

Bakteri Endofit: Mikroba Tersembunyi sebagai Agen Hayati Pendukung Kesehatan dan Ketahanan Tanaman

Endophytic Bacteria: Hidden Microbes as Biological Agents Supporting Plant Health and Resistance

Nahrisa Rahmadhani^{*1} , Triwanto Nababan¹ 

¹ Program Studi Agroteknologi, Fakultas Pertanian, Universitas Sumatera Utara, Medan, 20155, Indonesia

*Corresponding Author: rahmadhani.nahrisa@usu.ac.id

ARTICLE INFO

Article history:

Received : 23 Maret 2026

Revised : 24 April 2026

Accepted : 5 Mei 2026

Available online

<https://talenta.usu.ac.id/joa>

E-ISSN: [2963-2013](#)

P-ISSN: [2337-6597](#)

How to cite:

Rahmadhani, N., Nababan, T (2020). Bakteri Endofit : Mikroba Tersembunyi sebagai Agen Hayati Pendukung Kesehatan dan Ketahanan Tanaman. Jurnal Agroteknologi, 14(2), 79-86.

ABSTRACT

Plant health is determined by complex interactions between biotic and abiotic factors, while plant pathogens remain a major threat to plant growth and productivity. Excessive use of pesticides for disease control poses risks to non-target organisms and disrupts the balance and sustainability of agroecosystems. Therefore, an environmentally friendly and sustainable control alternative is needed. One of the most promising microorganisms is endophytic bacteria, which colonize plant tissues without causing disease symptoms. Endophyte bacteria can promote plant growth and resistance through the production of phytohormones, increased nutrient availability, and enhanced tolerance to biotic and abiotic stresses. In addition, endophyte bacteria play a role in enhancing plant defense responses and suppressing disease development by producing antibiotics, siderophores, enzymes that degrade the walls of pathogenic cells, and inducing systemic resistance. The ability of endophyte bacteria to colonize various host plants enables them to serve a broad spectrum of applications in agriculture. Through these mechanisms, endophyte bacteria have the potential to be developed as biological agents to support crop health and to realize sustainable agricultural systems.

Keyword: Endophytic bacteria, Phytohormones, Siderophores, Sustainable agriculture

ABSTRAK

Stabilitas kesehatan tanaman merupakan hasil interaksi antara faktor biotik dan abiotik, sementara patogen tanaman menjadi ancaman terhadap pertumbuhan dan produktivitas. Penggunaan pestisida secara berlebihan dalam pengendalian penyakit berisiko menimbulkan dampak negatif terhadap organisme non-target serta mengganggu keseimbangan dan keberlanjutan agroekosistem. Oleh karena itu, diperlukan alternatif pengendalian yang ramah lingkungan dan berkelanjutan. Salah satu mikroorganisme yang berpotensi dikembangkan adalah bakteri endofit, yaitu mikroorganisme yang hidup dan berkembang di dalam jaringan tanaman tanpa menimbulkan gejala penyakit. Bakteri endofit dapat meningkatkan pertumbuhan dan ketahanan tanaman melalui produksi fitohormon, peningkatan ketersediaan unsur hara, serta peningkatan toleransi tanaman terhadap stres biotik dan abiotik. Selain itu, bakteri endofit juga berperan dalam meningkatkan sistem pertahanan tanaman dan menekan perkembangan penyakit melalui produksi antibiotik, siderofor, enzim pendegradasi dinding sel patogen, serta induksi ketahanan sistemik. Kemampuan kolonisasi pada berbagai tanaman inang memberikan bakteri endofit spektrum aplikasi yang luas dalam bidang pertanian. Melalui berbagai mekanisme tersebut, bakteri endofit berpotensi dikembangkan sebagai agen hayati untuk mendukung kesehatan tanaman dan mewujudkan sistem pertanian yang berkelanjutan.

Kata kunci: Bakteri endofit, Fitohormon, Pertanian berkelanjutan, Siderofor



This work is licensed under a Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International.
<http://doi.org/10.32734/ja.v14i2.25829>

1. Pendahuluan

Stabilitas kesehatan tanaman merupakan hasil interaksi kompleks antara faktor abiotik dan biotik, dengan patogen tanaman yang berperan sebagai ancaman terhadap pertumbuhan dan produktivitas tanaman (Czembor *et al.*, 2025). Serangan penyakit pada tanaman menjadi salah satu faktor pembatas utama produksi tanaman pangan global, dengan dampak yang signifikan terutama di wilayah dengan keterbatasan sumber daya. Penyakit tanaman tidak hanya menyebabkan penurunan hasil panen, tetapi juga meningkatkan kerentanan terhadap ketahanan pangan serta ketidakstabilan sosial ekonomi masyarakat. Seiring dengan pertumbuhan populasi global yang terus meningkat serta meningkatnya kebutuhan pangan, permasalahan penyakit tanaman semakin menjadi tantangan dalam menjaga ketahanan pangan (Rizzo *et al.*, 2021).

Pengendalian kimiawi selama ini telah menjadi strategi utama yang umum digunakan petani dalam pengelolaan penyakit tanaman (Gai dan Wang 2024). Namun, ketergantungan yang berlebihan terhadap pestisida kimia memicu dampak negatif, termasuk pencemaran lingkungan, penurunan keanekaragaman hayati, serta muncul dan berkembangnya resistensi patogen yang pada akhirnya dapat menurunkan efektivitas pengendalian penyakit. Selain itu, penggunaan pestisida secara berlebihan berisiko membahayakan organisme non-target, seperti serangga penyerbuk yang berperan penting dalam menjaga keseimbangan dan keberlanjutan agroekosistem.

Dalam upaya mengatasi keterbatasan tersebut, pestisida berbasis mikroorganisme mulai dikembangkan sebagai alternatif pengendalian penyakit tanaman yang lebih adaptif dan berkelanjutan, terutama karena kemampuannya untuk berkembang biak serta beradaptasi di lingkungan dan di dalam jaringan tanaman setelah diaplikasikan (Wend *et al.*, 2024 ; Halim *et al.*, 2020). Berbagai genus bakteri telah dilaporkan menunjukkan potensi dalam mengendalikan beragam penyakit tanaman, sehingga pendekatan pengendalian hayati semakin mendapat perhatian dalam sistem pertanian modern (Ayaz *et al.*, 2023). Diantara berbagai agen hayati yang telah diteliti, bakteri endofit muncul sebagai salah satu kandidat yang sangat menjanjikan karena kemampuannya dalam meningkatkan pertumbuhan, kesehatan, dan ketahanan tanaman (Herliyana *et al.*, 2023). Tinjauan literatur ini bertujuan untuk mengkaji keragaman, mekanisme kerja, serta potensi pemanfaatan bakteri endofit tanaman sebagai agen hayati dalam mendukung kesehatan dan ketahanan tanaman secara berkelanjutan.

2. Konsep Dasar dan Karakteristik Bakteri Endofit

Bakteri endofit merupakan mikroorganisme yang mampu melakukan kolonisasi pada jaringan internal tanaman, seperti apoplas, ruang antarsel, dan pembuluh xilem, serta membentuk hubungan simbiosis mutualistik dengan tanaman inang melalui peningkatan Kesehatan dan respons imun tanaman (Sen *et al.*, 2026). Endofit 'sejati' tidak bersifat patogen, meskipun beberapa mikroorganisme patogen pada tanaman tertentu dapat hidup sebagai endofit pada tanaman lain tanpa menimbulkan gejala penyakit. Di dalam jaringan tanaman (endosfer), bakteri endofit juga berinteraksi dengan berbagai mikroorganisme lain membentuk komunitas mikroba kompleks, yang dapat memberikan efek sinergis, netral, maupun antagonistik terhadap tanaman inang, sekaligus memperoleh perlindungan dari perubahan lingkungan eksternal (Collinge *et al.*, 2022 ; Wu *et al.*, 2021).

Isolasi bakteri endofit dari jaringan internal tanaman memerlukan proses sterilisasi permukaan untuk menghilangkan mikroorganisme epifit dan kontaminan lain sehingga diperoleh isolat endofit murni (Sharma dan Mallubhotla 2022). Bakteri endofit yang telah diisolasi dari berbagai tanaman, umumnya berasal dari genus *Pantoea*, *Pseudomonas*, *Serratia*, *Rhodanobacter*, *Stenotrophomonas*, *Phyllobacterium*, *Bacillus*, *Rhodococcus*, dan *Paenibacillus*. Di antara berbagai genus tersebut, *Bacillus* dan *Pseudomonas* merupakan kelompok bakteri endofit yang paling dominan ditemukan pada jaringan tanaman (Cueva-Yesquén *et al.*, 2021).

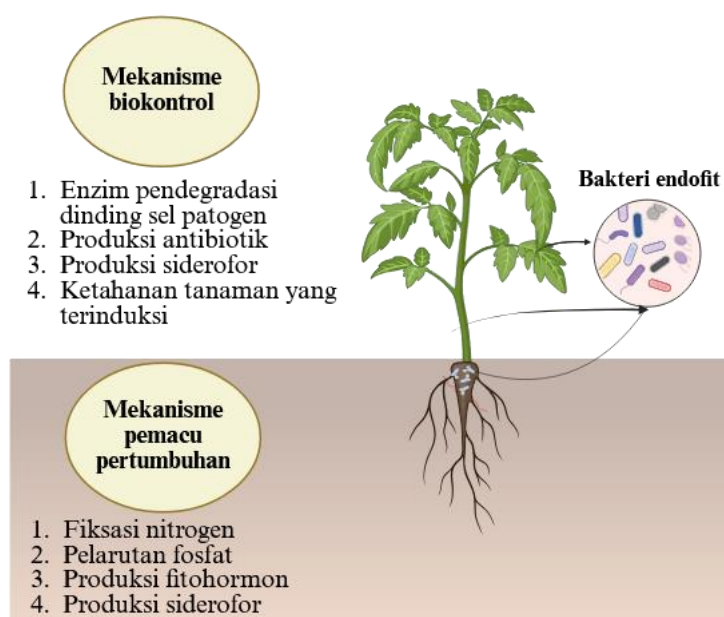
Bakteri endofit dapat ditransmisikan secara vertikal melalui biji ke generasi berikutnya maupun secara horizontal dari lingkungan sekitar, terutama tanah dan rizosfer. Endofit yang terbawa biji mampu membentuk asosiasi sejak tahap perkecambahan, kemudian mengkolonisasi akar dan menyebar ke bagian pucuk tanaman. Sementara itu, endofit dari lingkungan umumnya memasuki tanaman melalui rambut akar, celah, luka, stomata, hidatoda, atau kerusakan jaringan akibat serangan serangga, lalu ditranslokasikan secara sistemik melalui pembuluh xilem ke bagian tanaman di atas permukaan tanah (Rabbee *et al.*, 2024). Selain jaringan vegetatif, organ reproduktif seperti bunga dan biji juga dapat berperan sebagai media transmisi endofit antar generasi tanaman. Kemampuan kolonisasi dan penyebaran tersebut menjadikan endofit berpotensi besar dalam

mendukung sistem pertanian berkelanjutan sebagai alternatif penggunaan bahan kimia sintetis (Rakhalaru *et al.*, 2025).

Keanekaragaman komunitas bakteri endofit dipengaruhi oleh berbagai faktor tanaman dan lingkungan, seperti genotipe tanaman, jenis vegetasi, kondisi tanah, umur dan tahap perkembangan tanaman, serta tipe jaringan tanaman. Faktor lingkungan seperti musim, iklim, ketinggian, dan lokasi geografis juga berperan dalam menentukan komposisi dan frekuensi kolonisasi endofit (Aleynova *et al.*, 2022). Selain itu, kelimpahan populasi bakteri endofit dapat dipengaruhi oleh kandungan senyawa bioaktif tanaman yang memengaruhi keberadaan dan ketertarikan mikroba di dalam jaringan tanaman (Wu *et al.*, 2021).

3. Peran Bakteri Endofit dalam Mendukung Kesehatan Tanaman

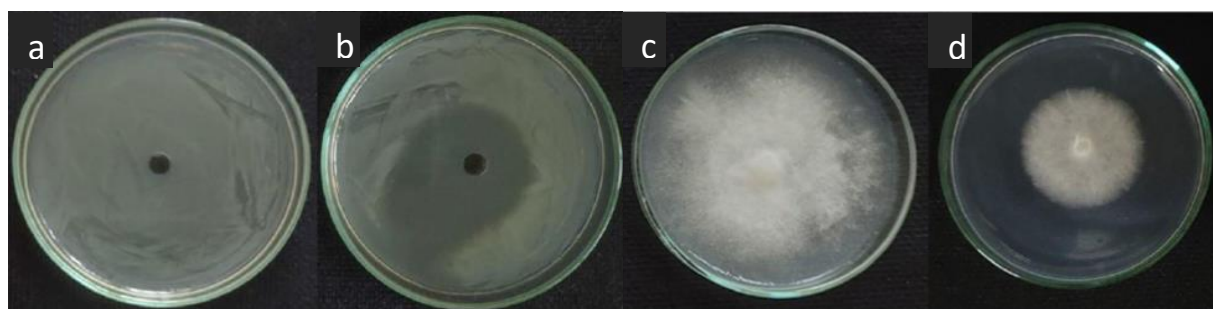
Bakteri endofit merupakan agen biokontrol ramah lingkungan yang mampu menekan perkembangan patogen, meningkatkan pertumbuhan, dan memperkuat ketahanan tanaman terhadap berbagai cekaman lingkungan (Sudewi *et al.* 2022). Bakteri endofit juga mudah dibiakkan dan diaplikasikan serta menghasilkan hormon pemacu pertumbuhan dan mengaktifkan sistem pertahanan tanaman. Peran tersebut berlangsung melalui mekanisme sebagaimana disajikan pada Gambar 1.



Gambar 1. Peran bakteri endofit dalam meningkatkan pertumbuhan dan perlindungan tanaman

Bakteri endofit menghasilkan berbagai enzim, seperti selulase, kitinase, β -1,3-glukanase, dan hemiselulase, yang membantu kolonisasi jaringan sekaligus mendegradasi dinding sel patogen sehingga dapat menekan keberadaan fitopatogen (Sen *et al.*, 2026). Selain itu, bakteri endofit juga menghambat pertumbuhan patogen melalui mekanisme antibiosis, dengan menghasilkan antibiotik dan *volatile organic compounds* (VOCs), yang mampu mengganggu proses seluler patogen, bahkan pada konsentrasi rendah (Eid *et al.*, 2021). Produksi siderofor oleh bakteri endofit juga berperan dalam mengikat ion Fe^{3+} sehingga ketersediaan besi bagi fitopatogen berkurang dan kesehatan tanaman lebih terjaga (Wozniak *et al.*, 2019).

Selain menekan patogen, bakteri endofit juga dapat meningkatkan ketahanan tanaman melalui aktivasi *induced systemic resistance* (ISR) dan peningkatan ekspresi gen pertahanan melalui jalur asam salisilat, jasmonat, dan etilen (Miliute *et al.*, 2015). Dalam perannya sebagai pemacu pertumbuhan tanaman, endofit mampu menambat nitrogen atmosfer menjadi amonium tanpa membentuk bintil akar, sehingga dapat mendukung pertumbuhan tanaman bahkan melebihi efektivitas pupuk nitrogen kimia (Liu *et al.*, 2025). Beberapa bakteri penambat nitrogen yang umum ditemukan berasal dari genus *Acinetobacter*, *Bacillus*, *Pseudomonas*, dan *Stenotrophomonas* (Rana *et al.*, 2023).



Gambar 2. Aktivitas penghambatan isolat endofit terhadap pertumbuhan patogen secara in vitro: (a) *Ralstonia solanacearum*; (b) *Bacillus amyloliquefaciens* + *Ralstonia solanacearum*; (c) *Phytophthora nicotianae*; dan (d) *Bacillus amyloliquefaciens* + *Phytophthora nicotianae* (Sharmila *et al.*, 2025).

Bakteri endofit juga berperan dalam melarutkan fosfor tidak tersedia menjadi fosfor aktif melalui produksi asam organik, eksopolisakarida, dan enzim fosfatase (Sun *et al.*, 2025). Bakteri ini juga menghasilkan berbagai fitohormon, seperti auksin, sitokinin, giberelin, etilen, asam absisat, brassinosteroid, dan strigolakton yang mendukung pertumbuhan tanaman. Selain membantu penyerapan besi, siderofor yang diproduksi bakteri endofit juga dapat mengikat ion logam berlebih di rizosfer sehingga mengurangi risiko penyerapan logam berbahaya oleh akar tanaman (Neubauer *et al.*, 2000).

4 Aplikasi Bakteri Endofit pada Sistem Kesehatan Tanaman

Pemanfaatan bakteri endofit dalam sistem pertanian terus berkembang karena dapat menekan kejadian penyakit dan mengurangi penggunaan fungisida kimia sehingga lebih ramah lingkungan (Lovecka *et al.*, 2023). Selain berperan sebagai agen biokontrol, bakteri endofit juga berkontribusi dalam meningkatkan pertumbuhan dan kesehatan tanaman melalui berbagai aktivitas biokimia dan fisiologis. Berbagai spesies bakteri endofit telah diaplikasikan pada berbagai komoditas pertanian sebagai agen biokontrol dan pemacu pertumbuhan tanaman melalui beragam mekanisme (Tabel 1 dan Tabel 2).

Tabel 1. Aplikasi bakteri endofit dalam pengendalian patogen tanaman

Mekanisme biokontrol	Spesies bakteri endofit	Tanaman asal isolat	Patogen target	Referensi
Enzim pendegradasi dinding sel patogen	<i>Acinetobacter schindleri</i>	<i>Cicer arietinum</i>	<i>Fusarium oxysporum</i> f.sp. ciceris	Likhita <i>et al.</i> 2026
	<i>Bacillus amyloliquefaciens</i>	<i>Piper nigrum</i>	<i>Phytophthora</i> sp.	Ngo <i>et al.</i> 2020
Produksi antibiotik	<i>Bacillus thuringiensis</i>	<i>Psidium guajava</i>	<i>Meloidogyne</i> sp.	Maulidia <i>et al.</i> 2020
	<i>Bacillus subtilis</i>	<i>Manihot esculenta</i>	<i>Xanthomonas phaseoli</i> pv. <i>manihotis</i>	Feng <i>et al.</i> 2023
	<i>Bacillus sonorensis</i>	<i>Mallotus triscupidatus</i>	<i>Clavibacter michiganensis</i>	Christaskis <i>et al.</i> 2021
Produksi siderofor	<i>Acinetobacter nosocomialis</i>	<i>Achyranthes bidentata</i>	<i>Fusarium oxysporum</i>	Zeng <i>et al.</i> 2024
	<i>Pseudomonas protegens</i>	<i>Pistacia atlantica</i>	<i>Pseudomonas syringae</i> pv. <i>syringae</i>	Etminani dan Harighi, 2018
Induced systemic resistance	<i>Bacillus velezensis</i>	<i>Pinus tabuliformis</i>	<i>Bursaphelenchus xylophilus</i>	Sun <i>et al.</i> 2024
	<i>Bacillus licheniformis</i>	<i>Punica granatum</i>	<i>Xanthomonas axonopodis</i> pv. <i>punicae</i>	Singh <i>et al.</i> 2022
	<i>Bacillus velezensis</i>	<i>Fragaria chiloensis</i>	<i>Rhizoctonia solani</i>	Abbas <i>et al.</i> 2024

Tabel 2. Aktivitas pemacu pertumbuhan oleh bakteri endofit pada tanaman

Aktivitas biokimia/fisiologis	Spesies bakteri endofit	Tanaman asal isolat	Metode aplikasi	Referensi
Meningkatkan mobilisasi Cd dalam tanah untuk mendukung fitoremediasi	<i>Pantoea endophytica</i>	<i>Quercus glauca</i>	Inokulasi ke tanah	Li <i>et al.</i> 2023
Meningkatkan ketersediaan nitrogen dan fosfor dalam tanah	<i>Stenotrophomonas rhizophila</i>	<i>Glycyrrhiza uralensis</i>	Inokulasi pada perakaran	Wang <i>et al.</i> 2022
Meningkatkan pertumbuhan bibit (tinggi tanaman, jumlah daun, dan panjang akar)	<i>Bacillus siamensis</i>	<i>Piper nigrum</i>	Inokulasi pada perakaran	Ngo <i>et al.</i> 2020
Meningkatkan ketersediaan dan penyerapan unsur hara (N, P, dan K)	<i>Bacillus cereus</i>	<i>Pulicaria incisa</i>	Inokulasi pada benih	Fouda <i>et al.</i> 2021
Meningkatkan hasil dan kualitas benih padi di lahan salin	<i>Isoptericola chiayiensis</i>	<i>Avicennia marina</i>	Inokulasi pada benih	Alghamdi <i>et al.</i> 2025
Mensintesis IAA sehingga meningkatkan pertumbuhan tanaman	<i>Bacillus paramycooides</i>	<i>Solanum lycopersicum</i>	Inokulasi pada benih	Feng <i>et al.</i> 2024

5. Prospek Pemanfaatan dan Pengembangan Bakteri Endofit

Eksplorasi bakteri endofit dari berbagai habitat ekologis, termasuk lingkungan ekstrem seperti daerah salin, kering, panas, dan dingin, menjadi langkah penting dalam menemukan endofit unggul yang berpotensi dimanfaatkan di bidang pertanian. Tingginya keanekaragaman flora di Indonesia juga mendukung ditemukannya berbagai bakteri endofit dengan kemampuan adaptasi dan produksi metabolit spesifik yang bernilai aplikatif tinggi. Penelitian mengenai interaksi mikroba–tanaman masih perlu terus dikembangkan, terutama dalam mengidentifikasi senyawa bioaktif yang dihasilkan bakteri endofit untuk meningkatkan kesehatan dan ketahanan tanaman terhadap perubahan iklim serta degradasi kondisi tanah dan lingkungan.

Pengembangan aplikasi mikroba bermanfaat masih memerlukan penelitian lebih lanjut, termasuk kolonisasi bakteri di dalam jaringan tanaman menggunakan penanda *green fluorescent protein* (GFP). Pendekatan ini penting untuk memahami pola interaksi dan keberhasilan kolonisasi endofit pada tanaman inang. Selain itu, perkembangan teknologi modern seperti *CRISPR/Cas-mediated genome editing* mulai dimanfaatkan untuk mempelajari mekanisme interaksi tanaman dan mikroba secara lebih mendalam, sekaligus mendukung pengembangan tanaman maupun mikroba unggul yang lebih adaptif dan berkelanjutan untuk aplikasi pertanian masa depan dengan tetap memperhatikan prinsip dan kode bioetik yang berlaku.

6. Kesimpulan

Bakteri endofit hidup di dalam jaringan tanaman tanpa menyebabkan gejala penyakit dan memiliki peran penting dalam mendukung kesehatan tanaman melalui peningkatan pertumbuhan, ketahanan terhadap stress biotik dan abiotik, serta penekanan perkembangan patogen. Berbagai mekanisme, seperti produksi fitohormon, peningkatan ketersediaan unsur hara, produksi antibiotik, siderofor, enzim pendegradasi dinding sel patogen, dan induksi ketahanan sistemik, menjadikan bakteri endofit berpotensi besar sebagai agen hayati ramah lingkungan. Kemampuan kolonisasi pada berbagai tanaman inang juga memberikan peluang pemanfaatan yang luas dalam sistem pertanian berkelanjutan guna mengurangi ketergantungan terhadap pestisida kimia.

Daftar Pustaka

Abbas, M.M., Ismael, W.H., Mahfouz, A.Y., Daigham, G.E., Attia, M.S. (2024). Efficacy of endophytic bacteria as promising inducers for enhancing the immune responses in tomato plants and managing *Rhizoctonia* root-rot disease. *Scientific Reports*, 14, 1-20. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-51000-8>.

- Aleynova, O.A., Kiselev, K.V. (2023). Interaction of plants and endophytic microorganisms: molecular aspects, biological functions, community composition, and practical applications. *Plants*, 12. <https://doi.org/10.3390/plants12040714>.
- Alghamdi, A.K., Rawat, A., Alzayed, W., Parween, S., Nagarajan, A.P., Saad, M.M., Hirt, H. 2025. Mangrove-Derived Endophytic Bacteria Enhance Growth, Yield, and Stress Resilience in Rice. *International Journal of Molecular Sciences*, 26(19). <https://doi.org/10.3390/ijms26199317>
- Ayaz, M., Li, C.H., Ali, Q., Zhao, W., Chi, Y.K., Shafiq, M., Ali, F., Yu, X.Y., Yu, Q., Zhao, J.T., Yu, J.W., Qi, R., Huang, W.K. (2023). Bacterial and fungal biocontrol agents for plant disease protection: Journey from lab to field, current status, challenges, and global perspectives. *Molecules*, 28. <https://doi.org/10.3390/molecules28186735>.
- Christakis, C.A., Daskalogiannis, G., Chatzaki, A., Markakis, E.A., Mermigka, G., Sagia, A., Rizzo, G.F., Catara, V., Lagkouvardos, I., Studholme, D.J., Sarris, P.F. (2021). Endophytic bacterial isolates from halophytes demonstrate phytopathogen biocontrol and plant growth promotion under high salinity. *Frontiers in Microbiology*, 12. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2021.681567>.
- Collinge, D.B., Jensen, B., Jorgensen, H.J.L. (2022). Fungal endophytes in plants and their relationship to plant disease. *Current Opinion in Microbiology*, 69, 1-6. <https://doi.org/10.1016/j.mib.2022.102177>
- Cueva-Yesquén, L.G., Goulart, M.C., Attili de Angelis, D., Nopper, M., Alves, M., Fantinatti-Garboggini, F. (2021). Multiple plant growth-promotion traits in endophytic bacteria retrieved in the vegetative stage from passionflower. *Frontier in Plant Science*, 11. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.621740>
- Czembor, E., Tratwal, A., Pukacki, J., Krystek, M., Czembor, J.H. (2025). Managing fungal pathogens of field crops in sustainable agriculture and agrovariety internet application as a case study. *Journal of Plant Protection Research*, 65(1), 1-26. <https://doi.org/10.24425/jppr.2025.153820>.
- Eid A.M., Fouda, A., Abdel-Rahman, M.A., Salem, S.S., Elsaied, A., Oelmüller, R., Hijri, M., Bhowmik, A., Elkelish, A., Hassan, S.E.D. (2021). Harnessing bacterial endophytes for promotion of plant growth and biotechnological applications: An overview. *Plants*, 10. <https://doi.org/10.3390/plants10050935>.
- Etminani, F., Harighi, B. (2018). Isolation and identification of endophytic bacteria with plant growth promoting activity and biocontrol potential from wild pistachio trees. *The Plant Pathology Journal*, 34(3), 208-217. <https://doi.org/10.5423/PPJ.OA.07.2017.0158>.
- Feng, Y., Zhang, Y., Shah, O.U., Luo, K., Chen, Y. (2023). Isolation and identification of endophytic bacteria *Bacillus* sp. ME9 that exhibits biocontrol activity against *Xanthomonas phaseoli* pv. *manihotis*. *Biology*, 12. <https://doi.org/10.3390/biology12091231>.
- Fouda, A., Eid, A.M., Elsaied, A., El-Belely, E.F., Barghoth, M.G., Azab, E., Gobouri, A.A., Hassan, S.E.D. (2021). Plant growth-promoting endophytic bacterial community inhabiting the leaves of *Pulicaria incisa* (Lam.) DC inherent to arid regions. *Plants*, 10(76). <https://doi.org/10.3390/plants10010076>.
- Gai, Y., Wang, H. (2024). Plant disease: A growing threat to global food security. *Agronomy*, 14(8). <https://doi.org/10.3390/agronomy14081615>.
- Halim, R.A., Hasan, N., Ramachandran, K. (2020). Screening of endophytic bacteria as biocontrol agents against bacteria leaf blight (*Xanthomonas oryzae*). *Hayati Journal of Bioscience*, 27(3). <https://doi.org/10.4308/hjb.27.3.215>.
- Herliyana, E.N., Asmoro, P.P., Munif, A. (2023). Potential of endophytic bacteria in controlling the red jaban leaf spot pathogens in vitro. *Celebes Agricultural*, 4(1). <https://doi.org/10.52045/jca.v4i1.416>.
- Likhita, J., Arya, M., Singh, Y., Tomar, M., Jambhulkar, P., Singh, A., Joshi, V., Choudhary, M., Usha., Chaturvedi, S.K. (2026). Biocontrol potential of endophytic bacteria against *Fusarium* wilt pathogen (*Fusarium oxysporum* f.sp. *ciceris*) in chickpea. *Frontiers in Microbiology*, 17. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2026.1787705>.
- Liu, H., Cheng, H., Xu, S., Zhang, D., Wu, J., Li, Z., Fu, B., Liu, L. (2025). Genetic diversity and growth-promoting functions of endophytic nitrogen-fixing bacteria in apple. *Plants*, 14. <https://doi.org/10.3390/plants14081235>.
- Li, Y., Wei, S., Chen, X., Dong, Y., Zeng, M., Yan, C., Hou, L., Jiao, R. (2023). Isolation of cadmium-resistance and siderophore-producing endophytic bacteria and their potential use for soil cadmium remediation. *Heliyon*, 9. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e17661>.
- Lovecka, P., Kroneislová, G., Novotná, Z., Röderová, J., Demnerová, K. (2023). Plant growth-promoting endophytic bacteria isolated from *Miscanthus giganteus* and their antifungal activity. *Microorganisms*, 11. <https://doi.org/10.3390/microorganisms11112710>.
- Maulidia, V., Soesanto, L., Syamsuddin., Khairan, K., Hamaguchi, T., Hasegawa, K., Sriwati, R. (2020). Secondary metabolites produced by endophytic bacteria against the Root-Knot Nematode (*Meloidogyne* sp). *Biodiversitas*, 21(11). <https://doi.org/10.13057/biodiv/d211130>.

- Miliute, I., Buzaitė, O., Baniulis, D., Stanys, V. (2015). Bacterial endophytes in agricultural crops and their role in stress tolerance: a review. *Zemdirbyste-Agriculture*, 102(4),465-478. <https://doi.org/10.13080/z-a.2015.102.060>.
- Neubauer, U., Furrer, G., Kayser, A., Schulin, R. (2000). Siderophores, NTA, and citrate: Potential soil amendments to enhance heavy metal mobility in phytoremediation. *International Journal of Phytoremediation*, 2(4), 353–368. <https://doi.org/10.1080/15226510008500044>.
- Ngo, V.A., Wang, S.L., Nguyen, V.B., Doan, C.T., Tran, T.N., Tran, D.M., Tran, T.D., Nguyen, A.D. (2020). *Phytophthora* antagonism of endophytic bacteria isolated from roots of black pepper (*Piper nigrum* L.). *Agronomy*, 10(2), 286. <https://doi.org/10.3390/agronomy10020286>.
- Rabbee, M.F., Ali, M.S., Islam, M.N., Rahman, M.M., Hasan, M.M., Baek, K. (2024). Endophyte mediated biocontrol mechanisms of phytopathogens in agriculture. *Research in Microbiology*, 175(8), 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.resmic.2024.104229>.
- Rakhalaru, P., Mampholo, B.M., Mamphogoro, T.P., Thantsha, M.S. (2025). Endophytic and epiphytic microorganisms as biocontrol agents: mechanisms, applications, and metagenomic approaches in tomato cultivation. *Molecules*, 30(18), 1-27. <https://doi.org/10.3390/molecules30183816>.
- Rana, K.L., Kour, D., Kaur, T., Negi, R., Devi, R., Yadav, N., Rai, P.K., Singh, S., Rai, A.K., Yadav, A., Sayyed, R.Z., Yadav, A.N. (2023). Endophytic nitrogen-fixing bacteria: Untapped treasure for agricultural sustainability. *Journal of Applied Biology and Biotechnology*, 11(2).
- Rizzo, D.M., Lichtveld, M., Mazet, J.A.K., Togami, E., Miller, S.A. (2021). Plant health and its effects on food safety and security in a one health framework: four case studies. *One Health Outlook*, 3(6). <https://doi.org/10.1186/s42522-021-00038-7>.
- Sen, A., Saji, J., Faseela, P., Zhang, C., Mohanan, S., Xia, Y. (2026). Exploring the functional roles of endophytic bacteria in plant stress tolerance for sustainable agriculture: diversity, mechanisms, applications, and challenges. *Plants*, 15(2),1-25. <https://doi.org/10.3390/plants15020206>.
- Sharma, M., Mallubhotla, S. (2022). Diversity, antimicrobial activity, and antibiotic susceptibility pattern of endophytic bacteria sourced from *Cordia dichotoma* L. *Frontiers in Microbiology*, 13. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.879386>.
- Sharmila A.M, Johnson J.M, Sam S.S,Chandran D.R, Ajay B, Heera G, Sarada S, Thomas U.C, Alex, S., Radhakrishnan, N.V. (2025). Endophytic and antagonistic *Bacillus amyloliquefaciens* 8SE-IF1-derived nanoparticles encumber phytopathogenic oomycetes, fungi, bacteria, and viruses with enhanced growth in tomato seedlings. *Frontiers in Microbiology*, 16. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2025.1612335>.
- Singh, N.V., Sharma, J., Dongare, M.D., Gharate, R., Chinchure, S., Nanjundappa, M., Parashuram, S., Patil, P.G., Babu, K.D., Mundewadikar, D.M., Salutgi, U., Tatiya, M., Kumar, A., Marathe, R.A. (2023). In vitro and in planta antagonistic effect of endophytic bacteria on blight causing *Xanthomonas axonopodis* pv. *punicae*: A destructive pathogen of pomegranate. *Microorganisms*, 11. <https://doi.org/10.3390/microorganisms11010005>.
- Sudewi, S., Ratnawati., Bangkele, L.I., Idris, Jaya, K., Saleh, A.R. (2022). Aktivitas bakteri endofit asal padi lokal kamba dalam menghambat pertumbuhan koloni *Alternaria porri* secara in vitro. *Agrovital: Jurnal Ilmu Pertanian*, 7(1), 12-17. <http://dx.doi.org/10.35329/agrovital.v7i1.2856>.
- Sun, M., Liang, C., Fu, X., Liu, G., Zhong, Y., Wang, T., Tang, G., Li, P. (2024). Nematocidal activity and biocontrol efficacy of endophytic *Bacillus velezensis* Pt-RP9 from *Pinus tabulaeformis* against pine wilt disease caused by *Bursaphelenchus xylophilus*. *Biological Control*, 196, 1-13. <https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2024.105579>.
- Sun, Y., Jin, J., Wang, X., Zhu, W., Gao, J., Li, J., Xie, Q., Wei, Y., Lu, C., Zhu, G., Yang, F. (2025). Isolation of endophytic phosphate-solubilizing bacteria from chinese *Cymbidium* (*Cymbidium* spp.) Orchid Roots. *Microorganisms*, 13. <https://doi.org/10.3390/microorganisms13102229>.
- Wang, L., Xi, N., Lang, D., Zhou, L., Zhang, Y., Zhang, X. (2022). Potential biocontrol and plant growth promotion of an endophytic bacteria isolated from *Glycyrrhiza uralensis* seeds. *Egyptian Journal of Biological Pest Control*, 32, 1-16. <https://doi.org/10.1186/s41938-022-00556-0>.
- Wend, D., Zorilla, L., Freimoser, F.M., Gallet, A. (2024). Microbial pesticides-challenges and future perspectives for testing and safety assessment with respect to human health. *Environmental Health*, 23(49). <https://doi.org/10.1186/s12940-024-01090-2>.
- Wozniak M, Galazka A, Ty'skiewicz R, Jaroszuk- 'Sciseł J. 2019. Endophytic bacteria potentially promote plant growth by synthesizing different metabolites and their phenotypic/physiological profiles in the biology gen III microplate™ test. *International Journal of Molecular Sciences*, 20. <https://doi.org/10.3390/ijms20215283>.

- Wu ,W., Chen, W., Liu, S., Wu, J., Zhu,Y., Qin, L., Zhu, B. (2021). Beneficial relationships between endophytic bacteria and medicinal plants. *Frontiers in Plant Science*, 12 <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.646146>.
- Zeng, C., Liu, Y., Zhang, B., Zhang, C., Li, N., Ji, L., Lan, C., Qin, B., Yang, Y., Wang, J., Chen, T., Fang, C., Lin, W. (2024). The functional identification and evaluation of endophytic bacteria sourced from the roots of tolerant *Achyranthes bidentata* to overcome monoculture problems of *Rehmannia glutinosa*. *Frontiers in Microbiology*, 15. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2024.1399406>.