akibat ketiadaan mikoriza. Temuan ini sejalan dengan laporan Olanrewaju *et al.* (2017) bahwa efektivitas PGPR sangat dipengaruhi kondisi lingkungan dan keberadaan mikroba lain dalam rhizosfer.

Luas Daun Total Tanaman Kopi Liberika

Luas daun tanaman kopi Liberika umur 8 minggu setelah tanam (MST) di lahan ultisol pada perlakuan mikoriza dan berbagai konsentrasi PGPR disajikan pada Gambar 9 dan 10. Berdasarkan Gambar 9 terlihat bahwa tanaman kopi liberika bermikoriza memiliki jumlah daun tanaman yang lebih tinggi dibandingkan tanaman tanpa mikoriza pada semua konsentrasi PGPR. Jumlah daun tanaman kopi Liberika bermikoriza tertinggi diperoleh pada konsentrasi PGPR 60 mL L⁻¹. Hal ini menunjukkan bahwa mikoriza berperan penting dalam mendukung ekspansi daun melalui peningkatan ketersediaan hara, khususnya fosfor (P) dan nitrogen (N), yang berfungsi dalam pembelahan serta pembesaran sel, sintesis protein, dan pembentukan klorofil (Backer *et al.*, 2018; Begum *et al.*, 2019). Peningkatan serapan air akibat perpanjangan hifa eksternal mikoriza juga menjaga turgor sel, sehingga mendukung ekspansi lamina daun [Taiz *et al.*, 2015].

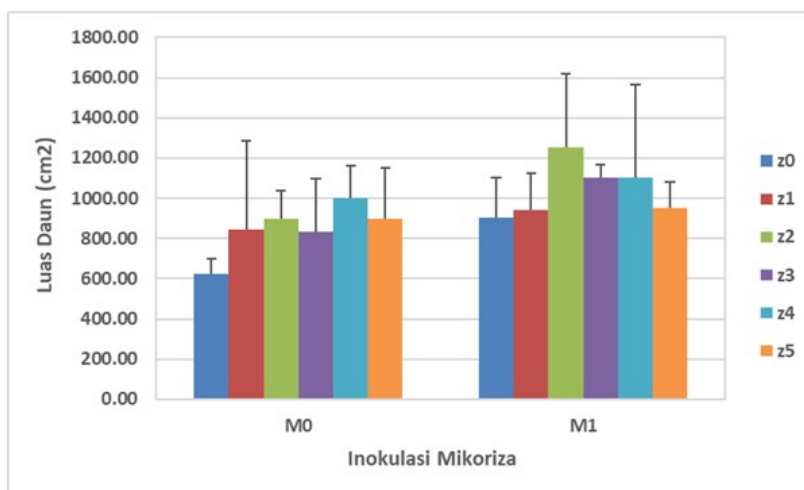
Luas daun tertinggi diperoleh pada kombinasi mikoriza dengan PGPR konsentrasi 60 mL L⁻¹. Efek ini menunjukkan adanya sinergi positif antara mikoriza dan PGPR. PGPR diketahui menghasilkan fitohormon seperti auksin, sitokinin, dan giberelin yang berperan dalam pembentukan dan ekspansi daun. Sitokinin merangsang pembentukan primordia daun, sementara auksin dan giberelin mendukung pembelahan serta pemanjangan sel daun (Vejan *et al.*, 2016; Kumar *et al.*, 2019; Liu *et al.*, 2020). Selain itu, PGPR juga meningkatkan ketersediaan nitrogen melalui fiksasi biologis dan melarutkan fosfat, yang memperkuat peran mikoriza dalam penyediaan hara.

Kombinasi keduanya pada konsentrasi 60 mL L⁻¹ tampaknya menjadi dosis optimum, karena pada taraf ini kolonisasi PGPR berjalan efektif dan mampu bersinergi dengan mikoriza. Pada dosis yang lebih tinggi, kolonisasi mikroba dapat mengalami kejenuhan atau terjadi kompetisi antar-mikroba dalam memanfaatkan eksudat akar, sehingga peningkatan luas daun tidak signifikan (Olanrewaju *et al.*, 2017; Santoyo *et al.*, 2021). Dengan demikian, interaksi mikoriza dan PGPR pada konsentrasi 60 mL L⁻¹ dapat memberikan kondisi fisiologis terbaik untuk pembentukan luas daun kopi Liberika di lahan Ultisol.



Keterangan : M0 = tanpa inokulasi mikoriza; M1 = Diinokulasi mikoriza; z0 = Tanpa PGPR; z1 = PGPR 10 mL L⁻¹; z2 = PGPR 20 mL L⁻¹; z3 = PGPR 30 mL L⁻¹; z4 = PGPR 40 mL L⁻¹; z5 = PGPR 50 mL L⁻¹;

Gambar 9. Luas daun total tanaman kopi liberika umur 8 MST pada berbagai konsentrasi PGPR



Keterangan : M0 = tanpa inokulasi mikoriza; M1 = Diinokulasi mikoriza; z0 = Tanpa PGPR; z1 = PGPR 10 mL L⁻¹; z2 = PGPR 20 mL L⁻¹; z3 = PGPR 30 mL L⁻¹; z4 = PGPR 40 mL L⁻¹; z5 = PGPR 50 mL L⁻¹;

Gambar 10. Luas daun total tanaman kopi liberika umur 8 MST pada perlakuan mikoriza

Gambar 8 menunjukkan bahwa pada tanaman kopi Liberika tanpa mikoriza, perlakuan tanpa PGPR menghasilkan luas daun total terendah dibandingkan dengan perlakuan yang diberi PGPR. Tanaman yang diinokulasi mikoriza, luas daun total tanaman tertinggi diperoleh pada konsentrasi 60 mL L⁻¹ sedangkan pada tanaman tanpa mikoriza luas daun total tertinggi dicapai pada 120 mL L⁻¹. Hal ini menegaskan bahwa PGPR berperan penting dalam mendukung pembentukan dan ekspansi daun melalui mekanisme fisiologisnya. PGPR diketahui mampu menghasilkan fitohormon seperti sitokinin, auksin, dan giberelin yang merangsang pembentukan primordia daun baru dan memperbesar lamina daun (Kumar

et al., 2019; Liu *et al.*, 2020). Selain itu, PGPR juga meningkatkan ketersediaan nitrogen dan fosfor melalui fiksasi nitrogen serta pelarutan fosfat, yang sangat penting untuk sintesis protein dan klorofil sehingga mendukung pembesaran daun (Smith & Read, 2008; Ruiz-Sánchez *et al.*, 2010).

Pada tanaman yang diinokulasi mikoriza, luas daun total tertinggi diperoleh pada kombinasi dengan PGPR konsentrasi 60 mL L⁻¹. Hal ini menunjukkan adanya efek sinergis antara mikoriza dan PGPR. Mikoriza memperluas area penyerapan akar melalui hifa eksternal, sehingga meningkatkan ketersediaan hara makro terutama fosfor dan air, yang penting untuk proses fotosintesis dan ekspansi daun (Backer *et al.*, 2018; Begum *et al.*, 2019). Kombinasi dengan PGPR pada dosis 60 mL L⁻¹ memberikan keseimbangan optimal antara suplai hormon pertumbuhan dan ketersediaan hara, sehingga mendukung ekspansi daun secara maksimal.

Sementara itu, pada tanaman tanpa mikoriza, luas daun total tertinggi dicapai pada konsentrasi PGPR 120 mL L⁻¹. Hal ini menunjukkan bahwa tanpa keberadaan mikoriza, tanaman membutuhkan dosis PGPR yang lebih tinggi untuk memacu pertumbuhan daun. Dengan dosis yang lebih tinggi, populasi PGPR mampu menghasilkan hormon pertumbuhan dan meningkatkan ketersediaan hara pada tingkat yang dapat menutupi keterbatasan penyerapan hara akibat ketiadaan mikoriza. Kondisi ini sesuai dengan temuan Kumar *et al.* (2017)] bahwa efektivitas PGPR dalam meningkatkan pertumbuhan vegetatif sangat bergantung pada lingkungan tanah dan interaksi dengan mikroba lain di rhizosfer.

Dengan demikian, konsentrasi optimum PGPR untuk meningkatkan luas daun berbeda pada tanaman bermikoriza dan tanpa mikoriza, yakni 60 mL L⁻¹ dan 120 mL L⁻¹. Hal ini memperkuat peran penting sinergi mikoriza dan PGPR dalam mendukung pertumbuhan vegetatif kopi Liberika pada lahan Ultisol.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil dan pembahasan, maka untuk sementara dapat disimpulkan bahwa :

1. Aplikasi mikoriza dan PGPR mampu bekerja secara sinergis dalam meningkatkan pertumbuhan morfologi tanaman kopi Liberika pada lahan Ultisol.
2. Kombinasi mikoriza dengan PGPR konsentrasi 60 mL L⁻¹ menghasilkan pertumbuhan morfologi terbaik. Sementara itu, pada tanaman kopi Liberika tanpa inokulasi mikoriza, pertumbuhan morfologi tertinggi dicapai pada konsentrasi PGPR yang lebih tinggi, yaitu 120 mL L⁻¹

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih kami sampaikan kepada Lembaga Penelitian dan Pengabdian kepada Masyarakat Universitas Jambi melalui Penelitian LPPM yaitu “Penelitian Terapan Fakultas” dengan Nomor Kontrak: 592/UN21.11/PT.01.05/SPK/2025 Tanggal 2 Juli 2025 yang telah membiayai penelitian ini.

REFERENSI

- Ahammed, GJ, Mao Q, Yan Y, Wu M, Wang Y, Ren J, *et al.* (2020). Role of melatonin in arbuscular mycorrhizal fungi-induced resistance to Fusarium wilt in cucumber. *Phytopathology*, 110(5), 999–1009.
- Ashwin, R, Bagyaraj, DJ, Mohan, RB. (2018). Evaluation of different arbuscular mycorrhizal fungi for selecting the best for inoculating soybean cultivars MAUS 2 and MAUS 212. *Pertanika J Trop Agric Sci*.41(4), 1587–98.
- Asra, Husda R, Advinda L, Anhar A, & Irdawati. (2024). The role of plant growth promoting rhizobacteria (PGPR) in sustainable agriculture. *Serambi Biol*, 9(1), 1–7.
- Aswad M, Kumalawati Z, & Yusuf M. (2023). Effect of Arbuscular Mycorrhizal Fungi (AMF) and PGPR application on paddy yield components. *proper: Jurnal Penelitian Pertanian Terapan*, 1(2), 84–89.
- Atakan, A, Özkaya, HO, & Erdoğan, O. (2018). Effects of Arbuscular Mycorrhizal Fungi (AMF) on Heavy Metal and Salt Stress. *Turkish J Agric - Food Sci Technol*, 6(11), :1569. <https://doi.org/10.24925/turjaf.v6i11.1569-1574.1992>

- Backer, R., Rokem, J. S., Ilangumaran, G., Lamont, J., Praslickova, D., Ricci, E., Subramanian, S., & Smith, D. L. (2018). Plant growth-promoting rhizobacteria: Context, mechanisms of action, and roadmap to commercialization of biostimulants for sustainable agriculture. *Frontiers in Plant Science*, 9, 1473. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.01473>
- Begum, N., Qin, C., Ahanger, M. A., Raza, S., Khan, M. I., Ashraf, M., Ahmed, N., & Zhang, L. (2019). Role of arbuscular mycorrhizal fungi in plant growth regulation: Implications in abiotic stress tolerance. *Frontiers in Plant Science*, 10, 1068. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.01068>
- Campo, S, Martín-Cardoso, H, Olivé, M, Pla E, Catala-Forner M, Martínez-Eixarch M, *et al.* (2020). Effect of Root Colonization by Arbuscular Mycorrhizal Fungi on growth, productivity and blast resistance in rice, *Rice*. 13(42), 1–14. <https://doi.org/10.1186/s12284-020-00402-7>
- Choudhury, D, Tarafdar, S, Dutta S. (2022). Plant growth promoting rhizobacteria (PGPR) and their eco-friendly strategies for plant growth regulation: a review. *Plant Sci Today*. 29(3), 524–37. <https://doi.org/10.14719/pst.1604>
- Diagne, N, Ngom, M, Djighaly, PI, Fall, D, Hoher, V, & Svistoonoff, S. (2020). Roles of Arbuscular Mycorrhizal Fungi on plant growth and performance: importance in biotic and abiotic stressed regulation. *Diversity*. 12(10), 1–25. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2020.601004>
- Deja-Sikora, E, Kowalczyk, A, Trejgell, A, Szmidi-Jaworska, A, Baum, C, & Mercy, L, *et al.* (2020). Arbuscular Mycorrhiza changes the Impact of potato virus Y on growth and stress tolerance of *Solanum tuberosum* L. in vitro. *Front Microbiol*, 10, 1–12. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2019.02971>
- Dowarah, B, Gill, SS, & Agarwala, N. (2022). Arbuscular Mycorrhizal Fungi in conferring tolerance to biotic stresses in plants. *J Plant Growth Regul*, 41(4), 1429–44. <https://doi.org/10.1007/s00344-021-10392-5>
- El-Sawah, AM, El-Keblawy, A, Ali, DFI, Ibrahim, HM, El-Sheikh, MA, Sharma, A, *et al.* (2021). Correction: Arbuscular mycorrhizal fungi and plant growth-promoting rhizobacteria enhance soil key enzymes, plant growth, seed yield, and qualitative attributes of guar. *Agriculture*, 11(194), 1–19. <https://doi.org/10.3390/agriculture11030194>
- Emamverdian, A., Ding, Y., Mokhberdoran, F. & Xie Y. (2015). Heavy Metal Stress and Some Mechanisms of Plant Defense Response. *Trop Agric Res*, 25(4), 27–54. <http://dx.doi.org/10.1155/2015/756120>
- Evelin, H, Devi, TS, Gupta, S, & Kapoor, R. (2019). Mitigation of salinity stress in plants by arbuscular mycorrhizal symbiosis: Current understanding and new challenges. *Front Plant Sci*. 10. <https://doi.org/10.3390/molecules21050573> <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00470>
- Feng, Z, Liu, X, Zhu, H, & Yao, Q. (2020). Responses of Arbuscular Mycorrhizal symbiosis to abiotic stress: A lipid-centric perspective. *Front Plant Sci*, 11, 1–11. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.578919>
- Gao, X, Guo, H, Zhang, Q, Guo, H, Zhang, L, Zhang, C, *et al.* (2020). Arbuscular Mycorrhizal Fungi (AMF) enhanced the growth, yield, fiber quality and phosphorus regulation in upland cotton (*Gossypium hirsutum* L.). *Sci Rep*, 10(1), 1–12. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-59180-3>
- Giovannetti, M & Mosse B. (1980). An evaluation of techniques for measuring vesicular arbuscular mycorrhizal infection in root. *New Phytol*. 84, 489-500. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.1980.tb04556.x>
- Gong, X & Tian, DQ. (2019). Study on the effect mechanism of Arbuscular Mycorrhiza on the absorption of heavy metal elements in soil by plants. In: *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/267/5/052064>
- Gul, F, Khan, IU, Rutherford, S, Dai, ZC, Li, G & Du, DL. (2023). Plant growth promoting rhizobacteria and biochar production from *Parthenium hysterophorus* enhance seed germination and productivity in barley under drought stress. *Front Plant Sci*. 14, 1–12. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1175097>
- Gupta, SK, Gupta, V, Rahi, RK, Devki, Yadav, M, & Neelam, DK. (2023). Significant role of plant

- growth promoting rhizobacteria in agriculture field. *Appl Microbiol Theory & Technol*, 5(1), 1–14. <http://ojs.wiserpub.com/index.php/AMTT/>
- Haque, SI, Matsubara, Y, Ichi.(2018). Salinity tolerance and sodium localization in mycorrhizal strawberry plants. *Commun Soil Sci Plant Anal*. 49(22), 2782–92.
- Kartika, E., Duaja, M. D., & Gusniwati, G. (2016). Pertumbuhan Tanaman Kelapa Sawit Belum Menghasilkan (TBM I) pada pemberian mikoriza indigen dan dosis pupuk organik di lahan marjinal. *Biospecies*, 9(1), 29–37. <https://doi.org/10.22437/biospecies.v9i1.2877>
- Kartika, E, Duaja, MD, Gusniwati, G, & Wilia, W. (2017). Identifikasi Fungi Mikoriza Arbuskular dari rizosfer tanaman kopi Liberika Tungkal Jambi di Desa Bram Itam Kanan dan Bunga Tanjung, Tanjung Jabung Barat. In: *Semirata BKS-PTN Wilayah Barat, Bidang Pertanian 20-21 Juli 2017*. 2017. p. 487–94.
- Kartika, E, Duaja, DM, & Gusniwati. (2019). Diversity of Arbuscular Mycorrhizal Fungi from Liberica Tungkal Jambi coffee plant rhizosphere on peatland. *IOP Conf Ser Earth Environ Sci*. 391(1), 1–9. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/391/1/012058>
- Kartika, E, Duaja, MD, & Gusniwati, G. (2022). Respons tanaman kopi liberika bermikoriza di lahan gambut terhadap aplikasi pupuk anorganik. *J Agro*, 9(2), 178–92. <https://doi.org/10.15575/21421>
- Kartika, E, Duaja, MD, & Gusniwati, G. (2024). Produksi tanaman kopi liberika hasil penyambungan intra- dan inter- spesifik pada aplikasi mikoriza dan pupuk anorganik di lahan gambut. *J Agro*, 11(1), 91–106. <https://doi.org/10.15575/34002>
- Kartika, E, Gusniwati, G, & Duaja, MD. (2021). Respons bibit kopi Liberika hasil sambung pucuk dengan kopi Robusta pada berbagai panjang entres dan inokulasi mikoriza. *J Agro*, 8(2), 164–77. <https://doi.org/10.15575/12747>
- Kartika, E, Lizawati, L, & Hamzah, H. (2018). Respons Tanaman jarak pagar terhadap mikoriza indigen dan pupuk P di lahan bekas tambang batu bara *Biospecies*, 11(1), 10-18.
- Kasifah, M., Mu'awanah, N., Firmansyah, & Pudji, H. (2022). Pertumbuhan benih kopi Arabika (*Coffea arabica* L.) melalui aplikasi Plant Growth Promoting Rhizobacteria (PGPR) dari perakaran bambu. *Agrotechnology Research Journal*, 6(1), 1–8. <https://doi.org/10.20961/agrotechresj.v6i1.60168>
- Kormanik, PP & Mc. Graw, AC. (1982). Quantification of vesicular-arbuscular mycorrhizae in plant root. In NC Schenck. (ed.). *Methods and Principles of Mycorrhizae Research*. The American Phytop. Soc. 46, 37-45.
- Kunal, Pranaw K, Kumawat KC, & Meena VS. (2023). Editorial: Plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR) and plant hormones: an approach for plant abiotic stress management and sustainable agriculture. *Front Microbiol*. 14, 1–2. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2023.1285756>
- Kumar, A., Patel, J. S., Meena, V. S., & Srivastava, R. (2019). Recent advances of PGPR based approaches for stress tolerance in plants for sustainable agriculture. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 20, 101271. <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2019.101271>
- Liu, H., Brettell, L. E., Qiu, Z., & Singh, B. K. (2020). Microbiome-mediated stress resistance in plants. *Trends in Plant Science*, 27(5), 528–541. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2020.03.014>
- Olanrewaju, O. S., Glick, B. R., & Babalola, O. O. (2017). Mechanisms of action of plant growth promoting bacteria. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 33(11), 197. <https://doi.org/10.1007/s11274-017-2364-9>
- Prasetyo, B & Suriadikarta, D. (2006). Karakteristik, potensi, dan teknologi pengelolaan tanah Ultisol untuk pengembangan pertanian lahan kering di Indonesia. *J Litbang Pertan*. 25(2), 39–47.
- Ruiz-Sánchez, M., Aroca, R., Muñoz, Y., Polón, R., & Ruiz-Lozano, J. M. (2010). The arbuscular mycorrhizal symbiosis enhances the photosynthetic efficiency and the antioxidative response of rice plants subjected to drought stress. *Journal of Plant Physiology*, 167(11), 862–869. <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2010.01.018>
- Santander, C, Aroca, R, Ruiz-Lozano, JM, Olave, J, Cartes P, Borie, F, *et al.* (2017). Arbuscular

- mycorrhiza effects on plant performance under osmotic stress. *Mycorrhiza*. 27(7), 639–57. <https://doi.org/10.1007/s00572-017-0784-x>
- Santoyo, G., Urtis-Flores, CA, Loeza-Lara, PD, Orozco-Mosqueda, M.del C., & Glick, BR. (2021) Rhizosphere colonization determinants by plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR). *Biology*, 10(6), 475. <https://doi.org/10.3390/biology10060475>
- Sharma, V, Kaur, J, & Sharma, S. (2020). Plant Growth Promoting Rhizobacteria: Potential microbes for sustainable agriculture. *Biotechnol Veg*. 20(3), 157–66. <https://doi.org/10.1007/s00572-017-0784-x>
- Simbolon, M & Tyasmoro, SY. (2022). Pengaruh Dosis PGPR (Plant Growth Promoting Rhizobacteria) terhadap pertumbuhan dan hasil tanaman tomat (*Solanum lycopersicum* L.) pada sistem tanam monokultur dan tumpangsari. *Produksi Tanam*, 010(09), 509–22. <http://dx.doi.org/10.21776/ub.protan.2022.010.09.07>
- Smith, S.E., & Read, DJ. 2008. *Mycorrhizal symbiosis* (3rd ed.). Academic Press.
- Smit,h SE & Smith, FA. (2012). Fresh perspectives on the roles of arbuscular mycorrhizal fungi in plant nutrition and growth. *Mycologia*, 104(1), 1–13.
- Suparno, A, Prabawardani, S, Yahya, S, & Taroreh, NA. (2015). Inoculation of Arbuscular Mycorrhizal Fungi increase the growth of cocoa and coffee seedling applied with Ayamaru phosphate Rock. *J Agric Sci*. 7(5),199–210.
- Taiz, L. Zeiger, E., Moller, I.M. & Murphy, A. 2015. *Plant Physiology and Development*. 6th Edition, Sinauer Associates, Sunderland, CT.
- Tian, H, Jia, Z, Liu, W, Wei, X, Wang, H, Bao, G, *et al.* (2023). Effects of Arbuscular Mycorrhizal Fungi on growth and nutrient accumulation of oat under drought conditions. *Agronomy*, 1;13(2580), 1–13. <https://doi.org/10.3390/agronomy13102580>
- Vejan, P, Abdullah, R, Khadiran, T, Ismail, , & Boyce, AN. (2016). Role of plant growth promoting rhizobacteria in agricultural sustainability—A review. *Molecules*, 21(5), 573. <https://doi.org/10.3390/molecules21050573>