

Growth Rate and Chlorophyll Content of Liberica Coffee Leaves (*Coffea liberica* L.) with Addition Rhizosphere Bacterial Microcapsules from Eruption Soil of Mount Sinabung

Kabul Warsito^{1*}, Desi Sri Pasca Sari Sembiring¹, Indra Irawan¹, Bagus Kriswanda¹

¹Program Studi Agroteknologi, Universitas Pembangunan Panca Budi, Medan, Indonesia;

Article History

Received : September 16th, 2025

Revised : October 17th, 2025

Accepted : October 21th, 2025

*Corresponding Author: **Kabul**

Warsito, Program Studi

Agroteknologi, Universitas

Pembangunan Panca Budi, Medan,
Indonesia;

Email:

kabulwarsito@dosen.pancabudi.ac.id

Abstract: The chlorophyll content in coffee leaves greatly influences growth productivity and productivity. This study aimed to examine the effect of seed soaking and rhizosphere bacteria microcapsule dosage on the growth rate and chlorophyll content of Liberica coffee leaves planted on peatland. The experiment used a completely randomized design (CRD) with two factors, namely seed soaking time (0, 9, 10, and 11 hours) and rhizosphere bacteria microcapsule dosage (0, 10, 15, and 20 grams), with a total of 16 treatment combinations replicated twice. The parameters measured included leaf area, number of leaves, and chlorophyll content. The results showed that 11-hour seed soaking treatment produced the largest leaf area (40.32 mm), 9–10 hours soaking gave the highest number of leaves (10.34), and 20 grams of microcapsules gave the highest chlorophyll content (79.16 CCI). ANOVA and Duncan's test showed that seed soaking and microcapsules significantly affected the growth and chlorophyll content of leaves. In conclusion, the combination of seed soaking for 9–11 hours and a 20 gram microcapsule dose can improve the growth and quality of Liberica coffee leaves.

Keywords: Liberica coffee, microcapsules, rhizosphere bacteria.

Pendahuluan

Produktivitas tanaman pertanian sangat ditentukan oleh efisiensi proses fotosintesis yang tercermin melalui kandungan klorofil daun sebagai pigmen fotosintesis esensial (Pôrto et al., 2014). Klorofil berperan sebagai indikator vitalitas tanaman dalam proses konversi energi cahaya menjadi senyawa organik, sehingga kadar klorofil daun mencerminkan kapasitas fotosintesis dan status nutrisi tanaman yang secara langsung berkorelasi dengan laju pertumbuhan. Namun, upaya peningkatan produktivitas tanaman seringkali terkendala oleh keterbatasan ketersediaan hara dalam tanah dan penggunaan pupuk kimia sintetis yang berdampak negatif terhadap kesehatan tanah jangka panjang.

Untuk mengatasi permasalahan tersebut, pemanfaatan bakteri rizosfer sebagai agen biofertilizer (plant growth promoting rhizobacteria/PGPR) telah terbukti menjadi alternatif yang

efektif dan ramah lingkungan dalam meningkatkan produktivitas tanaman (Glick, 2012; Yadav et al., 2021). Genus bakteri seperti *Pseudomonas*, *Azotobacter*, *Bacillus*, dan *Rhizobium* telah terbukti meningkatkan ketersediaan hara tanah melalui produksi asam organik seperti asam glukonat yang melarutkan fosfat terikat dan menstimulasi pertumbuhan berbagai tanaman pertanian (Rodriguez et al., 2004; Agustiyani et al., 2021).

Namun, tantangan utama dalam aplikasi bakteri rizosfer di lapangan adalah rendahnya viabilitas bakteri selama penyimpanan dan transportasi, serta efektivitas kolonisasi yang tidak konsisten akibat kondisi lingkungan yang tidak menguntungkan seperti suhu, kelembaban, dan kompetisi dengan mikroorganisme indigenus (Ma et al., 2016). Untuk mengatasi permasalahan ini, teknologi enkapsulasi bakteri dalam bentuk mikrokapsul telah dikembangkan sebagai solusi inovatif untuk melindungi sel

bakteri dari kondisi lingkungan yang merugikan dan meningkatkan efisiensi delivery sistem (Fang & Bhandari, 2022).

Penelitian terkini telah membuktikan efektivitas mikrokapsul bakteri rizosfer dari tanah erupsi Gunung Sinabung dalam meningkatkan pertumbuhan tanaman kopi. Warsito *et al.* (2024) menunjukkan bahwa aplikasi mikrokapsul bakteri rizosfer dengan dosis 15 gram per tanaman efektif meningkatkan pertumbuhan kopi arabika dengan peningkatan tinggi tanaman hingga 13,64 cm (28,7% lebih tinggi dari kontrol) dan diameter batang mencapai 1,64 mm (21,5% lebih tinggi dari kontrol) setelah 12 minggu aplikasi. Studi tersebut juga menunjukkan bahwa enkapsulasi bakteri rizosfer meningkatkan viabilitas bakteri selama penyimpanan dari 65% (suspensi) menjadi 92% (mikrokapsul) setelah 6 bulan, dan memaksimalkan potensi kolonisasi rizosfer dengan populasi bakteri mencapai 10^8 CFU/g tanah dibandingkan 10^6 CFU/g pada aplikasi suspensi konvensional. Mekanisme peningkatan pertumbuhan dikaitkan dengan aktivitas bakteri dalam meningkatkan ketersediaan nitrogen dan fosfor tanah, produksi IAA yang menstimulasi elongasi sel dan diferensiasi jaringan vaskular, serta peningkatan absorpsi air dan hara melalui modifikasi arsitektur akar (Warsito *et al.*, 2024).

Meskipun demikian, penelitian tersebut masih terbatas pada kopi arabika yang memiliki karakteristik fisiologis, morfologi, dan adaptasi ekologis yang berbeda dengan kopi liberika. Kopi liberika memiliki laju pertumbuhan yang lebih lambat, kandungan klorofil yang lebih rendah, dan toleransi yang lebih tinggi terhadap kondisi tanah masam dan tergenang dibandingkan arabika. Penelitian ini mengintegrasikan keunggulan mikroba tanah vulkanik dengan teknologi enkapsulasi untuk mengoptimalkan pertumbuhan kopi liberika, serta mengevaluasi secara komprehensif hubungan antara aplikasi mikrokapsul bakteri rizosfer dengan efisiensi fotosintesis melalui analisis kadar klorofil daun. Dengan demikian, penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi signifikan terhadap pengembangan teknologi biofertilizer berkelanjutan yang dapat mengurangi ketergantungan pada pupuk kimia sintesis, meningkatkan produktivitas kopi liberika sebagai alternatif diversifikasi produksi

kopi nasional, dan mendukung ketahanan ekonomi petani kopi Indonesia di lahan marginal.

Bahan dan Metode

Alat dan bahan

Alat yang digunakan dalam penelitian ini meliputi cawan petri, tabung reaksi beserta raknya, gelas ukur, gelas kimia, erlenmeyer, autoklaf, oven, spatula, jarum suntik, inkubator, hot plate, batang pengaduk, neraca analitik, sprayer, laminar air flow, botol kaca, aluminium foil, kapas, pisau, polybag, bunsen, mikroskop, dan shaker. Sedangkan bahan yang digunakan terdiri dari isolate bakteri rizosfer asal tanah erupsi Gunung Sinabung (Warsito *et al.*, 2024), media Nutrient Agar (NA), aquades, alkohol 70%, larutan klorin, CaCl_2 , natrium alginat, inulin, pupuk kandang ayam, top soil, arang sekam padi, serta larutan NaCl 0,9% (Panichikhal *et al.*, 2021).

Metode

Penelitian ini menggunakan Rancangan Acak Lengkap (RAL) faktorial dengan dua faktor perlakuan dan 16 kombinasi perlakuan yang diulang dua kali. Faktor pertama berupa lama perendaman benih menggunakan suspensi bakteri endofit, terdiri dari empat level: B0: Tanpa perendaman, B1: 9 jam, B2: 10 jam, B3: 11 jam. Faktor kedua melibatkan penambahan mikrokapsul bakteri endofit dengan empat level dosis: I0: 0 gram, I1: 10 gram, I2: 15 gram, I3: 20 gram. Data hasil penelitian dianalisis menggunakan uji analisis variansi (ANOVA) untuk menentukan signifikansi pengaruh perlakuan. Jika terdapat perbedaan signifikan, analisis dilanjutkan dengan uji rentang berganda Duncan untuk mengidentifikasi perbedaan antar perlakuan. Pendekatan ini sejalan dengan penelitian mikrobiologi pertanian yang berfokus pada interaksi bakteri tanah dengan tanaman.

Persiapan sterilisasi media tanam

Media tanam yang digunakan terdiri dari campuran tanah lapisan atas, sekam sangrai, dan kotoran ayam dengan perbandingan 50%, 25%, dan 25%. Semua bahan tersebut dicampur secara merata dan dimasukkan ke dalam polybag, kemudian polybag ditutup rapat sebelum disterilkan dalam autoklaf selama 10 jam. Setelah proses sterilisasi selesai, media tanam

langsung dibawa ke rumah kaca yang juga telah disterilkan sebelumnya dengan penyemprotan formalin 0,4%.

Perendaman benih dengan suspensi bakteri rhizosfer

Pengumpulan larutan bakteri rhizosfer dilakukan dengan menambahkan 10 ml larutan NaCl 0,9% ke dalam satu petri, kemudian diaduk menggunakan batang pengaduk segitiga. Selanjutnya, biji kopi direndam dalam larutan tersebut dengan variasi waktu perendaman selama 9 jam, 10 jam, dan 11 jam. Proses perendaman dilakukan dalam wadah yang ditutup dengan aluminium foil untuk menjaga kondisi tetap steril.

Pembuatan mikrokapsul dari bakteri rhizosfer sebagai biofertilizer

Sebanyak 14,7 g CaCl₂ dilarutkan dalam labu ukur dengan 1000 ml air suling dan diaduk hingga homogen. Larutan disterilkan menggunakan autoklaf pada suhu 121°C selama 15 menit. Larutan alginat steril yang mengandung suspensi bakteri endofit dimasukkan ke dalam jarum suntik dan diteteskan ke dalam larutan CaCl₂ 0,1 M. Mikrokapsul yang terbentuk didiamkan selama 1 jam. Untuk menghilangkan residu CaCl₂, mikrokapsul disaring dan dibilas dengan air suling.

Analisis kadar klorofil

Setelah sampel ekstraksi didinginkan, sebanyak 5 ml dimasukkan ke dalam kuvet untuk dilakukan pengukuran absorbansi menggunakan spektrofotometer. Sebelum pengukuran, alat spektrofotometer diatur terlebih dahulu dengan mengatur panjang gelombang pada 649 nm, 665 nm, 480 nm, dan 510 nm. Kuvet yang berisi ekstraksi kemudian dimasukkan ke dalam alat. Pembacaan hasil absorbansi dilakukan secara manual dengan mengambil gambar panel display, kemudian hasilnya dicatat. Setelah pengukuran klorofil a, klorofil b, dan pigmen karotenoid selesai, kuvet dilepas untuk proses selanjutnya, kemudian dihitung dengan rumus berikut:

$$\text{Klorofil a (mg/L)} = (13,7 \times \lambda_{665}) - (5,76 \times \lambda_{649})$$

$$\text{Klorofil b (mg/L)} = (25,8 \times \lambda_{649}) - (7,77 \times \lambda_{665})$$

$$\text{Klorofil total (mg/L)} = (20 \times \lambda_{649}) + (6,1 \times \lambda_{665})$$

Keterangan:

λ = Nilai absorbansi klorofil pada panjang gelombang spesifik

$$\text{Total Karotenoid}(\mu\text{g/g}) = \frac{((7,6 \times \gamma_{480}) - (1,49\gamma_{510}))}{1000 \times W}$$

Keterangan:

λ = Absorbansi pada panjang gelombang spesifik

V = Volume total ekstrak pigment

W = Bobot sampel yang digunakan untuk ekstraksi

Parameter Pengamatan

Parameter yang diamati dalam penelitian ini adalah karakterisasi bakteri endofit, pengukuran auksin endofit, jumlah daun (helai), luas daun (cm²) dan kadar klorofil pada daun. Data pengamatan diambil satu kali dalam sebulan.

Hasil dan Pembahasan

Luas Daun

Luas daun pada tanaman kopi diambil pada bulan ke-5 setelah ditanam, berdasarkan hasil pengamatan pertumbuhan luas daun pada tanaman kopi berpengaruh sangat signifikan. Berdasarkan data yang diperoleh, terlihat bahwa perlakuan perendaman dan mikrokapsul bakteri rizosfer berpengaruh positif terhadap pertumbuhan daun kopi liberika yang diukur dari rata-rata luas daun pada berbagai umur pengamatan (3, 4, dan 5 BST). Perlakuan dengan dosis lebih tinggi (B3 untuk perendaman dan I3 untuk mikrokapsul) menunjukkan luas daun terbesar dengan nilai rata-rata 40.32 dan 41.32 cm² secara berturut-turut pada umur 5 BST. Hal ini mengindikasikan bahwa mikroorganisme rizosfer yang dimikrokapsulkan dapat merangsang pertumbuhan daun melalui peningkatan aktivitas metabolisme tanaman, seperti penyerapan nutrisi dan produksi hormon tumbuh yang berkontribusi pada ekspansi daun.

Mekanisme peningkatan luas daun ini dapat dijelaskan melalui kemampuan bakteri rizosfer dalam memproduksi hormon pertumbuhan, terutama Indole-3-Acetic Acid (IAA). Penelitian oleh Warsito *et al.* (2023) mengungkapkan bahwa bakteri *Pseudomonas* yang diisolasi dari rizosfer tanaman kopi mampu menghasilkan IAA hingga 79,65 µg/ml pada kondisi optimum. Hormon IAA berperan penting

dalam pemanjangan sel, pembelahan sel, dan diferensiasi jaringan yang berkontribusi langsung pada ekspansi luas daun. Temuan ini diperkuat oleh Suriani *et al.* (2025) yang menunjukkan bahwa aplikasi rizobakteria *Bacillus nitrificans* dan *B. velezensis* pada kopi robusta Bali meningkatkan pertumbuhan tanaman melalui produksi IAA dan fiksasi nitrogen.

Table 1. Uji rata-rata luas daun pada kopi liberika

Perlakuan	Rata-rata luas daun		
	3 BST	4 BST	5 BST
Perlakuan Perendaman (B)			
B0	22.10c	24.50c	26.33e
B1	30.25c	33.80b	36.32d
B2	32.10b	35.70b	38.76c
B3	34.50b	37.95a	40.32b
Perlakuan Mikrokapsul (I)			
I0	23.15e	25.90e	27.19e
I1	30.80b	34.50d	37.38 d
I2	28.10b	31.40d	33.46b
I3	35.65b	38.20c	41.32b

Note: angka-angka dalam kolom yang diikuti oleh huruf yang sama tidak berbeda secara signifikan berdasarkan uji anova pada tingkat $\alpha=5\%$ BST: bulan setelah tanam

Durasi perendaman yang lebih lama (B3: 8,5 jam) memungkinkan penetrasi bakteri rizosfer yang lebih optimal ke dalam struktur benih, sehingga kolonisasi awal pada sistem perakaran dapat berlangsung lebih efektif. Manullang *et al.* (2022) melaporkan bahwa perendaman benih kopi arabika pada suhu awal 50°C selama 30 menit mampu meningkatkan indeks vigor benih dan panjang akar hingga 8,78 cm. Kolonisasi bakteri pada zona rizosfer sejak fase awal pertumbuhan memfasilitasi penyerapan nutrisi yang lebih efisien, terutama nitrogen dan fosfor yang esensial untuk fotosintesis dan pertumbuhan vegetatif. Hasil ini sejalan dengan penelitian Lizawati *et al.*, 2024 dengan menggunakan perlakuan pemberian pupuk kandang ayam yang memiliki hasil terbaik 70.98 cm² helai daun pada perlakuan dosis 150 gram pupuk kandang ayam.

Jumlah Daun

Jumlah daun diamati pada umur 3, 4, dan 5 bulan setelah tanam (BST). Hasil uji jarak Duncan ditunjukkan pada Tabel 2. Hasil penelitian menunjukkan bahwa perlakuan

perendaman benih dengan suspensi bakteri rizosfer memberikan pengaruh nyata terhadap rata-rata jumlah daun tanaman kopi liberika (*Coffea liberica* L.) pada pengamatan 5 minggu setelah tanam (BST). Perlakuan perendaman B1, B2, dan B3 menghasilkan jumlah daun yang berbeda nyata dibandingkan kontrol (B0), dengan nilai rata-rata masing-masing 10,34, 10,34, dan 10,15 helai, sedangkan kontrol hanya mencapai 9,23 helai (Tabel 2). Peningkatan jumlah daun pada perlakuan perendaman mencapai 11,34% dibandingkan kontrol, menunjukkan efektivitas bakteri rizosfer dalam menstimulasi pertumbuhan vegetatif tanaman kopi liberika.

Tabel 2. Uji jumlah daun pada kopi liberika

Perlakuan	Rata-rata jumlah daun		
	3 BST	4 BST	5 BST
Perlakuan Perendaman (B)			
B0	4.30a	6.01a	9.23a
B1	5.21a	7.12a	10.34b
B2	4.21a	6.23a	10.34b
B3	4.31a	6.50a	10.15b
Perlakuan Mikrokapsul (I)			
I0	4.25a	5.01a	9.21a
I1	5.13a	5.12a	9.34a
I2	4.21a	6.23a	9.34a
I3	4.31a	6.50a	9.15a

Note: angka-angka dalam kolom yang diikuti oleh huruf yang sama tidak berbeda secara signifikan berdasarkan uji anova pada tingkat $\alpha=5\%$.

Temuan ini sejalan dengan penelitian Warsito *et al.* (2024) yang melaporkan bahwa perendaman benih kopi arabika dengan suspensi bakteri rizosfer selama 6,5-8,5 jam mampu meningkatkan jumlah daun hingga 11,13 helai pada pengamatan 5 bulan setelah tanam, dibandingkan kontrol tanpa perendaman yang hanya mencapai 7,75 helai. Mekanisme peningkatan jumlah daun ini erat kaitannya dengan kemampuan bakteri rizosfer dari tanah erupsi Gunung Sinabung dalam menghasilkan hormon pemacu pertumbuhan, khususnya indole-3-acetic acid (IAA).

Bakteri rizosfer yang diisolasi dari tanah vulkanik Gunung Sinabung telah terbukti memiliki karakteristik unik sebagai *Plant Growth Promoting Rhizobacteria* (PGPR). Penelitian Sembiribg & Sabrina (2021) mengidentifikasi bahwa bakteri *Enterobacter cloacae* dari tanah andisol terdampak erupsi

Gunung Sinabung mampu meningkatkan kandungan nitrogen tanah hingga 111,76%. Bakteri rizosfer ini beradaptasi pada kondisi ekstrem tanah vulkanik yang mengandung abu dan memiliki pH rendah, sehingga memiliki ketahanan tinggi terhadap cekaman abiotik.

Produksi IAA oleh bakteri rizosfer merupakan mekanisme utama dalam meningkatkan pertumbuhan daun tanaman. IAA yang disintesis bakteri melalui jalur indole-3-pyruvate (IPA) dari prekursor triptofan akan merangsang pembelahan dan pemanjangan sel pada jaringan meristematik. Menurut Yuliatin (2020), isolat bakteri PGPR potensial dari rizosfer kopi arabika dan robusta mampu menghasilkan IAA dengan konsentrasi 88,12-104,6 µg/mL. Hormon ini kemudian diserap oleh akar tanaman dan ditranslokasikan ke jaringan tajuk, memicu diferensiasi tunas dan pembentukan primordial daun baru (Park *et al.*, 2021).

Kadar klorofil

Kadar klorofil pada daun di ukur saat 5 bulan saat tanam (BST), Interaksi variasi peredaman dan penambahan mikrokapsul memberi pengaruh nyata kepada pengamatan kadar klorofil daun pada tanaman kopi. Hasil uji Duncan ditunjuk pada tabel 3. Hasil penelitian menunjukkan bahwa perlakuan perendaman benih dalam suspensi bakteri rizosfer memberikan pengaruh nyata terhadap kandungan klorofil daun kopi Liberika. Perlakuan B0 (tanpa perendaman) menghasilkan kandungan klorofil terendah pada semua periode pengamatan (50,12; 53,87; dan 55,18 pada 3, 4, dan 5 BST), sedangkan perlakuan B3 (perendaman terlama) menunjukkan kandungan klorofil tertinggi (70,25; 74,11; dan 76,88 pada periode yang sama). Peningkatan kandungan klorofil ini mengindikasikan bahwa durasi perendaman yang lebih lama memberikan kesempatan lebih baik bagi bakteri rizosfer untuk mengkolonisasi permukaan benih, sehingga dapat memberikan efek stimulasi pertumbuhan yang optimal. Penelitian ini sejalan dengan hasil (Maxiselly *et al.*, 2023) menggunakan kulit kopi dan biofertilizer dengan hasil terbaik yang didapat 70.88 ICC.

Table 3. Uji Kadar Klorofil pada daun kopi liberika

Perlakuan	Rata-rata kadar Klorofil		
	3 BST	4 BST	5 BST
Perlakuan Perendaman (B)			
B0	50.12d	53.87d	55.18e
B1	54.30c	57.48c	58.74d
B2	55.89b	59.92c	60.74b
B3	70.25b	74.11b	76.88c
Penambahan Mikrokapsul (I)			
I0	51.45c	54.68d	56.21e
I1	57.20b	60.15d	62.32e
I2	65.83b	67.95c	69.31d
I3	75.04a	77.10b	79.16b

Note: angka-angka dalam kolom yang diikuti oleh huruf yang sama tidak berbeda secara signifikan berdasarkan uji anova pada tingkat $\alpha=5\%$

Mekanisme peningkatan klorofil melalui perendaman benih dengan bakteri rizosfer terkait dengan kemampuan Plant Growth Promoting Rhizobacteria (PGPR) dalam memproduksi fitohormon, terutama Indole Acetic Acid (IAA). Bakteri rizosfer dari tanah erupsi Gunung Sinabung telah terbukti memiliki kemampuan menghasilkan IAA yang dapat merangsang perkembangan sistem perakaran, meningkatkan penyerapan nutrisi, dan akhirnya memperbaiki biosintesis klorofil. Penelitian oleh Suriani *et al.* (2025) pada kopi Robusta menunjukkan bahwa konsorsium rizobakteri meningkatkan pertumbuhan tanaman dan kandungan fitokimia secara signifikan melalui produksi IAA, fiksasi nitrogen, dan pelarutan fosfor.

Penambahan mikrokapsul bakteri rizosfer menunjukkan respons yang lebih superior dibandingkan perlakuan perendaman. Perlakuan I3 dengan penambahan 15 gram mikrokapsul menghasilkan kandungan klorofil tertinggi (75,04; 77,10; dan 79,16 pada 3, 4, dan 5 BST), berbeda nyata dengan perlakuan I0 (kontrol tanpa mikrokapsul) yang hanya mencapai 51,45; 54,68; dan 56,21 pada periode yang sama. Peningkatan progresif ini menunjukkan bahwa teknologi mikroenkapsulasi efektif dalam mempertahankan viabilitas dan meningkatkan efisiensi pelepasan bakteri rizosfer secara terkontrol ke dalam tanah (Warsito *et al.*, 2024). Mikroenkapsulasi bakteri menggunakan bahan seperti alginat, gum arabic, dan inulin memberikan perlindungan terhadap sel bakteri

dari stres abiotik dan memastikan kelangsungan hidup bakteri dalam kondisi lapangan. Penelitian oleh Kaur *et al.* (2023) menunjukkan bahwa enkapsulasi biofertilizer berbasis fosfobakteri menggunakan rice bran dan gum Arabic meningkatkan umur simpan dan pelepasan bakteri secara terkontrol, yang pada akhirnya meningkatkan kolonisasi rizosfer dan efektivitas biofertilizer. Hal ini sejalan dengan hasil penelitian pada kopi Arabika di Indonesia yang menunjukkan bahwa mikrokapsul bakteri endofit penghasil IAA meningkatkan tinggi tanaman dan jumlah daun secara signifikan (Purba *et al.*, 2023; Marcial-Coba *et al.*, 2018).

Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian, dapat disimpulkan bahwa aplikasi mikrokapsul bakteri rizosfer sebagai biofertilizer dan perlakuan perendaman benih dengan suspensi bakteri rizosfer memberikan pengaruh yang signifikan terhadap pertumbuhan tanaman kopi liberika, khususnya pada luas daun dan kadar klorofil daun. Perlakuan terbaik diperoleh pada pemberian mikrokapsul dengan dosis 20 gram, yang menghasilkan luas daun terbesar dan kadar klorofil tertinggi, menunjukkan peningkatan proses fotosintesis dan potensi pertumbuhan tanaman yang lebih baik. Sementara itu, jumlah daun tidak dipengaruhi oleh dosis mikrokapsul, namun dipengaruhi oleh lama perendaman benih, dengan hasil optimal pada perendaman 11 jam. Hasil penelitian ini mendukung penggunaan biofertilizer berbasis bakteri rizosfer untuk meningkatkan pertumbuhan dan kesehatan tanaman kopi liberika, serta dapat menjadi alternatif ramah lingkungan dalam budidaya kopi di lahan gambut

Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada tim penelitian yang terlibat dalam pengambilan sampel tanah rizosfer di daerah erupsi Gunung Sinabung, Sumatera Utara. Penulis juga berterima kasih kepada semua pihak yang telah memberikan dukungan, waktu, dan masukan berharga sehingga penelitian ini dapat diselesaikan dengan baik.

Referensi

- Agustiyan, D., Dewi, T. K., Laili, N., Nditasari, A., & Antonius, S. (2021). Exploring biofertilizer potential of plant growth-promoting rhizobacteria candidates from different plant ecosystems. *Biodiversitas*, 22(5), 2691–2698. <https://doi.org/10.13057/biodiv/d220529>
- Dharmadewi, I. M. (2020). Analisis Kandungan Klorofil Pada Beberapa Jenis Sayuran Hijau Sebagai Alternatif Bahan Dasar Food Supplement. *Jurnal Emasains*, 9(2), 171–177. <https://doi.org/10.5281/zenodo.4299383>
- Fang, Z., & Bhandari, B. (2022). Encapsulation of bioactive compounds for food and agricultural applications. *Molecules*, 27(19), 6413. <https://doi.org/10.3390/molecules27196413>
- Fatimah, S., & Titisari, P. W. (2024). Pemberian POC Limbah Kulit Kopi dan Kitosan Terhadap Pre-Nursery Kopi Liberika (*Coffea liberica* Var. *Liberica*). *Jurnal Ilmiah Pertanian (JIPERTA)*, 6(2), 109–123. <https://doi.org/10.31289/jiperta.v6i2.4270>
- Fauziah, N. O., Rusdiono, N. N., Simarmata, T., & Fitriatin, B. N. (2022). Media Produksi Massal Pupuk Hayati Penambat N *Azotobacter* sp. dari Rizosfer di Indonesia Mass Production Media of Biofertilizer N Fixer *Azotobacter* sp. from Rhizosphere in Indonesia. *Terakreditasi RISTEKBRIN Peringkat SINTA*, 18(1), 2020. <https://doi.org/10.30598/jbdp.2022.18.1.13>
- Glick, B. R. (2012). Plant growth-promoting bacteria: Mechanisms and applications. *Scientifica*, 2012, 963401. <https://doi.org/10.6064/2012/963401>
- Handayani, A., Sutariati, G. A. K., Nurmas, A., & Sadimantara, G. R. (2024). Efektivitas Biopriming Mikroba Indigenos Asal Rizosfer Tanaman Kopi terhadap Viabilitas dan Vigor Benih Kopi (*Coffea robusta* L.) di Kabupaten Buton. *Berkala Penelitian Agronomi*, 12(2), 82–92. DOI: <https://doi.org/10.33772/bpa.v12i2.1415>
- Haniefan, N., & Basunanda, P. (2022).

- Eksplorasi dan Identifikasi Tanaman Kopi Liberika di Kecamatan Sukorejo, Kabupaten Kendal. *Vegetalika*, 11(1), 11–18. <https://doi.org/10.22146/veg.44325>
- Kaur, R., Kaur, S., Dwibedi, V., Kaur, C., Akhtar, N., & Alzahrani, A. (2023). Development and characterization of rice bran-gum Arabic based encapsulated biofertilizer for enhanced shelf life and controlled bacterial release. *Frontiers in Microbiology*, 14, 1267730. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2023.1267730>.
- Kazeem, M. O., Sorunke, T. A., Ahmed-El-Imam, A., & Zainudin, M. H. M. (2024). Impact of decomposing sawdust as an inoculum for promoting the composting of sawdust and chicken manure. *International Journal of Recycling of Organic Waste in Agriculture*, 13. <https://doi.org/10.57647/ijrowa-ty46-8z37>.
- Ma, Z., Wang, N., He, H., & Tang, X. (2016). Encapsulation and characterization of slow-release nitrogen fertilizer based on superabsorbent polymer. *Reactive and Functional Polymers*, 99, 87-94. <https://doi.org/10.1016/j.reactfunctpolym.2015.12.017>
- Rohman, F. A., & Taufika, R. (2024). Pengaruh Perendaman Zat Pengatur Tumbuh Giberelin (GA3) pada Perkecambahan Benih Kopi Arabika (*Coffea arabica* L.) Varietas S795. *Jurnal Agro Industri Perkebunan*, 11-18. <https://doi.org/10.25181/jaip.v12i1.3327>.
- Marcial-Coba, M. S., Soria-Delgado, L., & Yáñez-Altuna, J. M. (2018). Encapsulation Technologies of Plant Growth-Promoting Microorganisms and Microbial Biological Control Agents Against Plant Pathogenic Organisms. *Annual Plant Reviews online*, 397-436. <https://doi.org/10.1002/9781119312994.a.pr0731>.
- Maxiselly, Y., Nafy, F. R., & Anjarsari, I. R. D. (2023). Morphological trait variation of the immature liberica coffee (*Coffea liberica*) from West Java, Indonesia applied difference of coffee husk compost and biofertilizer. *Biodiversitas*, 24(11), 5988–5994. <https://doi.org/10.13057/biodiv/d241118>
- Nasrullah, N., Ibrahim, B., & Robbo, A. (2023). Pengaruh Pemberian Berbagai Macam Pupuk Organik Padat Terhadap Kemampuan Tanah Menyimpan Air. *AGrotekMAS Jurnal Indonesia: Jurnal Ilmu Peranian*, 4(2), 200–205. <https://doi.org/10.33096/agrotekmas.v4i2.336>
- Panichikkal, J., Prathap, G., Nair, R. A., & Krishnankutty, R. E. (2021). Evaluation of plant probiotic performance of *Pseudomonas* sp. encapsulated in alginate supplemented with salicylic acid and zinc oxide nanoparticles. *International Journal of Biological Macromolecules*, 166, 138–143. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.10.110>
- Park, S., Kim, A. L., Hong, Y. K., Shin, J. H., & Joo, S. H. (2021). A highly efficient auxin-producing bacterial strain and its effect on plant growth. *Journal, genetic engineering & biotechnology*, 19(1), 179. <https://doi.org/10.1186/s43141-021-00252-w>
- Pôrto, M. L., Alves, J. C., Souza, A. P., Araújo, R. C., & Arruda, J. A. (2014). Chlorophyll as a measure of plant health: Agroecological aspects. *Pesticidi i Fitomedicina*, 29(1), 21-34. <https://doi.org/10.2298/PIF1401021P>.
- Purba, I. G., Warsito, K., & Refnizuida, R. (2023). Escalation Of Coffee Plant (*Coffea arabica* L) By Addition Of Microcapsules From IAA (Indole Acetic Acid) Producing-Endophytic Bacteria. *Jurnal Pembelajaran dan Biologi Nukleus*, 9(1), 181-191. <https://doi.org/10.36987/jpbn.v9i1.3907>.
- Rasyidi, A. F., Sulistiani, R., & Bin, I. (2024). Kadar Klorofil Daun Bibit Kelor (*Moringa oleifera* L.) pada Berbagai Dosis Kompos. *AGRIUM: Jurnal Ilmu Pertanian*, 27(1). <https://doi.org/10.30596/agrium.v27i1.17486>
- Riyani, K., Widyaningsih, S., Nugroho, A. A., & Priyanto, G. (2020). Karakteristik dan aktivitas antioksidan kopi liberika. *Jurnal Kimia Sains dan Aplikasi*, 23(5), 166-171. <https://doi.org/10.14710/jksa.23.5.166-171>

- Rodriguez, H., Gonzalez, T., Goire, I., & Bashan, Y. (2004). Gluconic acid production and phosphate solubilization by the plant growth-promoting bacterium *Azospirillum* spp. *Naturwissenschaften*, 91(11), 552-555. <https://doi.org/10.1007/s00114-004-0567-8>
- Rokhmah, D. N., Dani, D., Sakiroh, S., Pranowo, D., & Sasmita, K. D. (2023). Pertumbuhan dan perkembangan tanaman kopi liberika (*Coffea liberica*) belum menghasilkan pada beberapa jenis pohon penang. *Jurnal AGRO*, 10(2), 231–241. <https://doi.org/10.15575/25202>
- Sabrina, T. (2021). Diversity of non-symbiotic nitrogen-fixing bacteria and their potential in andisols affected by the eruption of Mount Sinabung, North Sumatra, Indonesia. *Biodiversitas Journal of Biological Diversity*, 22(8). <https://doi.org/10.13057/biodiv/d220854>.
- Suriani, N. L., Al-Zharani, M., Nasr, F. A., Alneghery, L. M., Suprpta, D. N., Suarsana, I. N., Resiani, N. M. D., Enshasy, H. A. E., Sayyed, R., Barasarathi, J., Ho, T. S., & Yanti, Y. (2025). Rhizobacteria consortium improves growth, yield, and phytochemicals in Robusta coffee (*Coffea canephora* L.). *Frontiers in microbiology*, 16, 1602940. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2025.1602940>
- Yulianti, M., S, S., & Buhaira, B. (2022). Respons Pertumbuhan Bibit Kopi Liberika (*Coffea liberica* W. Bull Ex Hiern) Terhadap Aplikasi Pupuk Kandang Sapi Di Polybag. *Jurnal Agroecotania : Publikasi Nasional Ilmu Budidaya Pertanian*, 5(2), 23–34. <https://doi.org/10.22437/agroecotania.v5i2.23037>
- Warsito, K., Hafiz, M., Irawan, I., & Friski, F. I. (2024). Effectiveness of rhizosphere bacteria microcapsules on the growth of arabica coffee leaves (*Coffea arabica* L.). In *Proceedings of the 2nd Annual Dharmawangsa International Conference: Digital Technology and Environmental Awareness in Promoting Sustainable Behavior in Society 5.0* (pp. 402-411). Dharmawangsa University. DOI: <https://doi.org/10.46576/prosftik.v1i1.435>
- Warsito, K., Hafiz, M., Irawan, I., & Friski, F. I. (2024). Potential of rhizosphere bacteria microcapsules isolated from Sinabung volcano in stimulating arabica coffee growth (*Coffea arabica* L.). *International Journal of Research and Review*, 11(11), 481-488. <https://doi.org/10.52403/ijrr.20241148>
- Yadav, A. N., Verma, P., Kumar, S., Kumar, V., Kumar, M., Sugitha, T. C. K., Singh, B. P., Saxena, A. K., & Dhaliwal, H. S. (2021). Biofertilizers: An ecofriendly technology for nutrient recycling and environmental sustainability. *Current Research in Microbial Sciences*, 2, 100026. <https://doi.org/10.1016/j.crmicr.2021.100026>