

Endophytic Bacteria of Mangrove Roots from the West Coast of Lombok Island with Phosphate-Solubilizing and IAA-Producing Abilities as Biofertilizer Candidates

Lalu Zulkifli^{1*}, Rubiyatna Sakaroni¹, Dewa Ayu Citra Rasmi¹, Gde Cahyadi Wirajagat¹

¹Biology Education Program, Faculty of Teacher Training and Education, University of Mataram, Mataram, Indonesia

Article History

Received : November 06th, 2025

Revised : November 23th, 2025

Accepted : December 17th, 2025

*Corresponding Author:

Lalu Zulkifli,

Universitas Mataram, Mataram,
Indonesia;

Email: lalu_zulkifli@unram.ac.id

Abstract: Mangrove ecosystems are unique habitats with extreme environmental conditions that select for adaptive endophytic microorganisms, making them a potential source of plant growth-promoting bacteria (PGPB). Exploring the potential of endophytes as biofertilizers to reduce dependence on chemical fertilizers is crucial in the context of sustainable agriculture. This study aims to characterize the potential of mangrove root endophytic bacteria from the coast of Lombok as biofertilizer agents through the evaluation of Indole-3-Acetic Acid (IAA) hormone production and phosphate solubilization ability. Endophytic bacteria were isolated from roots, evaluated for IAA production using the Salkowski method, while phosphate solubilization ability was evaluated qualitatively on Pikovskaya agar and quantitatively in liquid culture using molybdenum blue spectrophotometry. Potential isolates were characterized morphologically to determine their bacterial genus. The results showed that all isolates produced IAA, with AV1 (51.52 ppm) and AV4 (42.86 ppm) categorized as high producers. Phosphate solubilization ability varied significantly, with AV1 showing the strongest activity (index 4.41), followed by M1 (1.93), while some isolates showed low to no activity. Quantitative tests showed a peak in dissolved phosphate on day 4, with M2 (18.20 ppm) and M1 (16.31 ppm) being the most efficient phosphate solubilizers. Phenotypic characterization identified all promising isolates (AV1, AV4, M1) as Gram-positive, rod-shaped bacteria belonging to the genus *Bacillus* sp. based on Bergey's Manual of Systematic Bacteriology. Overall, AV1, AV4, and M1 were identified as the most promising candidates for further development as biofertilizers.

Keywords: Mangrove endophytes; phosphate solubilization; Indole-3-Acetic Acid; plant growth promoting bacteria; biofertilizer.

Pendahuluan

Keseimbangan biologi tanah pada ekosistem pertanian saat ini menghadapi tekanan serius akibat meningkatnya degradasi lingkungan dan penggunaan pupuk kimia sintesis secara intensif. Pemupukan yang berlebihan menyebabkan penurunan aktivitas mikroorganisme menguntungkan, terganggunya struktur komunitas mikroba tanah, menurunnya kandungan bahan organik, serta risiko pencemaran air tanah akibat akumulasi nitrat dan fosfat (Tripathi et al.,

2020). Padahal, mikroorganisme tanah memiliki peran penting dalam menjaga dinamika ekosistem melalui proses biogeokimia seperti pelarutan fosfat, dekomposisi bahan organik, dan produksi metabolit yang mendukung pertumbuhan tanaman (Teymouri et al., 2016). Hal ini menegaskan perlunya alternatif pupuk hayati yang lebih ramah lingkungan dan mampu memperkuat fungsi mikroba tanah secara alami.

Selama ini, sebagian besar pengembangan biofertilizer berfokus pada

mikroba rizosfer, khususnya kelompok Plant Growth Promoting Rhizobacteria (PGPR), karena aktivitasnya dalam meningkatkan ketersediaan hara dan menghasilkan fitohormon (Sun & Shahrajabian, 2025; Wayan et al., 2024; Lebrazi et al., 2020). Namun, fokus yang terlalu besar pada mikroba rizosfer membuat potensi kelompok mikroba lain yakni bakteri endofit masih kurang mendapat perhatian, meskipun keduanya memiliki karakter fisiologis yang tidak terlalu berbeda ketika berasal dari jaringan akar. Bakteri endofit merupakan mikroorganisme yang hidup di dalam jaringan tanaman tanpa menimbulkan gejala penyakit pada inangnya, dan banyak di antaranya memiliki kemampuan khas seperti melarutkan fosfat, menghasilkan hormon pertumbuhan IAA, dan memproduksi metabolit sekunder bioaktif (Fouda et al., 2021). Endofit akar sering menunjukkan stabilitas fisiologis yang lebih tinggi dibanding mikroba rizosfer karena terlindungi oleh jaringan inangnya, serta memiliki interaksi lebih erat dalam memfasilitasi penyerapan hara dan stimulasi pertumbuhan tanaman.

Selain itu, bakteri endofit dari ekosistem mangrove memiliki keunggulan tambahan berupa kemampuan beradaptasi pada kondisi lingkungan ekstrem seperti salinitas tinggi, fluktuasi pH, dan kadar oksigen rendah. Adaptasi tersebut menyebabkan mikroba endofit mangrove sering menunjukkan aktivitas metabolik yang unik dan lebih tahan terhadap cekaman dibandingkan bakteri tanah dari lingkungan biasa. Sejumlah penelitian melaporkan bahwa bakteri dari tanaman budidaya maupun tumbuhan di hutan yang termasuk kelompok endofit akar, seperti *Bacillus*, *Pseudomonas*, *Enterobacter*, *Azospirillum*, dan *Micrococcus*, memiliki kemampuan untuk memproduksi IAA dan melarutkan fosfat (Bhandari et al., 2025; Prasgi & Cahyani, 2025; Khan et al., 2016), meskipun sebagian studi menunjukkan nilai aktivitas yang masih rendah hingga sedang. Temuan tersebut mengindikasikan masih terbatasnya penelitian eksplorasi bakteri penghasil IAA dan pelarut fosfat yang diisolasi dari lingkungan ekstrim. Sehingga perlunya eksplorasi lanjutan untuk menemukan isolat-isolat unggul dengan aktivitas fisiologis yang lebih kuat dan khas.

Indonesia memiliki potensi besar dalam

eksplorasi mikroba mangrove, termasuk di Pulau Lombok yang memiliki ekosistem pesisir dengan variasi salinitas, pH tanah, dan kondisi redoks yang beragam. Namun, sebagian besar penelitian sebelumnya tentang bakteri endofit di Indonesia masih berfokus pada isolat dari tanaman hutan maupun tanaman budidaya, dengan tujuan utama sebagai agen antagonis. Penelitian Aisyah et al., (2023) berhasil mengisolasi bakteri endofit dengan kemampuan antagonis terhadap *Escherichia coli*, *Staphylococcus epidermidis*, dan *Candida albicans*. Ramadhani et al., (2021) juga berhasil mengisolasi strain jamur endofit dari daun, tangkai daun, dan batang *Moringa oleifera*. Penelitian Nur et al., (2024) menunjukkan bakteri endofit dari akar cabai cayenne menunjukkan potensi sebagai biopestisida karena kemampuannya memproduksi siderofor dan menghambat pertumbuhan bakteri patogen tumbuhan *Ralstonia solanacearum*. Meskipun studi-studi tersebut memberikan kontribusi terhadap pemahaman fungsi antagonisme, eksplorasi kemampuan fisiologis lain—seperti produksi Indole Acetic Acid (IAA) dan pelarutan fosfat yang berperan langsung dalam peningkatan ketersediaan hara masih sangat terbatas. Terlebih lagi, penelitian mengenai bakteri endofit yang berasal dari akar mangrove dan memiliki potensi sebagai biofertilizer berbasis mikroba lokal masih jarang dilakukan.

Mengingat kondisi lingkungan pesisir yang ekstrem dan heterogen, bakteri endofit akar mangrove berpotensi memiliki kemampuan metabolik yang lebih adaptif dibandingkan isolat dari tanaman daratan. Oleh karena itu, eksplorasi bakteri endofit mangrove menjadi langkah strategis untuk menemukan mikroba yang mampu meningkatkan ketersediaan fosfat melalui mekanisme pelarutan senyawa fosfat tidak larut serta menghasilkan IAA untuk merangsang pertumbuhan perakaran. Pendekatan ini relevan untuk mengatasi degradasi tanah dan mengurangi ketergantungan pada pupuk kimia sintetis melalui pemanfaatan mikroba lokal yang lebih ramah lingkungan. Dengan demikian, penelitian ini difokuskan pada karakterisasi bakteri endofit dari akar mangrove di pesisir Lombok sebagai kandidat biofertilizer yang adaptif, efisien, dan

berpotensi diterapkan pada lahan marginal.

Bahan dan Metode

Jenis penelitian ini adalah deskriptif observasional yang dilaksanakan pada April hingga Oktober 2025. Penelitian berfokus pada eksplorasi serta identifikasi fenotip bakteri endofit akar mangrove yang paling berpotensi memiliki kemampuan menghasilkan IAA dan melarutkan fosfat. Pengujian kemampuan isolat dalam melarutkan fosfat serta menghasilkan hormon Indole-3-Acetic Acid (IAA) dilakukan pada laboratorium Pendidikan biologi, Universitas Mataram.

Lokasi Pengambilan Sampel dan Faktor Lingkungan

Penelitian ini dilakukan pada ekosistem mangrove di pesisir Lombok Bara sebagai lokasi pengambilan sampel akar. Sampel akar mangrove diambil secara purposive dari beberapa titik yang mewakili perbedaan kondisi lingkungan. Akar yang dikoleksi merupakan akar lateral berukuran $\pm 5-10$ cm dengan kondisi sehat, tidak terluka, dan bebas kontaminasi visual. Setiap sampel dimasukkan ke dalam kantong steril, disimpan dalam kotak pendingin untuk menjaga kestabilan mikroba, dan segera dibawa ke laboratorium untuk proses isolasi (Maulidia et al., 2021).

Isolasi Bakteri Endofit Akar Mangrove

Tahap isolasi bakteri endofit akar mangrove diawali dengan proses sterilisasi permukaan untuk memastikan bahwa bakteri yang diperoleh benar-benar berasal dari jaringan internal akar. Akar yang telah dibersihkan dari tanah dicuci menggunakan akuades steril, kemudian direndam dalam larutan etanol 70% selama 1 menit, diikuti dengan perlakuan NaOCl 5% selama 3 menit, dan kembali dibilas dengan akuades steril sebanyak 3–5 kali untuk menghilangkan sisa bahan sterilan. Keberhasilan sterilisasi permukaan diuji dengan menekan potongan akar pada permukaan media Nutrient Agar (NA); bila tidak muncul pertumbuhan koloni setelah inkubasi, proses sterilisasi dianggap efektif (Utami & Munarti, 2020). Akar yang telah steril kemudian dipotong kecil-kecil (± 1 cm), dihancurkan atau ditekan menggunakan mortar steril hingga menghasilkan suspensi jaringan, lalu diinokulasikan pada media NA

menggunakan metode streak plate. Cawan diinkubasi pada suhu ruang selama 24–48 jam hingga koloni bakteri endofit muncul (Silvani et al., 2008). Koloni dengan morfologi berbeda kemudian dimurnikan melalui streak berulang dan disimpan sebagai kultur murni untuk digunakan pada tahap uji pelarutan fosfat, produksi IAA, dan identifikasi fenotipik.

Uji Produksi Indole-3-Acetic Acid (IAA)

Uji produksi Indole Acetic Acid (IAA) dilakukan dengan menumbuhkan setiap isolat bakteri endofit pada media Nutrient Broth (NB) yang telah ditambahkan prekursor L-triptofan sebanyak 00,5% sebagai sumber indol. Kultur diinkubasi pada suhu ruang atau inkubator shaker (200 rpm) selama 48–72 jam agar produksi IAA berlangsung optimal. Setelah inkubasi, kultur disentrifugasi pada 10.000 rpm selama 10 menit untuk memisahkan sel bakteri dari supernatan. Supernatan jernih kemudian diambil sebanyak 1 mL dan dicampur dengan 2 mL reagen Salkowski, selanjutnya diinkubasi selama 30 menit pada kondisi gelap. Pembentukan warna merah muda hingga merah tua menunjukkan adanya produksi IAA oleh isolat. Konsentrasi IAA diukur menggunakan spektrofotometer UV-Vis pada panjang gelombang 530 nm, kemudian nilai absorbansi dibandingkan dengan kurva standar IAA untuk menentukan konsentrasi hormon yang dihasilkan oleh masing-masing isolat (Ambawade et al., 2024; Khiangnam et al., 2023).

Uji Potensi Bakteri Endofit Pelarut Fosfat

Uji pelarutan fosfat secara kualitatif dilakukan dengan menumbuhkan isolat bakteri endofit akar pada media Pikovskaya Agar (PVK) yang mengandung sumber fosfat anorganik tidak larut ($\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$). Setiap isolat diinokulasikan secara titik pada permukaan media dan diinkubasi selama 5–7 hari pada suhu 30°C. Aktivitas pelarutan fosfat diamati melalui munculnya zona bening (clear zone) di sekitar koloni sebagai hasil pelarutan fosfat oleh senyawa organik yang dihasilkan bakteri. Indeks pelarutan fosfat (Phosphate Solubilization Index/PSI) kemudian dihitung dengan menggunakan rumus:

$$IKF = \frac{\text{Diameter koloni} + \text{Zona bening}}{\text{Diameter koloni}}$$

Sementara itu, uji pelarutan fosfat secara kuantitatif dilakukan pada media cair Pikovskaya Broth untuk isolat yang menunjukkan zona bening pada uji kualitatif. Isolat diinokulasikan ke dalam media cair dan diinkubasi menggunakan shaker pada 200 rpm selama 10 hari. Setelah inkubasi, kultur disentrifugasi pada 10.000 rpm selama 10 menit untuk memperoleh supernatan bebas sel. Konsentrasi fosfat terlarut kemudian diukur menggunakan metode kolorimetri molibdenum blue dengan spektrofotometer pada panjang gelombang 880 nm. Nilai absorbansi yang diperoleh dibandingkan dengan kurva standar KH_2PO_4 untuk menentukan jumlah fosfat yang berhasil dilarutkan oleh isolat. Uji kuantitatif ini digunakan untuk memastikan kemampuan pelarutan fosfat secara lebih akurat dan menjadi dasar seleksi isolat paling potensial sebagai kandidat biofertilizer (Kumar et al., 2024).

Identifikasi Fenotipik

Pengamatan morfologi koloni dilakukan pada medium Nutrient Agar setelah masa inkubasi 48 jam, dengan menilai karakter visual seperti bentuk koloni (circular, irregular), elevasi (flat, convex), tepian (entire, undulate), warna, tekstur permukaan, serta kejernihan atau opasitas koloni. Selain itu, identifikasi fenotipik diperkuat melalui pengamatan bentuk sel menggunakan pewarnaan Gram. Preparat dibuat dari koloni tunggal, kemudian dilakukan proses pewarnaan menggunakan kristal violet, lugol, alkohol 96%, dan safranin untuk membedakan antara bakteri Gram positif dan Gram negatif berdasarkan perbedaan struktur dinding selnya. Pengamatan mikroskopis dengan minyak emersi dilakukan untuk menentukan warna sel setelah pewarnaan (ungu untuk Gram positif dan merah muda untuk Gram negatif) serta bentuk sel (kokus, basil, atau variasi lainnya) (Michael et al., 2017; Holt et al., 1994). Identifikasi fenotipik ini memberikan informasi dasar mengenai karakter bakteri endofit yang diisolasi.

Hasil dan Pembahasan

Faktor Lingkungan Lokasi Pengambilan Sampel

Ekosistem mangrove di Bagek Kembar, Kecamatan Sekotong, Kabupaten Lombok Barat, memiliki komposisi vegetasi khas pesisir tropis

yang terdiri atas empat famili dan sembilan spesies mangrove mayor, seperti *Avicennia alba*, *Rhizophora apiculata*, *Rhizophora mucronata*, *Avicennia marina* hingga *Sonneratia caseolaris*, serta satu spesies minor yaitu *Excoecaria agallocha*. Genus dominan seperti *Rhizophora* sp, dan *Avicennia* sp. dipilih sebagai lokasi pengambilan sampel akar karena keduanya memiliki penyebaran luas, sistem perakaran kompleks, dan kemampuan fisiologis yang mendukung terbentuknya kondisi internal akar yang khas bagi kolonisasi bakteri endofit. Struktur perakaran mangrove yang unik mulai dari akar napas hingga akar tunjang menciptakan zona internal jaringan akar yang mampu menyeleksi mikroorganisme tertentu untuk hidup secara endofitik tanpa menimbulkan gejala penyakit. Lingkungan perakaran yang lembap, fluktuasi salinitas, serta keberadaan metabolit sekunder khas mangrove menjadikan jaringan akar sebagai habitat yang memiliki seleksi alam kuat (Hao et al., 2020), sehingga hanya bakteri yang memiliki toleransi osmotik tinggi, ketahanan fisiologis, dan kemampuan metabolik tertentu yang mampu bertahan sebagai endofit.

Tabel 1. Parameter Lingkungan dan *Total Plate Count*

No	Faktor Lingkungan	
1	Ketinggian (m)	1,02
2	Intensitas cahaya (lux)	2.116
3	Kelembaban tanah (%)	69,12
4	Tempratur tanah (°C)	30,2
5	Salinitas (%)	11,9
6	pH tanah	6,4
7	TPC (<i>Total Plate Count</i>) Endofit	$2,1 \times 10^5$

Sumber data primer diolah tahun 2025

Hasil pengukuran parameter lingkungan pada ekosistem mangrove pesisir menunjukkan karakteristik khas habitat salin yang cenderung ekstrem bagi sebagian besar mikroorganisme. Nilai intensitas cahaya yang mencapai 2.116 lux dan suhu tanah sebesar 30,2°C menggambarkan kondisi pesisir yang terbuka dan panas, sementara kelembaban tanah yang tinggi (69,12%) merupakan ciri umum substrat mangrove yang jenuh air. Faktor pembeda paling dominan adalah tingkat salinitas tanah sebesar 11,9%, yang mencerminkan lingkungan

hipersalin dengan tekanan osmotik tinggi. Kondisi ini, bersama dengan pH tanah yang sedikit asam (6,4), secara ekologis hanya dapat dihuni oleh mikroba yang memiliki kemampuan adaptasi fisiologis khusus, terutama bakteri halotoleran dan halofilik (Palit et al., 2022).

Nilai TPC endofit sebesar $2,1 \times 10^5$ cfu/g menunjukkan kepadatan bakteri endofit yang tergolong rendah jika dibandingkan dengan penelitian lain pada tanaman non-mangrove atau lingkungan pertanian normal, yang umumnya melaporkan TPC endofit berkisar 10^6 – 10^8 cfu/g (Pašakinskienė et al., 2024; Dong et al., 2018). Perbedaan ini sangat dipengaruhi oleh tekanan lingkungan ekstrem pada ekosistem mangrove, seperti salinitas tinggi, fluktuasi redoks tanah, aerasi yang terbatas, dan ketersediaan nutrisi yang rendah. Faktor-faktor tersebut menyebabkan hanya kelompok mikroba tertentu yang mampu berkolonisasi secara stabil di dalam jaringan akar.

Selain itu, jaringan akar mangrove memiliki struktur fisiologis khusus, termasuk keberadaan senyawa metabolit sekunder dan mekanisme eksklusi garam yang dapat menekan kolonisasi mikroba yang tidak adaptif. Hal ini menyebabkan jumlah bakteri endofit yang berhasil memasuki jaringan internal akar menjadi lebih sedikit dibandingkan tanaman darat yang tumbuh pada lingkungan non-ekstrem. Kondisi ini juga menunjukkan bahwa mikroba yang berhasil bertahan sebagai endofit pada mangrove kemungkinan memiliki adaptasi metabolik yang unik, seperti toleransi garam tinggi, kemampuan osmoregulasi, produksi senyawa kompatibel osmolit, atau aktivitas enzimatis khusus (Lemos-Lucumí et al., 2025; Subedi et al., 2022).

Potensi Bakteri Penghasil IAA

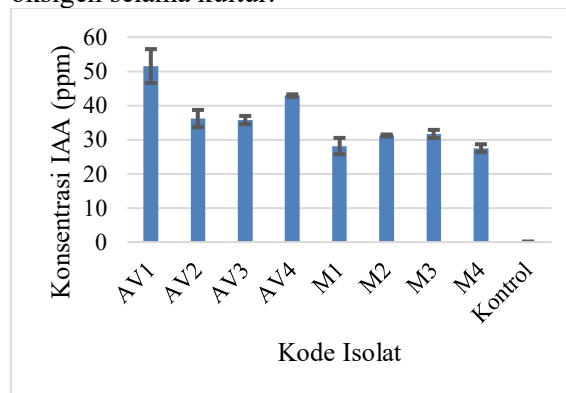
Hormon Indole Acetic Acid (IAA) merupakan salah satu auksin utama yang berperan penting dalam mengatur pertumbuhan dan perkembangan tanaman, termasuk pemanjangan sel, pembelahan, diferensiasi jaringan, serta pembentukan akar lateral. Banyak bakteri pemacu pertumbuhan tanaman (Plant Growth-Promoting Rhizobacteria/PGPR) mampu memproduksi IAA melalui jalur metabolisme triptofan yang diperoleh dari eksudat akar (B. Zhang et al., 2021). Produksi IAA oleh bakteri ini memberikan keuntungan bagi tanaman karena dapat meningkatkan

penyerapan nutrisi, memperbaiki arsitektur akar, serta memperkuat toleransi terhadap cekaman lingkungan.



Gambar 1. Hasil Uji Salkowski Isolat Bakteri Endofit

Hasil uji Salkowski isolat bakteri endofit menunjukkan reaksi positif produksi IAA oleh semua isolat endofit (AV1, AV2, AV4, M3) dibandingkan kontrol (K) yang hampir tidak berwarna; secara visual AV1 dan AV4 memperlihatkan intensitas jingga-pekak paling kuat, AV2 sedang, dan M3 lebih lemah. Warna merah muda-jingga ini menandakan keberadaan senyawa indolik (termasuk IAA) yang bereaksi dengan reagen Salkowski, sehingga secara semi-kuantitatif isolat AV1/AV4 dapat dikategorikan sebagai produsen IAA tinggi, AV2 sedang, dan M3 rendah. Secara biologis, perbedaan intensitas ini mencerminkan kapasitas genetik dan fisiologis masing-masing isolat dalam mengkonversi triptofan menjadi IAA melalui jalur-jalur seperti indole-3-pyruvat (IPA) atau indole-3-acetamide (IAM) (P. Zhang et al., 2019), serta dipengaruhi oleh ketersediaan prekursor, waktu inkubasi, pH, dan kondisi oksigen selama kultur.



Gambar 2. Konsentrasi IAA oleh Isolat Bakteri Endofit

Data menunjukkan bahwa produksi IAA oleh isolat endofit bervariasi tetapi cenderung berkumpul pada kisaran menengah. Nilai IAA tertinggi dicatat oleh AV1 (51,52 ppm), diikuti AV4 (42,86 ppm), AV2 (36,14 ppm), AV3 (35,73 ppm) dan isolat M1–M4 berada di kisaran 28–31 ppm. Jika menggunakan skema kategori sederhana (rendah <20 ppm; sedang 20–40 ppm; tinggi 41–50 ppm; sangat tinggi >50 ppm) (Fatimah et al., 2022), maka AV1 masuk kategori sangat tinggi, AV4 tinggi, AV2/AV3 sedang–tinggi, dan isolat M kebanyakan sedang. Pola ini mengindikasikan ada isolat endofit yang mampu mensintesis IAA dalam jumlah signifikan hingga cukup untuk berpengaruh pada morfogenesis akar, tetapi juga banyak yang menghasilkan IAA pada tingkat moderat yang umumnya aman dan bermanfaat bagi tanaman.

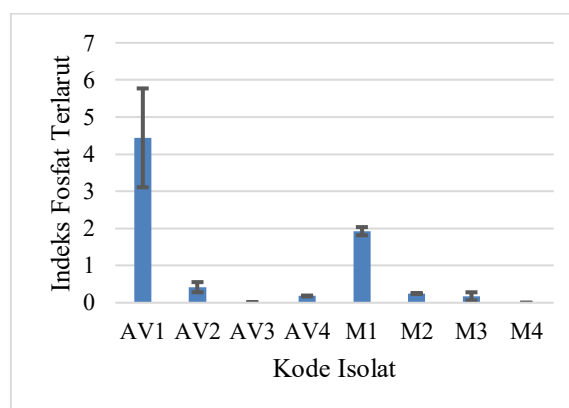
Variasi tersebut berkaitan dengan faktor genetik dan lingkungan mikroorganisme. Produksi IAA pada bakteri bergantung pada keberadaan dan ekspresi gen jalur biosintesis IAA (misalnya jalur indole-3-pyruvate/IPA, indole-3-acetamide/IAM), efisiensi enzim kunci (aminotransferase, indole-3-acetamide hydrolase), serta ketersediaan prekursor triptofan dalam medium (P. Zhang et al., 2019). Endofit yang hidup di dalam jaringan tanaman seringkali memiliki akses relatif stabil ke prekursor yang disuplai oleh inang, dan beberapa strain telah berevolusi memproduksi IAA untuk memodulasi permeabilitas jaringan dan memfasilitasi kolonisasi. Hal ini menjelaskan mengapa beberapa endofit (AV1, AV4) menunjukkan produksi tinggi. Namun, regulasi produksi IAA juga dipengaruhi kondisi kultur (pH, waktu inkubasi, kepadatan sel) dan kecepatan katabolisme IAA oleh mikroba itu sendiri, sehingga pengukuran kuantitatif harus selalu dikaitkan dengan protokol kultur yang konsisten.

Dari segi aplikasi, isolat dengan produksi sedang sampai tinggi (20–50 ppm) umumnya paling menarik sebagai kandidat biofertilizer karena dapat merangsang pembentukan akar lateral dan peningkatan penyerapan hara tanpa menimbulkan efek fitotoksik akibat overproduksi auksin. Isolat sangat tinggi (>50 ppm) seperti AV1 perlu diuji lebih lanjut pada tanaman uji dengan seri dosis untuk memastikan efek fisiologisnya. Produksi IAA yang berlebihan dapat menyebabkan pemanjangan abnormal atau hambatan pertumbuhan pada

konsentrasi tertentu (Wang et al., 2025). Secara praktis, isolat-endofit unggul memiliki keuntungan operasional. Keterikatan dekat pada jaringan tanaman memungkinkan pengiriman hormon langsung ke organ target dan stabilitas di dalam jaringan, sehingga dosis inokulum dapat lebih rendah dibandingkan inokulasi rhizosfer.

Potensi Bakteri Pelarut Fosfat

Ketersediaan fosfor di tanah umumnya sangat terbatas karena sebagian besar terikat dalam bentuk senyawa organik maupun anorganik yang tidak larut (Hawkesford et al., 2012). Mikroba lokal yang berasal dari endofit akar, memiliki kemampuan untuk melarutkan fosfat melalui mekanisme sekresi asam organik dan enzim fosfatase, sehingga mengubah fosfat terikat menjadi bentuk tersedia bagi tanaman (Emami et al., 2020).

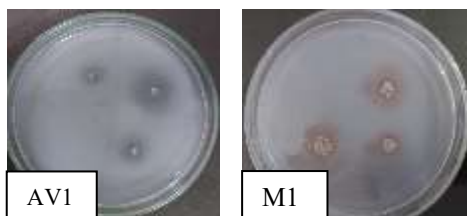


Gambar 3. Indeks Fosfat Terlarut Bakteri Endofit Akar Mangrove

Gambar 3 dan 4 menunjukkan variasi kemampuan bakteri endofit dalam melarutkan fosfat, yang ditunjukkan oleh nilai indeks fosfat terlarut. Secara umum, terdapat perbedaan mencolok antar-isolat, mulai dari kategori sangat tinggi hingga sangat rendah. Isolat AV1 menonjol dengan indeks fosfat terlarut sekitar 4,41, termasuk dalam kategori sangat kuat. Nilai ini menunjukkan bahwa AV1 memiliki mekanisme pelarutan fosfat yang sangat efisien, kemungkinan melalui produksi tinggi asam organik (misalnya asam glukonat atau asam sitrat) serta aktivitas enzim fosfatase yang intensif (Kaur et al., 2021). Isolat dengan kapasitas setinggi ini berpotensi besar dikembangkan sebagai kandidat biofertilizer karena mampu menyediakan fosfor dalam

jumlah signifikan bagi tanaman. Isolat M1 juga menunjukkan aktivitas kuat dengan indeks fosfat sekitar 1,93, yang masuk dalam kategori tinggi. Hal ini menandakan bahwa M1 memiliki mekanisme pelarutan fosfat yang cukup aktif, meskipun tidak seintensif AV1. Perbedaan tingkat kemampuan ini dapat dikaitkan dengan variasi regulasi metabolisme dan kapasitas genetik antar-isolat dalam menghasilkan enzim pelarut fosfat (Suleman et al., 2018).

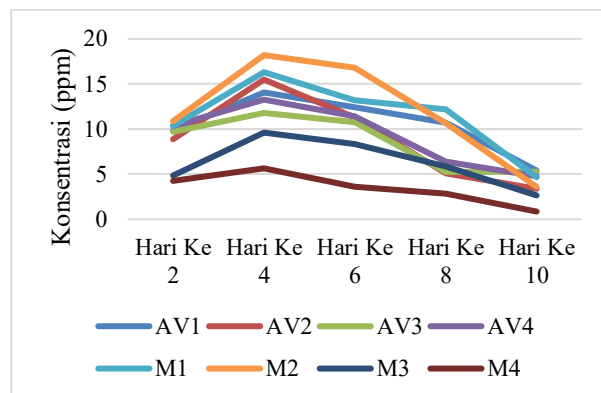
Sementara itu, isolat lain seperti AV2, AV4, M2, dan M3 hanya memiliki indeks berkisar antara 0,2–0,5, yang masuk dalam kategori rendah. Aktivitas pelarutan fosfat dari kelompok ini kemungkinan terbatas karena rendahnya produksi metabolit pelarut atau ketidakmampuan mereka untuk tumbuh optimal pada medium selektif fosfat tidak larut. Adapun isolat AV3 dan M4 bahkan tidak menunjukkan aktivitas pelarut fosfat (indeks mendekati nol), sehingga dapat dikategorikan tidak aktif dalam mekanisme ini. Meski demikian, isolat tersebut tetap berpotensi berperan dalam fungsi lain, misalnya produksi hormon pertumbuhan atau aktivitas antagonistik terhadap patogen.



Gambar 4. Hasil Uji Pelarut Fosfat secara Kualitatif dengan Media Pikovskaya

Bakteri endofit umumnya memiliki kemampuan rendah dalam melarutkan fosfat karena mereka hidup di dalam jaringan tanaman, di mana fosfor sudah tersedia dalam bentuk yang lebih mudah diakses melalui sistem transportasi tanaman (Walia et al., 2017). Kondisi ini membuat tekanan seleksi untuk memproduksi metabolit pelarut fosfat, seperti asam organik atau enzim fosfatase, menjadi rendah sehingga kemampuan tersebut tidak terasah. Sebaliknya, penelitian Chawngthu et al., (2020) menunjukkan bakteri rhizosfer berhadapan langsung dengan fosfat tanah yang sebagian besar tidak larut, sehingga mereka beradaptasi dengan menghasilkan senyawa pelarut fosfat untuk bertahan hidup dan memanfaatkan sumber

nutrisi. Akibatnya, aktivitas pelarut fosfat pada endofit umumnya lebih rendah dibandingkan rhizosfer, dan peran utama endofit lebih terfokus pada fungsi lain seperti produksi hormon pertumbuhan, peningkatan ketahanan tanaman terhadap stres, atau perlindungan terhadap patogen.



Gambar 4. Konsentrasi P Terlarut secara Kuantitatif oleh Bakteri Endofit Mangrove

Gambar 4 memperlihatkan pola dinamis yang seragam antar-isolat endofit. Peningkatan cepat menuju puncak pada hari ke-4, diikuti penurunan bertahap hingga hari ke-10. Secara kuantitatif, isolat M2 menunjukkan puncak tertinggi (18,20 ppm), diikuti M1 (16,31 ppm), AV2 (15,49 ppm), dan AV1, AV4 serta AV3 di rentang menengah, sedangkan M4 menonjol sebagai yang terendah. Kenaikan awal mencerminkan periode aktif metabolik di mana mikroba memproduksi metabolit pelarut fosfat seperti asam organik atau enzim fosfatase yang melepaskan P terikat dari mineral atau senyawa organik. Fase ini biasanya bertepatan dengan fase eksponensial pertumbuhan sel bakteri.

Penurunan konsentrasi setelah hari ke-4 kemungkinan besar disebabkan oleh kombinasi beberapa mekanisme biologis dan kimia medium. Pertama, prekursor (substrat fosfat tidak larut atau sumber karbon untuk produksi asam) dapat habis sehingga laju pelarutan menurun (Sánchez-González et al., 2022). Kedua, akumulasi asam organik dapat memicu perubahan pH medium yang selanjutnya menyebabkan re-presipitasi fosfat sebagai garam lain seperti kompleks Ca-P) atau adsorpsi pada dinding sel/bahan organik sehingga terukur turun di fase stasioner (Wang et al., 2022). Ketiga, sebagian P terlarut mungkin diambil kembali

oleh sel bakteri untuk kebutuhan metabolik atau teradsorpsi ke biomass, sehingga kadar terlarut dalam supernatan turun meski total P yang dimobilisasi tetap ada dalam sistem (Sánchez-González et al., 2022).

Perbedaan antar-isolat mencerminkan keragaman genetik dan kapasitas fisiologis: AV3 kemungkinan memiliki jalur sekresi asam organik dan/atau aktivitas fosfatase yang lebih kuat atau lebih cepat terinduksi oleh kondisi kultur, sementara M4 mungkin kekurangan regulasi atau enzim yang efisien.

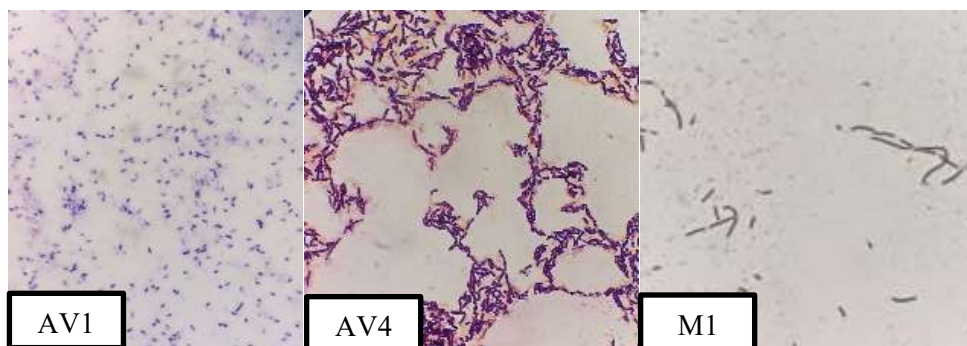
Karakter Morfologi Isolat Potensial

Isolat AV1, AV4, dan M1 dipilih untuk dianalisis lebih lanjut secara fenotipik karena ketiganya menunjukkan kinerja fisiologis paling unggul dibandingkan isolat lainnya. AV1 dan

AV4 menampilkan kemampuan produksi IAA yang tinggi, sehingga berpotensi memberikan pengaruh signifikan terhadap stimulasi pertumbuhan akar dan perkembangan tanaman. Sementara itu, isolat M1 menunjukkan aktivitas pelarutan fosfat terbaik, ditunjukkan oleh zona bening yang luas pada uji kualitatif serta konsentrasi fosfat terlarut yang lebih tinggi pada uji kuantitatif. Kombinasi kedua mekanisme ini menjadikan ketiga isolat tersebut kandidat paling potensial sebagai biofertilizer. Oleh karena itu, identifikasi fenotipik melalui karakter morfologi diprioritaskan pada isolat AV1, AV4, dan M1 yang dapat mendukung penentuan identitas awal sebelum dilakukan identifikasi molekuler lebih lanjut.

Tabel 2. Karakterisasi morfologi isolat bakteri endofit dan rhizosfer

Kode isolat	Bentuk	Margin	Elevasi	Tekstur	Warna	Ukuran	Gram
AV1	Irregular	Undulate	Raised	Berlendir	Putih	Large	Positif
AV4	Circular	Curled	Flat	Halus	Putih	Moderate	Positif
M1	Circular	Entire	Raised	Halus	Putih	Small	Positif



Gambar 5. Morfologi sel dan pewarnaan gram isolat bakteri terpilih (perbesaran 1000x)

Berdasarkan hasil karakterisasi morfologi koloni dan pewarnaan Gram, tiga isolat bakteri endofit akar mangrove AV1, AV4, dan M1 menunjukkan variasi fenotipik yang mencerminkan kemampuan adaptasi terhadap kondisi mangrove yang bersalinitas tinggi. Isolat AV1 memiliki koloni berukuran besar dengan bentuk irregular, margin undulate, dan tekstur berlendir, sedangkan AV4 dan M1 memiliki karakter koloni yang lebih teratur, masing-masing circular dengan tekstur halus dan ukuran koloni sedang hingga kecil. Pewarnaan Gram menunjukkan bahwa seluruh isolat merupakan basil Gram positif, ditandai dengan warna ungu

pada preparat mikroskopis. AV1 memperlihatkan basil Gram positif berukuran kecil hingga sedang dengan penyebaran tidak beraturan, sementara AV4 menunjukkan basil Gram positif yang membentuk rantai panjang. M1 tampak sebagai basil Gram positif berukuran lebih kecil yang tersusun sebagai sel tunggal atau rantai pendek.

Menurut Bergey's Manual of Systematic Bacteriology (Holt et al., 1994), pola fenotipik seperti koloni berwarna putih, bentuk batang, serta kemampuan membentuk rantai pada beberapa isolat konsisten dengan kelompok bakteri Gram positif endofitik yang umum

ditemukan pada lingkungan salin, seperti anggota famili Bacillaceae. Ciri-ciri ini mengindikasikan bahwa ketiga isolat memiliki dinding sel peptidoglikan tebal yang mendukung ketahanan terhadap tekanan osmotik, sehingga memungkinkan kolonisasi jaringan internal akar mangrove.

Kesimpulan

Penelitian ini berhasil mengisolasi dan mengkarakterisasi bakteri endofit akar mangrove dari ekosistem pesisir Lombok Barat sebagai kandidat biofertilizer berbasis mikroba lokal. Analisis parameter lingkungan menunjukkan bahwa kondisi mangrove yang bersalinitas tinggi, lembap, dan memiliki pH serta nutrisi yang fluktuatif menghasilkan seleksi alam kuat sehingga hanya bakteri dengan kemampuan fisiologis adaptif yang mampu berkolonisasi secara endofitik. Uji biologis menunjukkan bahwa beberapa isolat memiliki potensi unggul pada mekanisme pemacu pertumbuhan tanaman. Isolat AV1 menunjukkan kemampuan pelarutan fosfat sangat kuat secara kualitatif dengan indeks sebesar 4,41, sedangkan isolat M1 memiliki kemampuan pelarut fosfat kuat dengan dukungan aktivitas kuantitatif yang tinggi. Pada mekanisme produksi hormon pertumbuhan, isolat AV1 dan AV4 menghasilkan konsentrasi IAA tertinggi (51,52 ppm dan 42,86 ppm), menunjukkan kapasitas signifikan untuk merangsang pembentukan akar lateral dan peningkatan penyerapan hara. Secara morfologi dan fenotip, isolat AV1, AV4, dan M1 merupakan basil Gram positif yang sesuai dengan kelompok bakteri *Bacillus* sp. dengan karakter yang mendukung kelayakan fisiologisnya untuk diaplikasikan sebagai biofertilizer.

Ucapan Terima Kasih

Para penulis mengucapkan terima kasih kepada Lembaga Penelitian dan Pengabdian Masyarakat (LPPM), Universitas Mataram atas dukungan dana penelitian yang diberikan kepada LZ melalui PNPB UNRAM dengan nomor kontrak 3041/UN18.L1/PP/2025.

Referensi

Aisyah, N., Zulkifli, L., & Rasmi, D. (2023).

Isolation of endophytic bacteria and fungi from soursop (*Annona muricata* L.) and bioactivity test as antimicrobial against *Escherichia coli*, *Staphylococcus epidermidis*, and *Candida albicans*. *Jurnal Mipa Pijar*.
<https://doi.org/https://doi.org/10.29303/jp m.v18i2.3834>

Ambawade, M., Patil, D., Pathade, G., & Mali, G. (2024). Indole acetic acid (IAA) production by endophytic bacterial isolate *Agrobacterium tumefaciens* BE-1 from roots of *Musa acuminata*. *Research Journal of Biotechnology*.
<https://doi.org/https://doi.org/10.25303/19 04rjbt032039>

Bhandari, G., Choudhary, S., Deogaonkar, A., Kumar, D., Miglani, K., Gupta, S., Joshi, S., Mittal, A., & Gangola, S. (2025). Isolation and Characterization of Plant Growth Promoting Endophytes from *Linum Usitatissimum*. *Research in Ecology*.
<https://doi.org/https://doi.org/10.30564/re. v7i2.9406>

Chawngthu, L., Hnamte, R., & Lalfakzuala, R. (2020). Isolation and Characterization of Rhizospheric Phosphate Solubilizing Bacteria from Wetland Paddy Field of Mizoram, India. *Geomicrobiology Journal*, 37, 366–375.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1080/014 90451.2019.1709108>

Dong, M., Yang, Z., Cheng, G., Peng, L., Xu, Q., & Xu, J. (2018). Diversity of the Bacterial Microbiome in the Roots of Four *Saccharum* Species: *S. spontaneum*, *S. robustum*, *S. barberi*, and *S. officinarum*. *Frontiers in Microbiology*, 9.
<https://doi.org/https://doi.org/10.3389/fmic b.2018.00267>

Emami, S., Alikhani, H., Pourbabae, A., Etesami, H., Motasharezadeh, B., & Sarmadian, F. (2020). Consortium of endophyte and rhizosphere phosphate solubilizing bacteria improves phosphorous use efficiency in wheat cultivars in phosphorus deficient soils. *Rhizosphere*.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rhi sph.2020.100196>

Fatimah, F., Fadilah, R., Millah, A., Nurhariyati, T., Irawan, B., Ni'matuzahroh, N., Affandi, M., Zuhri, A., Widhiya, E., Salsabila, S., &

- Ramly, Z. (2022). Ability Test of IAA (Indole-3-Acetic Acid) Hormone-Producing Endophytic Bacteria from Lamongan Mangrove. *Jurnal Riset Biologi Dan Aplikasinya*.
<https://doi.org/https://doi.org/10.26740/jrb.a.v4n1.p42-50>
- Fouda, A., Eid, A., Elsaied, A., El-Belely, E., Barghoth, M., Azab, E., Gobouri, A., & Hassan, S. (2021). Plant Growth-Promoting Endophytic Bacterial Community Inhabiting the Leaves of *Pulicaria incisa* (Lam.) DC Inherent to Arid Regions. *Plants*, 10.
<https://doi.org/https://doi.org/10.3390/plants10010076>.
- Hao, S., Su, W., & Li, Q. (2020). Adaptive roots of mangrove *Avicennia marina*: Structure and gene expressions analyses of pneumatophores. *The Science of the Total Environment*, 757(143994).
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143994>
- Hawkesford, M., Horst, W., Kichey, T., Lambers, H., Schjoerring, J., Møller, I., & White, P. (2012). *Functions of macronutrients*.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-384905-2.00006-6>.
- Holt, J. G., Krieg, N. R., Sneath, P. H. A., Staley, J. T., & Williams, S. T. (1994). *Bergey's Manual of Determinative Bacteriology*. Lippincott Williams & Wilkins.
- Kaur, C., Selvakumar, G., & Upreti, K. (2021). Organic Acid Profiles of Phosphate Solubilizing Bacterial Strains in the Presence of Different Insoluble Phosphatic Sources Under In vitro Buffered Conditions. *Journal of Pure and Applied Microbiology*, 15(2), 1006–1015.
<https://doi.org/https://doi.org/10.22207/jpam.15.2.59>
- Khan, A., Halo, B., Elyassi, A., Ali, S., Ali, S., Al-Hosni, K., Hussain, J., Al-Harrasi, A., & Lee, I. (2016). Indole acetic acid and ACC deaminase from endophytic bacteria improves the growth of *Solanum lycopersicum*. *Electronic Journal of Biotechnology*, 21, 58–64.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ejbt.2016.02.001>.
- Khianngam, S., Meetum, P., Chiangmai, P., & Tanasupawat, S. (2023). Identification and Optimisation of Indole-3-Acetic Acid Production of Endophytic Bacteria and Their Effects on Plant Growth. *Tropical Life Sciences Research*, 34, 219–239.
<https://doi.org/https://doi.org/10.21315/tlsr.2023.34.1.12>
- Kumar, V., Chourasia, H., Rajani, K., & Kumar, R. (2024). Exploration and Characterization of High-Efficiency Phosphate-Solubilizing Bacteria Isolates from Chickpea Rhizospheric Soil. *International Journal of Bio-Resource and Stress Management*, 15(1).
<https://doi.org/https://doi.org/10.23910/1.2024.4987a>
- Lebrazi, S., Niehaus, K., Bednarz, H., Fadil, M., Chraibi, M., & Fikri-Benbrahim, K. (2020). Screening and optimization of indole-3-acetic acid production and phosphate solubilization by rhizobacterial strains isolated from *Acacia cyanophylla* root nodules and their effects on its plant growth. *Journal of Genetic Engineering & Biotechnology*, 18.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1186/s43141-020-00090-2>
- Lemos-Lucumí, C., Cárdenas-Hernández, V., & Toro-Perea, N. (2025). Metagenomic and metatranscriptomic exploration of *Avicennia germinans* L.: Endophytic microbiome of leaves and roots. *Microbiological Research*, 300(128287).
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.micres.2025.128287>
- Maulidia, V., Sriwati, R., Soesanto, L., Syamsuddin, Hamaguchi, T., & Hasegawa, K. (2021). Endophytic bacteria isolated from higher plant in Aceh, Indonesia, and their chemical compounds activity against *Fusarium oxysporum* f. sp. *lycopersici*. *Egyptian Journal of Biological Pest Control*, 31(2), 1–7.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1186/s41938-021-00379-5>
- Michael, T., Madigan, K. S. B., Daniel, H. B., Sattley, W. M., & David, A. S. (2017). *Brock Biology of Microorganisms (15th Edition)* (15th ed.). Pearson.
- Nur, S., Hidayati, I., Zulkifli, L., Sedijani, P., Ayu, D., & Rasmi, C. (2024). Antagonistic Test of Endophytic Bacteria of Chili Pepper

- Roots Producing Siderophores and Hydrolase Enzymes against Plant Pathogenic Bacteria *Ralstonia Solanacearum*. *Jurnal Biologi Tropis*, 24(4), 857–867.
- Palit, K., Rath, S., Chatterjee, S., & Das, S. (2022). Microbial diversity and ecological interactions of microorganisms in the mangrove ecosystem: Threats, vulnerability, and adaptations. *Environmental Science and Pollution Research*, 29, 32467-32512. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s11356-022-19048-7>
- Pašakinskienė, I., Stakelienė, V., Matijošiūtė, S., & Martūnas, J. (2024). *Diversity of Endophytic Fungi and Bacteria Inhabiting the Roots of the Woodland Grass, Festuca gigantea (Poaceae)*. *Diversity*. 16(8), 453. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/d16080453>
- Prasgi, H., & Cahyani, V. (2025). Potential plant growth promoting activity of root endophytic and rhizospheric bacteria isolated from mahogany and siratro in Alas Bromo, Indonesia. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1463. <https://doi.org/https://doi.org/10.1088/1755-1315/1463/1/012015>.
- Ramadhani, I., Rohadi, H., Yuliani, Y., & Ilyas, M. (2021). Study on Endophytic Fungi Associated with *Moringa oleifera* Lam. Collected from Lombok Island, West Nusa Tenggara. *Annales Bogorienses*, 24(2), 66–73. <https://doi.org/https://ejournal.brin.go.id/annales/article/view/4282>
- Sánchez-González, M., Mora-Herrera, M., Wong-Villarreal, A., De La Portilla-López, N., Sánchez-Paz, L., Lugo, J., Vaca-Paulín, R., Del Águila, P., & Yáñez-Ocampo, G. (2022). Effect of pH and Carbon Source on Phosphate Solubilization by Bacterial Strains in Pikovskaya Medium. *Microorganisms*, 11. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/microorganisms11010049>
- Silvani, V., Fracchia, S., Fernández, L., Pérgola, M., & Godeas, A. (2008). A simple method to obtain endophytic microorganisms from field-collected roots. *Soil Biology & Biochemistry*, 40(1259–1263). <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2007.11.022>
- Subedi, S., Allen, P., Vidales, R., Sternberg, L., Ross, M., & Afkhami, M. (2022). Salinity legacy: Foliar microbiome’s history affects mutualist-conferred salinity tolerance. *Ecology*, e3679. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/ecy.3679>
- Suleman, M., Yasmin, S., Rasul, M., Yahya, M., Atta, B., & Mirza, M. (2018). Phosphate solubilizing bacteria with glucose dehydrogenase gene for phosphorus uptake and beneficial effects on wheat. *PLoS ONE*, 13. <https://doi.org/https://doi.org/10.1371/journal.pone.0204408>.
- Sun, W., & Shahrajabian, M. (2025). Biostimulant and Beyond: *Bacillus* spp., the Important Plant Growth-Promoting Rhizobacteria (PGPR)-Based Biostimulant for Sustainable Agriculture. *Earth Systems and Environment*. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s41748-024-00552-4>
- Teymouri, M., Akhtari, J., Karkhane, M., & Marzban, A. (2016). Assessment of phosphate solubilization activity of Rhizobacteria in mangrove forest. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 5, 168–172. <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2016.01.012>
- Tripathi, S., Srivastava, P., Devi, R. S., & Bhadouria, R. (2020). Influence of synthetic fertilizers and pesticides on soil health and soil microbiology. In *Agrochemicals Detection, Treatment and Remediation*. LTD. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-103017-2.00002-7>
- Utami, A., & Munarti, M. (2020). Isolation and Characterization of Endophytic Bacteria in Ciplukan Plant (*Physalis angulata*). *Indonesian Journal of Biology Education*, 3(1). <https://doi.org/https://doi.org/10.31002/ijobe.v3i1.2293>
- Walia, A., Guleria, S., Chauhan, A., & Mehta, P. (2017). *Endophytic Bacteria: Role in Phosphate Solubilization*. 61–93. https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-3-319-66544-3_4.

- Wang, Y., Duan, Y., Chen, N., Ding, W., Liu, Y., & Xing, S. (2025). Integrated physiological, transcriptomic, and metabolomic analyses of Chrysanthemum 'Boju' under excessive indole-3-acetic acid stress. *Frontiers in Plant Science*, 16. <https://doi.org/https://doi.org/10.3389/fpls.2025.1531585>
- Wang, Y., Luo, D., Xiong, Z., Wang, Z., & Gao, M. (2022). Changes in rhizosphere phosphorus fractions and phosphate-mineralizing microbial populations in acid soil as influenced by organic acid exudation. *Soil and Tillage Research*, 225(105543). <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.stil.2022.105543>
- Wayan, N., Diah, A., Zulkifli, L., Ayu, D., & Rasmi, C. (2024). Exploration of P-Solubilizing and IAA-producing Rhizobacteria from Saline Environments: Their Effects on *Vigna radiata* Growth-promotion. *Jurnal Biologi Tropis*, 24(4), 797–806.
- Zhang, B., Li, P., Wang, Y., Wang, J., Liu, X., Wang, X., & Hu, X. (2021). Characterization and synthesis of indole-3-acetic acid in plant growth promoting *Enterobacter* sp. *RSC Advances*, 11, 31601–31607. <https://doi.org/https://doi.org/10.1039/d1ra05659j>
- Zhang, P., Jin, T., Sahu, S., Xu, J., Shi, Q., Liu, H., & Wang, Y. (2019). The Distribution of Tryptophan-Dependent Indole-3-Acetic Acid Synthesis Pathways in Bacteria Unraveled by Large-Scale Genomic Analysis. *Molecules*, 24. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/molecules24071411>