

Colonization of *Actinomycetes* Encapsulates in The Rhizosphere of Cultivated Plants

Dewi Rahayu Dama, Yuliana Retnowati*, Novri Youla Kandowangko, Abubakar Sidik Katili, Jusna Ahmad

Departemen Biologi, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Negeri Gorontalo, Gorontalo, Indonesia;

Article History

Received : May 26th, 2026

Revised : June 17th, 2026

Accepted : June 24th, 2026

*Corresponding Author:

Yuliana Retnowati,

Department of Biology, Faculty of Mathematics and Natural Science, Universitas Negeri Gorontalo. Jl. Prof. Dr.Ing.B.J. Habibie, 96554, Gorontalo, Indonesia;

Email:

yuliana.retnowati@ung.ac.id

Abstract: The growth of cultivated plants is often hampered by soil degradation due to excessive use of chemical inputs. The use of microorganisms such as actinomycetes offers an environmentally friendly alternative, but its application is still limited due to its low viability in the field. This study aims to analyze the colonization ability of encapsulated actinomycetes on the roots of cultivated plants, focusing on parameters such as the ability to infect root tissue, and the ability to induce growth in cultivated plants. Actinomycete isolates were obtained from the rhizosphere of maize plants that exhibit PGPR activity. This study was conducted quantitatively with a descriptive approach. This study used treatments with and without inoculation of encapsulated actinomycetes on maize (*Zea mays* var. *ceratina*) and cocoa (*Theobroma cacao*) plants. The results showed that encapsulated actinomycetes were able to colonize the root systems of maize and cocoa plants, as indicated by the presence of actinomycete filamentous structures on the root surface and within the root tissue. Inoculation with encapsulated actinomycetes induced growth in both plant species, as demonstrated by improvements in all growth parameters. Encapsulated actinomycetes have the potential to be effective biological agents for enhancing plant growth and provide an environmentally friendly technological alternative to support sustainable agriculture.

Keywords: Actinomycetes; Colonization; Encapsul; *Theobroma cacao*; *Zea mays* var *ceratina*.

Pendahuluan

Komponen fundamental dalam sistem pertanian karena berperan langsung dalam menunjang pertumbuhan dan produksi tanaman yaitu tanah. Secara fisik, tanah menjadi media bagi perkembangan sistem perakaran yang menopang tanaman agar dapat berdiri tegak serta memenuhi kebutuhan air dan udara di zona akar. Secara kimiawi, tanah berfungsi sebagai penyedia unsur hara esensial yang dibutuhkan tanaman untuk tumbuh optimal (Camila *et al.*, 2023). Namun, praktik pertanian modern cenderung bergantung pada input kimia seperti pupuk anorganik, pestisida, dan fungisida untuk meningkatkan produktivitas

dalam jangka pendek. Penggunaan pupuk kimia terbukti mampu mempercepat pertumbuhan tanaman dan meningkatkan hasil panen karena mengandung unsur hara makro seperti nitrogen (N), fosfor (P), dan kalium (K) (Mautuka *et al.*, 2022). Pestisida kimia dianggap efektif membasmi hama dan penyakit tanaman. Namun demikian, penggunaan berlebihan input kimia telah menimbulkan dampak negatif yang serius, antara lain degradasi kualitas tanah, pencemaran lingkungan, resistensi hama, serta gangguan kesehatan manusia (Prasad *et al.*, 2017).

Ekosistem tanah, residu pestisida dapat menurunkan kadar bahan organik, meningkatkan keasaman, serta mengurangi biodiversitas mikroba tanah (Sharma *et al.*,

2020). Penelitian terbaru juga menunjukkan bahwa fungisida dapat menekan aktivitas enzim dan respirasi tanah, serta menurunkan biomassa karbon mikroba (Wang *et al.*, 2025). Situasi ini menuntut adanya solusi inovatif yang ramah lingkungan untuk mendukung pertanian berkelanjutan. Salah satu pendekatan yang berkembang adalah pemanfaatan mikroorganisme sebagai biofertilizer. Biofertilizer merupakan inokulan berupa mikroorganisme hidup yang berfungsi memperbaiki ketersediaan unsur hara di dalam tanah (Yeni., 2025). Mikroorganisme yang umum digunakan meliputi *Rhizobium*, *Azotobacter*, *Mikoriza*, bakteri pelarut fosfat, dan *Actinomyces* (Febriani, 2026).

Actinomyces, khususnya genus *Streptomyces*, memiliki potensi besar sebagai biofertilizer karena mampu meningkatkan ketersediaan nutrisi, menghasilkan zat pengatur tumbuh, serta menghambat pertumbuhan fitopatogen (Bhatti, 2017). Selain itu, *Actinomyces* telah banyak dilaporkan dan ditemukan terdapat di berbagai ekosistem, seperti tanah, laut dan ekosistem mangrove (Retnowati *et al.*, 2017), dan juga dapat beradaptasi pada lingkungan ekstrem seperti kawasan karst (Matalauni, 2025). Namun, penerapan *Actinomyces* di lapangan masih terbatas karena kendala viabilitas, masa simpan yang singkat, serta sensitivitas terhadap kondisi lingkungan yang tidak menguntungkan (Yadav *et al.*, 2023). Untuk mengatasi keterbatasan tersebut, teknologi enkapsulasi mikroba menjadi solusi potensial. Enkapsulasi melibatkan penyalutan mikroorganisme dalam matriks pelindung, misalnya alginat, yang dapat mempertahankan viabilitas dan melindungi mikroba dari stres lingkungan (Bashan *et al.*, 2016). Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa mikroba yang dienkapsulasi lebih stabil, memiliki masa simpan lebih panjang, serta mampu dilepaskan secara bertahap di tanah sehingga mendukung kolonisasi akar dan meningkatkan pertumbuhan tanaman (Szopa *et al.*, 2022).

Bahan dan Metode

Waktu dan Tempat

Penelitian ini berlangsung selama 3 bulan dimulai pada bulan November 2025-Januari 2026,

dan dilaksanakan di Laboratorium Mikrobiologi dan Green House Fakultas Matematika Dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Negeri Gorontalo,

Alat dan Bahan:

Bahan yang digunakan meliputi Biji tanaman Jagung (*Zea mays var ceratina.*), biji tanaman Kakao (*Theobroma cacao*), Tanah Kebun, Enkapsul *Actinomyces* spesies *Streptomyces anissocaesili*, Spritus, Asam fuchsin, Aquadest, dan Alkohol 70%. Alat yang digunakan meliputi Cangkul, polybag, Mikroskop Olympus CX23, Mikroskop Stereo Olympus SZX7, Lampu Bunsen, Gelas beaker, Gelas ukur, Timbangan, silet/cutter, Aluminium foil, Kertas Label, Pensil dan Kamera untuk dokumentasi.

Metode penelitian

Penelitian menggunakan metode deskriptif dengan pendekatan kuantitatif dan menggunakan Rancangan Acak Kelompok. Perlakuan meliputi tanpa dan dengan inokulasi enkapsul *actinomyces*. Setiap perlakuan diulang sebanyak tiga kali.

Proses penanaman jagung dan kakao

- Bersihkan tanah kebun dari batu, akar, dan kotoran lainnya
- Masukkan tanah sebanyak 4kg kedalam polybag berukuran 20x35 cm.
- Masukkan enkapsul *Actinomyces* sebanyak 1 g ke dalam lubang tanam pada perlakuan inokulasi, pada perlakuan kontrol tanam enkapsul *actinomyces*.
- Kemudian memasukkan 3 biji jagung dan 1 biji kakao pada setiap polybag.
- Pelihara tanaman selama 30 hari dengan menyiram secara tertur. Setiap 7 hari sekali dilakukan pengamatan pertumbuhan tanaman.

Analisis kemampuan infeksi *actinomyces* pada sistem perakaran

- Memanen tanaman jagung dan kakao, pada setiap perlakuan. Mencuci bagian akar pada air mengalir hingga bersih.
- Memotong akar secara longitudinal dan letakkan potongan akar pada kaca objek.
- Teteskan larutan asam fuchsin pada preparat akar, tutup preparat menggunakan

kaca penutup. Kemudian amati menggunakan mikroskop pada perbesaran 400×.

- d. Melihat keberadaan struktur filamentous atau spora pada jaringan akar sebagai indikator kolonisasi *Actinomyces*.
- e. Dokumentasikan hasil pengamatan.

Analisis pertumbuhan vegetatif Tanaman Budidaya

- a. Sama halnya pada pengamatan infeksi. Pada analisis pertumbuhan vegetatif dilakukan pengamatan setiap 7 hari.
- b. Pengamatan yang pertama dilakukan yaitu pengukuran tinggi tanaman dari pangkal batang hingga titik tumbuh, menghitung jumlah daun yang telah membuka sempurna, dan mengukur Panjang akar dari pangkal hingga ujung akar. Kemudian setelah tanaman di analisis kemudian dilakukan pengukuran berat kering, hingga mendapatkan berat kering (Munthe, 2018).

Hasil dan Pembahasan

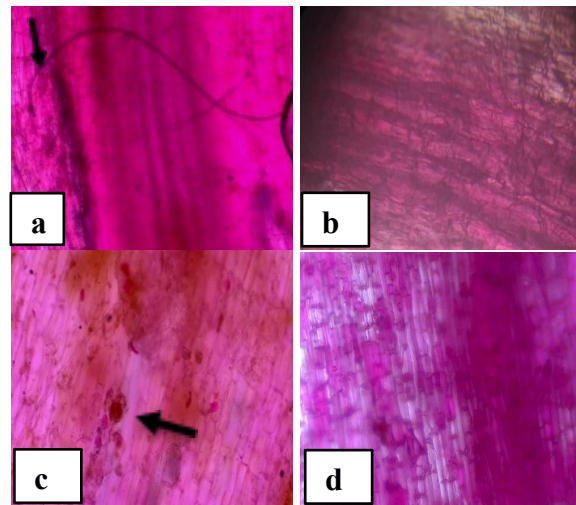
Kemampuan kolonisasi enkapsul *actinomyces* pada rhizosfer tanaman budidaya dianalisis berdasarkan kemampuan infeksi pada jaringan akar dan kemampuan induksi pertumbuhan tanaman *Zea mays* var. *ceratina* dan *Theobroma cacao* selama 30 hari masa tanam.

Kemampuan infeksi *Actinomyces* pada perakaran tanaman jagung dan kakao

Isolat *actinomyces* yang dienkapsulasi menggunakan CaCl₂ berasal dari rhizosfer tumbuhan jagung potensial PGPR yang diidentifikasi berdasar karakter molecular sebagai *Streptomyces annisostielis*. Hasil pengamatan menunjukkan bahwa *Streptomyces annisostielis* mampu menginfeksi jaringan akar *Zea mays* var. *ceratina* dan *Theobroma cacao* yang ditandai dengan struktur filamentus dan spora.

Gambar 1 menunjukkan bahwa *actinomyces* jenis *Streptomyces annisocaelis* menunjukkan kemampuan kolonisasi dengan sistem perakaran tanaman jagung dan kakao. Hal tersebut menunjukkan bahwa *actinomyces* memiliki kemampuan berinteraksi dengan tanaman kelompok monokotil dan dikotil.

Actinomyces merupakan kelompok bakteri Gram-positif yang mampu berinteraksi dengan berbagai jenis tanaman, baik monokotil maupun dikotil, melalui kolonisasi akar dan produksi metabolit bioaktif yang berperan dalam pemfiksasian nitrogen, pelarutan fosfat, sintesis fitohormon, serta pengendalian patogen, sehingga keberadaannya dapat meningkatkan pertumbuhan, ketahanan, dan produktivitas tanaman dalam sistem pertanian berkelanjutan (Shahrajabian, 2025). Kolonisasi ini terjadi karena mikroorganisme tertarik oleh senyawa eksudat akar seperti gula, asam amino, dan asam organik yang dilepaskan oleh tanaman. Senyawa tersebut berfungsi sebagai sumber nutrisi sekaligus sinyal kimia yang memicu interaksi antara mikroba dan tanaman pada daerah perakaran (Liu *et al.*, 2024).



Gambar 1. Struktur filamentus dan spora pada jaringan akar tanaman *Zea mays* var. *ceratina* dan *Theobroma cacao*. **a.** Struktur filamentus pada jaringan akar *Zea mays* var. *ceratina*, **b.** Penampang lintang akar tanaman *zea mays* var. *ceratina* tanpa inokulasi enkapsul *actinomyces* (Kontrol) **c.** Struktur spora pada jaringan akar *Theobroma cacao*, **d.** Penampang lintang akar tanaman *Theobroma cacao* (Kontrol).

Perbedaan ini mengindikasikan bahwa penggunaan enkapsul *actinomyces* berperan dalam meningkatkan kemampuan kolonisasi pada akar tanaman, yang berpotensi mendukung pertumbuhan dan perkembangan tanaman. Temuan ini di dukung oleh Balla *et al.*, (2025) Enkapsulasi mikroorganisme menggunakan alginat diketahui mampu melindungi sel mikroba dari stres lingkungan sehingga

meningkatkan kelangsungan hidupnya, serta tetap memungkinkan pelepasan dan kolonisasi pada sistem perakaran tanaman.

Kemampuan infeksi *actinomycetes* pada jaringan akar menunjukkan bahwa teknik enkapsulasi dapat membantu menjaga viabilitas mikroba sehingga meningkatkan keberhasilan kolonisasi pada akar tanaman (Zhu *et al.*, 2025). Kemampuan kolonisasi ini penting karena *actinomycetes* diketahui mampu menghasilkan berbagai metabolit seperti antibiotik, siderofor, dan fitohormon yang dapat mendukung pertumbuhan tanaman serta membantu melindungi akar dari patogen tanah (Thenappan *et al.*, 2024). Dengan demikian, keberadaan *Actinomycetes* pada sistem perakaran tanaman jagung dan kakao menunjukkan potensi pemanfaatannya sebagai agen hayati dalam

meningkatkan kesehatan dan produktivitas tanaman secara berkelanjutan (Alzate *et al.*, 2024).

Pertumbuhan Tanaman *Zea mays var ceratina* dan *Theobroma cacao* dengan dan tanpa inoculasi kapsul *actinomycetes* setelah 30 hari masa tanam

Kemampuan induksi *actinomycetes* terekncapsulasi pada pertumbuhan tanaman dianalisis berdasarkan parameter tinggi tanaman, panjang akar, jumlah daun, dan berat kering. Hasil penelitian menunjukkan bahwa inoculasi kapsul *actinomycetes* mampu menginduksi pertumbuhan kedua jenis tanaman yang ditunjukkan dengan peningkatan semua parameter pertumbuhan dibandingkan dengan kontrol (**Tabel 1**).

Tabel 1. Pertumbuhan Tanaman *Zea mays var ceratina* dan *Theobroma cacao* dengan dan tanpa inoculasi kapsul *actinomycetes* setelah 30 hari masa tanam

Perlakuan	<i>Zea mays var. Ceratina</i>				<i>Theobroma cacao</i>			
	Tinggi Tanaman (cm)	Panjang Akar (cm)	Jumlah Daun (Helai)	Berat Kering (Gram)	Tinggi Tanaman (cm)	Panjang Akar (cm)	Jumlah Daun (Helai)	Berat Kering (Gram)
Kontrol	17,90	15,53	2,75	1,06	13,04	4,74	1,92	1,19
Enkapsul <i>Actinomycetes</i>	29,19	30,08	4,67	1,31	17,23	7,23	2,39	1,20

Hasil pertumbuhan dengan perlakuan enkapsul *actinomycetes* menunjukkan hasil yang unggul dibandingkan perlakuan kontrol pada seluruh parameter pertumbuhan vegetatif, baik pada tanaman *Zea mays var ceratina* maupun *Theobroma cacao*. Pada *Zea mays var ceratina*, terjadi peningkatan pada tinggi tanaman, panjang akar, jumlah daun, dan berat kering. Hal serupa juga terlihat pada tanaman kakao, dimana seluruh parameter, termasuk berat kering mengalami peningkatan dibandingkan kontrol.

Peningkatan pertumbuhan ini menunjukkan bahwa *actinomycetes* berperan sebagai plant growth-promoting microorganisms (PGPM) yang mampu meningkatkan efisiensi pertumbuhan tanaman melalui kolonisasi pada daerah rizosfer. Mikroorganisme ini diketahui menghasilkan berbagai senyawa bioaktif seperti hormon pertumbuhan (IAA), siderofor, serta enzim yang berperan dalam pelarutan fosfat dan mineralisasi

nutrien, sehingga meningkatkan ketersediaan unsur hara bagi tanaman (Devassy *et al.*, 2026). Selain itu, *actinomycetes* juga berkontribusi dalam meningkatkan aktivitas fisiologis tanaman seperti fotosintesis dan penyerapan nitrogen, yang berdampak langsung pada peningkatan biomassa tanaman (Oliveira *et al.*, 2024).

Tanaman *Zea mays var ceratina*, peningkatan yang lebih tinggi dibanding kakao dapat disebabkan oleh karakter sistem perakaran jagung yang lebih responsif terhadap mikroba rizosfer. Tanaman sereal seperti jagung memiliki interaksi yang intens dengan mikroorganisme tanah, sehingga inoculasi mikroba seperti *actinomycetes* atau bakteri PGPR mampu meningkatkan pertumbuhan vegetatif secara signifikan (Argentel *et al.*, 2025). Hal ini juga didukung oleh penelitian yang menunjukkan bahwa inoculasi *actinomycetes* dapat meningkatkan parameter pertumbuhan vegetatif seperti tinggi tanaman, panjang akar,

dan jumlah daun pada jagung (Chukwuneme *et al.*, 2020).

Peningkatan pertumbuhan pada *Theobroma cacao* tetap terjadi namun tidak sebesar pada tanaman *Zea mays var ceratina*. Hal ini disebabkan oleh perbedaan fisiologi tanaman serta interaksi spesifik antara mikroorganisme dan tanaman inang. Pada tanaman tahunan seperti *Theobroma cacao*, actinomycetes berperan dalam meningkatkan ketahanan tanaman terhadap patogen melalui aktivitas antagonis, sehingga berpotensi dimanfaatkan sebagai agen hayati dalam budidaya tanaman (Abasolo *et al.*, 2024). Selain itu penggunaan mikroba seperti actinomycetes sangat efektif dan terbukti dalam meningkatkan pertumbuhan tanaman (Saria *et al.*, 2024).

Peningkatan ini berkaitan dengan peran *actinomycetes* sebagai mikroba pemacu pertumbuhan tanaman yang mampu menghasilkan hormon seperti auksin serta meningkatkan ketersediaan unsur hara (olanrewaju *et al.*, 2020). Selain itu, genus seperti *Streptomyces* diketahui memiliki kemampuan menghasilkan metabolit bioaktif yang mendukung pertumbuhan dan kesehatan tanaman (He *et al.*, 2024). Teknik enkapsulasi berperan dalam melindungi mikroba dari kondisi lingkungan yang tidak menguntungkan, sehingga meningkatkan viabilitas dan kemampuan kolonisasi pada akar tanaman (Zabot *et al.*, 2022).

Hal ini berdampak pada peningkatan penyerapan air dan nutrisi, yang tercermin dari pertumbuhan akar yang lebih baik. Beberapa penelitian juga menunjukkan bahwa *actinomycetes* memiliki kemampuan sebagai agen biokontrol dan pelarut fosfat (Konsiriphinyo, 2024), sehingga berkontribusi dalam meningkatkan pertumbuhan tanaman secara tidak langsung (Pan *et al.*, 2024). Secara keseluruhan, enkapsulasi actinomycetes berpotensi meningkatkan pertumbuhan vegetatif tanaman dan dapat menjadi alternatif teknologi ramah lingkungan dalam pertanian berkelanjutan.

Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian, *Actinomycetes* diperoleh dari rhizosfer tanaman jagung yang diaplikasikan melalui teknik

enkapsulasi terbukti mampu mengkolonisasi sistem perakaran tanaman *Zea mays mays var ceratina* dan *Theobroma cacao*, baik pada permukaan akar maupun didalam jaringan akar (endofit). Kolonisasi ini terjadi melalui interaksi antara *Actinomycetes* dan eksudat akar yang mendukung keberlangsungan hidup serta aktivitas mikroorganisme di rhizosfer.

Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terimakasih kepada Kementerian Pendidikan, kebudayaan, riset dan teknologi, Indonesia (Nomor Proyek 063/E5PG02.00.PL/2024), atas dukungan secara finansial. Penulis juga mengucapkan terimakasih kepada Tim penelitian Dr. Yuliana Retnowati, S.Si, M.Si Prof. Dr. Dra. Novri Youla Kandowanko, M.P, Dr. Abubakar Sidik Katili, S.Pd, M.Sc, Wawan Pembengo, SP, M.Si. serta kepada kepala Laboratorium Biologi Universitas Negeri Gorontalo atas fasilitas yang telah disediakan dan penulis juga mengapresiasi dukungannya dari rekan-rekan yang telah membantu selama proses penelitian hingga penyusunan artikel ini.

Referensi

- Abasolo-Pacheco, F., Zambrano-Rios, K., Reinoso-Viteri, D., Troncozo-Correa, J., & Ferrer-Sánchez, Y (2024). Rhizospheric actinomycetes with antagonistic activity to the black cocoa pod (*Phytophthora palmivora*). *Terra Latinoamericana*, 43. <https://doi.org/10.28940/terralatinoamericana.v43i.2196>
- Alzate Zuluaga, M.Y., et al. (2024). Plant-microbe interactions in the rhizosphere for sustainable crop fertilization. *Frontiers in Microbiology*. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2024.1440978>
- Argentel-Martínez, L., Peñuelas-Rubio, O., López, L.P. et al. Enhancement of growth and physiological performance in maize hybrids through a dual consortium of native rhizobacterial strains. *Plant Growth Regul* 105, 1559–1574 (2025). <https://doi.org/10.1007/s10725-025-01354-y>
- Balla, A., Silini, A., Cherif-Silini, H., Mapelli, F., & Borin, S. (2025). Root colonization dynamics of alginate encapsulated

- rhizobacteria: Implications for *Arabidopsis thaliana* root growth and durum wheat performance. *AIMS Microbiology*, 11(1), 87–125. <https://doi.org/10.3934/microbiol.2025006>
- Bashan, Y., de-Bashan, L.E., & Prabhu, S.R. (2016). Superior polymeric formulations and emerging innovative products of bacterial inoculants for sustainable agriculture and the environment. In *Agriculturally Important Microorganisms* (pp. 15-46). Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-10-2576-1_2
- Bhatti, A. A., Haq, S., & Bhat, R. A. (2017). Actinomycetes benefaction role in soil and plant health. *Microbial Pathogenesis*, 111, 458–467. <https://doi.org/10.1016/j.micpath.2017.09.036>
- Camila, A. N., Siswoyo, H., & Hendrawan, A. P. (2023). Penentuan Tingkat Kesuburan Tanah Pada Lahan Pertanian di Kelurahan Bandulan Kecamatan Sukun Kota Malang Berdasarkan Parameter Kimia. *Jurnal Sains dan Edukasi Sains*, 6(1), 28-33.
- Chukwuneme, C. F., Babalola, O. O., Kutu, F. R., & Ojuederie, O. B. (2020). Characterization of actinomycetes isolates for plant growth promoting traits and their effects on drought tolerance in maize. *Journal of Plant Interactions*, 15(1), 93–105. <https://doi.org/10.1080/17429145.2020.1752833>
- Devassy, M., John, E., & Paul, N. M. (2026). Characterization of plant growth promoting activity of actinomycetes isolated from biochar enhanced rhizosphere soil. *Materials Today: Proceedings*, 125, 27–32. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.11.007>
- Febriani, N. (2026). Pengaruh Biofertilizer Berbasis Mikroba Lokal terhadap Kesuburan Tanah dan Pertumbuhan Tanaman Pangan di Lahan Kering Tropis. *Jurnal Pertanian dan Teknologi Pangan*, 1(1), 25-30.
- He, D., Gao, C., Zhao, S., Zhang, X., & Li, Q. (2024). Antibacterial, herbicidal, and plant growth-promoting properties of *Streptomyces* sp. *Microorganisms*, 12(11), 2245. <https://doi.org/10.3390/microorganisms12112245>
- Konsiriphinyo, T., & Julsirikul, D. (2024). Plant growth promoting activities of actinomycetes isolated from organic waste sources. *Life Sciences and Environment Journal*, 25(1), 41–56. <https://doi.org/10.14456/lsej.2024.4>
- Liu, Y., et al. (2024). Root colonization by beneficial rhizobacteria. *FEMS Microbiology Reviews*. <https://doi.org/10.1093/femsre/fuad066>
- Matalauni, C. L., Retnowati, Y., Katili, A. S., Kandowangko, N. Y., & Hasan, A. M. (2025). Actinomycetes from Plant Rhizosphere in Gorontalo Karst Area as Plant Growth Promoting Rhizobacteria. *Biology, Medicine, & Natural Product Chemistry*, 14(2), 1047-1053.
- Mautuka, Z. A., Astriana, M., & Martasiana, K. (2022). Pemanfaatan Biochar Tongkol Jagung Guna Perbaikan Sifat Kimia Tanah Lahan Kering. *Jurnal Ilmiah Wahana Pendidikan*, 8(1), 201–208. <https://doi.org/10.5281/zenodo.5827375>
- Munthe, K., Pane, E., & Panggabean, E. L. (2018). Budidaya tanaman sawi (*Brassica juncea* L.) pada media tanam yang berbeda secara vertikultur. *Agrotekma: Jurnal Agroteknologi dan Ilmu Pertanian*, 2(2), 138-151.
- Olanrewaju, O. S., Glick, B. R., & Babalola, O. O. (2020). Mechanisms of action of plant growth promoting bacteria. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 36(7), 1–16.
- Oliveira, E. P. de, Soares, P. P. de S., Correia, A. de J., França, R. S. da, Miguel, D. L., Nóbrega, R. S. A., & Leal, P. L. (2024). Humic substances and plant growth-promoting bacteria enhance corn (*Zea mays* L.) development. *South African Journal of Botany*, 166, 539–549. <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2024.01.031>
- Pan, J., Geng, X., Cai, Y., Liu, Z., & Wang, Y. (2024). Biocontrol efficacy of actinomycete YG-5 for plant disease and growth promotion. *Scientific Reports*, 14, 18621. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-69733-5>
- Prasad, R., Bhattacharyya, A., & Nguyen, Q.D.

- (2017). Nanotechnology in sustainable agriculture: recent developments, challenges, and perspectives. *Frontiers in microbiology*, 8, 1014. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2017.01014>.
- Retnowati, Y., Sembiring, L., Moeljopawiro, S., Djohan, T. S., & Soetarto, E. S. (2017). Diversity of antibiotic-producing Actinomycetes in mangrove forest of Torosiaje, Gorontalo, Indonesia. *Biodiversitas Journal of Biological Diversity*, 18(4), 1453–1461. <https://doi.org/10.13057/biodiv/d180421>
- Saria, H. Y., Nasaruddin, & Sahur, A. (2024). Efek Inokulasi Konsorsium Mikoriza+Actinomycetes dan Dosis NPK Terhadap Pertumbuhan Sambung Pucuk Tanaman Kakao (*Theobroma cacao* L.) Sulawesi 02. *Jurnal Agrivigor*, 15(1), 1–11. eISSN 2798-5458
- Shahrajabian, M.H., Sun, W. Microbial interaction of Actinobacteria strains with various plants, promote growth and development in natural farming, and alleviating biotic and abiotic stresses. *Discov Sustain* 6, 564 (2025). <https://doi.org/10.1007/s43621-025-01413-4>
- Sharma, I.P., Chandra, S., Kumar, N., & Chandra, D. (2020). PGPR: Heart of soil and their role in soil fertility. In *Agriculturally Important Microbes for Sustainable Agriculture* (pp. 51–67). Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-15-2576-6_3.
- Szopa, D., Mielczarek, M., Skrzypczak, D., Izydorczyk, G., Mikula, K., Chojnacka, K., & Witek-Krowiak, A. (2022). Encapsulation efficiency and survival of plant growth-promoting microorganisms in an alginate-based matrix—A systematic review and protocol for a practical approach. *Industrial crops and products*, 181, 114846. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2022.114846>
- Thenappan, D. P. Pandey, R., Hada, A., Jaiswal, D. K., Chinnusamy, V., Bhattacharya, R., & Annapurna, K. (2024). Physiological basis of plant growth promotion in rice by rhizosphere and endosphere associated *Streptomyces* isolates from India. *Rice*, 17, 60. <https://doi.org/10.1186/s12284-024-00732-0>
- Van der Meij, A., Willemse, J., Schneijderberg, M. A., Geurts, R., Raaijmakers, J. M., & van Wezel, G. P. (2018). Inter- and intracellular colonization of Arabidopsis roots by endophytic actinobacteria and the impact of plant hormones on their antimicrobial activity. *Antonie van Leeuwenhoek*, 111(5), 679–690. <https://doi.org/10.1007/s10482-018-1014-z>.
- Wang, Z., Yun, S., An, Y., Shu, L., Li, S., Sun, K., & Zhang, W. (2025). Effect of fungicides on soil respiration, microbial community, and enzyme activity: A global meta-analysis (1975–2024). *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 289, 117433. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2024.117433>
- Yadav V, Tripathi S, Kumar D, Tiwari T. (2023). Soil Fertility and Productivity. The Visionary Indian Agriculture System (pp.79-85). *Integrated Publications TM*. <https://www.researchgate.net/publication/377381623>
- Yeni, Y., Safitri, B., Febria, D., & Prajaka, N. W. (2025). Respon Tanaman Cabai (*Capsicum annum* L.) terhadap Pemberian Biofertilizer Akar Bambu dan Akar Putri Malu. *Agrotech Science Journal*, 11(01), 47-55.
- Zabot, G. L., Moraes, M. N., & Meireles, M. A. A. (2022). Encapsulation of microorganisms for agricultural applications: A review. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 40, 102296. <https://doi.org/10.3390/polym14194194>.
- Zhu, L., et al. (2025). Root exudate-mediated assemblage of rhizo-microbiome enhances disease suppression. *Microbiological Research*. <https://doi.org/10.1016/j.micres.2024.128031>