

# Review Artikel : Mikroba, Tanaman dan Teknologi sebagai Integrasi Bioteknologi Mikrobial dalam Pertanian Modern

<sup>1</sup>Sri Wahyuni Basoka, <sup>2</sup>Eko Aprianto Johan, <sup>3</sup>Nurchalisah Rustan M, <sup>4</sup>Baihaqi Baihaqi

<sup>1</sup>Jurusan Agroteknologi, Fakultas Pertanian, Universitas Halu Oleo

<sup>2</sup>Jurusan Proteksi Tanaman, Fakultas Pertanian, Universitas Halu Oleo

<sup>3</sup>Jurusan Ilmu dan Teknologi Pangan, Fakultas Pertanian, Universitas Halu Oleo

<sup>1</sup>[sriwahyunibasoka@uho.ac.id](mailto:sriwahyunibasoka@uho.ac.id), <sup>2</sup>[ekoapriantojohan@uho.ac.id](mailto:ekoapriantojohan@uho.ac.id), <sup>3</sup>[baihaqi@uho.ac.id](mailto:baihaqi@uho.ac.id)

Submit : 12 Jul 2025 | Diterima : 25 Jul 2025 | Terbit : 27 Jul 2025

## ABSTRAK

Pertanian modern menghadapi tantangan serius seperti penurunan kesuburan tanah, ketergantungan pada bahan kimia sintetis, dan dampak perubahan iklim terhadap produktivitas dan ketahanan pangan. Dalam upaya mencari solusi berkelanjutan, bioteknologi mikrobial muncul sebagai pendekatan potensial melalui pemanfaatan mikroorganisme yang bermanfaat dalam sistem pertanian. Mikroba seperti bakteri penambat nitrogen, pelarut fosfat, dan fungi mikoriza berperan dalam meningkatkan efisiensi pemupukan, pertumbuhan tanaman, dan kesuburan tanah. Penelitian menunjukkan bahwa kombinasi pupuk kimia dan mikroba tertentu dapat mengurangi kebutuhan input sintetis tanpa menurunkan hasil panen. Selain itu, mikroorganisme seperti Plant Growth Promoting Bacteria (PGPR) berkontribusi pada ketersediaan hara dan kesehatan tanaman. Kemajuan bioteknologi juga mempermudah proses inokulasi serta identifikasi mikroorganisme unggul yang efektif sebagai pupuk hayati. Dengan pendekatan ini, pertanian berpotensi bergerak menuju sistem yang lebih efisien, ramah lingkungan, dan berkelanjutan.

**Kata Kunci:** Bioteknologi Mikrobial, Pupuk Hayati, Mikroorganisme Tanah, Pertanian Berkelanjutan, PGPR.

## PENDAHULUAN

Pertanian modern tengah menghadapi tantangan besar, mulai dari penurunan kesuburan tanah, ketergantungan berlebihan pada bahan kimia sintetis, hingga ancaman perubahan iklim yang memperburuk produktivitas dan ketahanan pangan. Dalam konteks ini, muncul kebutuhan mendesak untuk mencari alternatif yang lebih berkelanjutan dan ramah lingkungan. Salah satu pendekatan yang kini semakin mendapat perhatian adalah pemanfaatan bioteknologi mikrobial, yaitu penerapan mikroorganisme yang bermanfaat untuk meningkatkan efisiensi dan keberlanjutan sistem pertanian. Bioteknologi adalah ilmu pengetahuan yang mempelajari tentang makhluk hidup baik mikroorganisme maupun makroorganisme, perkembangan, pemanfaatan serta keterkaitan bidang ilmu tersebut terhadap ilmu lainnya (Wahyuni *et al.*, 2024).

Pada konteks bioteknologi pertanian, peran mikroorganisme ini dimanfaatkan dalam pengembangan pupuk hayati dan biopestisida dalam mengurangi ketergantungan petani dengan bahan kimia. Salah satu riset terkait pemanfaatan mikroorganisme bermanfaat yaitu pemberian fungi mikoriza dengan dosis 50% pupuk kimia NPK pada tanah diketahui dapat menghemat kebutuhan NPK sebesar 25% dengan produksi maksimal yang mampu dicapai pada penambahan NPK sebesar 75% (Hazra *et al.*, 2024). Hal ini menjadi peran penting bioteknologi untuk memanfaatkan mikroorganisme sebagai alternatif pupuk ramah lingkungan untuk menggantikan bahan kimia sintetis. Pendekatan ini tidak hanya membantu meningkatkan hasil panen tetapi juga mendukung sistem pertanian berkelanjutan yang lebih bersahabat dengan lingkungan. Dengan memahami potensi mikroorganisme dalam ekosistem pertanian, praktik pertanian dapat ditingkatkan menuju keberlanjutan dan keseimbangan ekosistem yang lebih baik (Zendrato & Lase, 2025).

Keberadaan mikroorganisme dalam pupuk meningkatkan pertumbuhan tanaman dengan membuat nutrisi lebih tersedia atau menggantikan unsur hara tanah atau meningkatkan akses tanaman terhadap unsur hara serta menciptakan bibit unggul, yang dikenal sebagai *Plant Growth Promoting Bacteria (PGPR)*, beberapa contoh mikroorganisme yang dapat digunakan dalam meningkatkan kesuburan tanah yaitu bakteri penambat nitrogen non-simbiotik antara lain : genus *Rhodospirillum*, *Rhodomicrobium*, *Rhodopseudomonas*, *Azotobacter*, *Azotomonas*, *Beijerinckia*, *P. azotogenensis*, *K. pneumoniae*, *E. cloecae*, *E. intermedia*, *D. vulgaris*, *D. desulfuricans*, *Methanobacterium*, *B. polymyxa*, *B. macerans*; bakteri pelarut fosfor : *Bacillus megaterium* var. *phosphaticum* dan genus *Pseudomonas* (Widiyanti *et al.*, 2024). Kemajuan bioteknologi tidak hanya memudahkan dalam proses inokulasi dan penyusunan formulasi pupuk hayati, tetapi juga memudahkan dalam identifikasi dan karakterisasi jenis-jenis mikroorganisme yang menunjukkan efektivitas tinggi sebagai pupuk hayati. Kumpulan mikroorganisme terpilih meningkatkan efektivitas penambatan hara tertentu dan memfasilitasi penyediaannya bagi tanaman (Sriwahyuni & Parmila, 2019).

## TINJAUAN PUSTAKA

### Konsep Dasar Bioteknologi Mikrobial dalam Pertanian

Bioteknologi mikrobial adalah penerapan mikroorganisme dalam proses bioteknologi untuk meningkatkan produktivitas pertanian, memulihkan kualitas lingkungan tanah, dan mengurangi ketergantungan terhadap bahan kimia sintetis (Sarsaiya *et al.*, 2024). Mikroba seperti *Rhizobium*, *Azospirillum*, *Trichoderma*, dan *Bacillus* diketahui memiliki potensi besar dalam memperkuat ketahanan tanaman terhadap cekaman biotik dan abiotik, serta memperbaiki struktur dan kesuburan tanah (Mahanty *et al.*, 2017).

### Peran Mikroorganisme dalam Pupuk Hayati dan Biokontrol

Pupuk hayati (*Biofertilizer*) berbasis mikroorganisme telah menjadi alternatif penting untuk menggantikan pupuk anorganik. *Rhizobium* berperan dalam fiksasi nitrogen pada leguminosa, sedangkan *Azospirillum* meningkatkan pertumbuhan akar dan penyerapan hara tanaman sereal (Bhattacharyya & Jha, 2012). Di sisi lain, *Trichoderma spp.* adalah simbiosis tanaman yang tidak bersifat patogen dan efektif sebagai agen biokontrol yang ramah lingkungan dan murah. Mereka mampu menekan pertumbuhan patogen tanaman melalui mekanisme seperti: Antibiosis (menghasilkan antibiotik), Kompetisi memperebutkan ruang dan nutrisi, dan Mikoparasitisme (menyerang patogen langsung). Selain mengendalikan patogen, *Trichoderma* juga meningkatkan: Ketahanan tanaman, Pertumbuhan dan hasil panen, serta Efisiensi penyerapan nutrisi dan pupuk. tidak merusak keseimbangan mikroba tanah dan tidak berdampak negatif terhadap organisme menguntungkan lainnya. Penggunaan *Trichoderma* sangat potensial sebagai solusi aman dan berkelanjutan dalam berbagai sistem pertanian (Sood *et al.*, 2020).

### Mikroba dan Remediasi Tanah dalam Konteks Degradasi Lingkungan

Penurunan kesuburan tanah dan pencemaran oleh pestisida serta logam berat merupakan tantangan besar dalam pertanian modern. Mikroorganisme tertentu, seperti *Pseudomonas* dan *Mycorrhiza*, digunakan dalam bioremediasi untuk mendegradasi atau menstabilkan kontaminan. (Zeng *et al.*, 2020). Secara keseluruhan, pemanfaatan berbagai kelompok bakteri, seperti *Rhizobia*, *Azotobacter*, dan BPF, memiliki peran penting dalam mendukung pertumbuhan tanaman pada lahan terdegradasi dan marginal. Penggunaan bakteri ini sebagai biofertilizer dan PGPR telah menunjukkan potensi dalam meningkatkan produktivitas tanaman dan mengurangi ketergantungan pada pupuk kimia, sehingga berkontribusi pada pembangunan hutan yang berwawasan lingkungan dan berkelanjutan (Hajoeningtjas, 2023).

### Integrasi Teknologi dan Mikrobioma Tanah

Integrasi teknologi modern dengan mikrobioma tanah menjadi pendekatan strategis dalam mewujudkan pertanian presisi dan berkelanjutan. Mikrobioma tanah, yang terdiri atas berbagai mikroorganisme seperti bakteri, fungi, dan aktinomisetes, memainkan peran penting dalam siklus hara, pembentukan struktur tanah, ketahanan tanaman, dan penguraian bahan organik. Menurut

hasil riset Sarsaiya *et al.* (2024) menekankan bahwa teknologi ini membuka peluang besar dalam menemukan mikroba fungsional tersembunyi, termasuk mikroorganisme yang belum dapat dikultur secara konvensional.

### Urgensi Bioteknologi Mikrobial dalam Ketahanan Pangan dan Perubahan Iklim

Pada beberapa dekade mendatang, pemanfaatan mikroorganisme yang memberikan manfaat dalam produksi tanaman berkelanjutan akan menjadi prioritas utama (Rustan *et al.*, 2024). Ekosistem dengan keanekaragaman hayati tertinggi di Bumi diyakini berada di dalam matriks tanah, yang berfungsi sebagai tempat penampungan utama bagi mikroorganisme yang berinteraksi dengan tanaman. Proses-proses penting di lingkungan ini yang secara khusus memengaruhi kesehatan tanaman yang dikontrol oleh oleh mikrobioma tanah (S & NT, 2024). Adanya bioteknologi memiliki potensi besar dalam meningkatkan hasil panen untuk budidaya, pemuliaan dan pengolahan produk pertanian. Pendekatan bioteknologi baru-baru ini yaitu dalam pengembangan varietas tanaman baru dengan produksi lebih tinggi dan kandungan gizi lebih tinggi, lebih tahan hama dan penyakit, serta dapat mengurangi kebutuhan pupuk dan bahan kimia pertanian mahal lainnya jika kebutuhannya sudah terpenuhi dari genetik tanaman. Pengembangan varietas unggul melalui bioteknologi disebut juga dengan teknologi pemuliaan, yang dapat dilakukan dengan dua cara, yaitu bioteknologi konvensional dan bioteknologi maju atau modern. (Rahmawati & Fitrianiingsih, 2023)

### METODE PENELITIAN

Artikel ini menggunakan pendekatan *systematic literature review* untuk menelusuri, memilih dan menganalisis publikasi ilmiah yang relevan dengan topik bioteknologi mikrobial dalam konteks pertanian berkelanjutan. Penelusuran literatur dilakukan secara sistematis guna memperoleh informasi terkini mengenai penggunaan mikroorganisme dalam pupuk hayati, pengendalian hayati (biokontrol), dan remediasi tanah, serta integrasi teknologi dalam pengembangan mikroba pertanian. Pencarian literatur dilakukan melalui sejumlah basis data ilmiah bereputasi nasional maupun internasional, antara lain: Scopus, Google Scholar, ResearchGate dan Sinta. Kata kunci yang digunakan dalam pencarian meliputi kombinasi berikut: “*microbial biotechnology*”, “*biofertilizer*”, “*biopesticide*”, “*soil remediation*”, “*plant-microbe interaction*”, “*sustainable agriculture*”, “*climate-resilient farming*” dan “*Rhizobium*”, “*Azospirillum*”, “*Trichoderma*”, “*Bacillus*”.

### HASIL DAN PEMBAHASAN

Bioteknologi adalah gabungan kata biologi dan teknologi yang artinya ilmu dan teknologi terapan dengan memanfaatkan makhluk hidup untuk memproduksi jasa atau barang agar dapat dimanfaatkan oleh manusia (Radja & Kaleka, 2024). Pertanian merupakan sektor yang vital untuk ketahanan pangan dunia, namun dengan berkembangnya teknologi dan perubahan iklim, sektor ini menghadapi tantangan besar. Salah satu pendekatan yang dapat meningkatkan hasil pertanian secara berkelanjutan adalah dengan memanfaatkan potensi mikroorganisme (Baihaqi *et al.*, 2023). Mikrobiologi pertanian adalah cabang ilmu yang mempelajari mikroorganisme yang ada di lingkungan pertanian dan pengaruhnya terhadap proses pertanian. Mikroorganisme seperti bakteri, fungi dan arkea, memiliki berbagai manfaat, mulai dari perbaikan kualitas tanah hingga pengendalian hama dan penyakit tanaman (Zai & Lase, 2025).

Mikrobioma tanah merupakan komunitas mikroorganisme kompleks yang memainkan peran penting dalam siklus hidup tumbuhan termasuk fase perkecambahan benih. Komunitas mikroba tanah berkontribusi pada kesehatan tanaman dan merupakan kompleks yang sangat beragam. Komunitas mikroba tanah memengaruhi pertumbuhan tanaman dengan berbagai cara, seperti meningkatkan penyerapan nutrisi, meningkatkan sekresi eksudat akar dan meningkatkan pertahanan tanaman terhadap patogen (Irawan *et al.*, 2025).

*Azotobacter* merupakan salah satu bakteri penambat nitrogen aerobik nonsimbiotik yang mampu menambat nitrogen dalam jumlah yang cukup tinggi, bervariasi  $\pm 2 - 15$  mg nitrogen/gram sumber karbon, kemampuan ini tergantung kepada sumber energi, keberadaan

nitrogen yang terpakai, mineral, reaksi tanah dan faktor lingkungan yang lain, serta kehadiran bakteri tertentu. Inokulasi *Azotobacter* efektif dalam meningkatkan hasil panen tanaman budidaya pada tanah yang dipupuk dengan bahan organik yang cukup. Sediaan bakteri yang mengandung sel-sel *Azotobacter* yang diberi nama *Azotobacterin* yang diproduksi dan digunakan di Rusia dan negara-negara Eropa Timur terbukti menguntungkan dalam meningkatkan hasil panen tanaman budidaya seperti gandum, barley, jagung, gula bit, wortel, kubis dan kentang sebesar 12% dibandingkan dengan tanaman kontrol. Respon ini diduga disebabkan oleh faktor tumbuh yang dihasilkan oleh *Azotobacter* (Rahmi, 2014).

Pemanfaatan *biofertilizer* dalam pertanian tidak hanya berpotensi meningkatkan hasil pertanian, tetapi juga membantu memperbaiki struktur dan keseimbangan ekosistem tanah. Mikroorganisme yang terkandung dalam *biofertilizer*, seperti bakteri pengikat nitrogen (*Rhizobium*) atau jamur arbuskula mikoriza (AMF), dapat secara alami meningkatkan ketersediaan unsur hara yang dibutuhkan oleh tanaman. Sebagai contoh, bakteri pengikat nitrogen dapat mengubah nitrogen dari udara menjadi bentuk yang dapat digunakan oleh tanaman, sementara jamur mikoriza membantu tanaman dalam menyerap air dan nutrisi dari tanah yang lebih dalam. Dengan cara ini, tanaman dapat tumbuh lebih sehat dan optimal meskipun kondisi tanah kurang subur atau terbatas nutrisi (Zulfahmi, 2025).

Berbagai spesies mikroba dari kelompok cendawan dan bakteri telah berhasil diisolasi dan dievaluasi keefektifannya sebagai bahan aktif pupuk dan pestisida hayati yang efektif. Pengembangan pupuk dan pestisida hayati yang dihasilkan diharapkan dapat meningkatkan daya saing komoditas pertanian melalui sistem produksi ramah lingkungan dengan memanfaatkan sumber daya alam secara optimal guna mendukung industri pertanian berdaya saing dan berkelanjutan (Hanudin *et al.*, 2018). Hasil penelitian pemanfaatan mikroba yang dapat memacu pertumbuhan dan meningkatkan ZPT pada tanama, menunjukkan bahwa aplikasi pupuk hayati FMA bersama MHB mempengaruhi pertumbuhan tanaman yaitu tinggi tanaman sebesar 9,01 cm atau 19,6% lebih tinggi dibandingkan dengan kontrol dan meningkatkan bobot segar sebesar 12,72 g atau 60% lebih tinggi dibandingkan kontrol. Peningkatan pertumbuhan tanaman ini terkait dengan tingkat hormon tumbuh yang dihasilkan oleh fungi mikoriza arbuskula (FMA) dan *mycorrhizal helper bacteria* (MHB) yang juga lebih tinggi yaitu 4,06, 8,62 dan 5,77  $\mu\text{mol/mol}$  NTP berturut-turut untuk auksin, giberelin dan sitokinin (Nurbaity *et al.*, 2024).

Selain itu, perkembangan bioteknologi mikroba juga turut berkontribusi terhadap peningkatan ketahanan tanaman akibat infeksi patogen dapat dikendalikan menggunakan aplikasi bakteri diazotrof. Hasil penelitian Isnaeni *et al.* (2022) memperlihatkan hasil peningkatan ketahanan tanaman padi yang terinfeksi jamur *R. solani*, ditandai dengan penurunan intensitas penyakit hingga 70%, peningkatan kandungan saponin, tanin dan hidrokuinon, serta peningkatan pertumbuhan tinggi tanaman dan panjang akar total padi. Induksi ketahanan terimbas pada tanaman yang distimulasi oleh *PGPR* terjadi ketika terjadi interaksi antara tanaman dan mikroba berguna, tetapi membutuhkan waktu untuk mengekspresikan gen PR protein terkait pathogenesis, peningkatan aktivitas zat terkait pertahanan, seperti fenilalanin amonia-liase, polifenol oksidase, peroksidase, -1, 3 glukukanase, dan kitinase, dan akumulasi reaktif spesies oksigen (Yu *et al.*, 2022).

Pada peningkatan hasil pertanian yang memberikan dampak positif, riset yang dilakukan oleh Qi *et al.* (2025) di tanaman lobak (*Raphanus sativus L.*) melaporkan bahwa penggunaan *Bacillus* berbasis bio-organik fertiliser meningkatkan kualitas dan hasil panen. *Biofertilizer* mengubah komunitas mikroba tanah sehingga memperbaiki produktivitas dan mutu tanaman. Pada penelitian yang diterbitkan di *BMC Plant Biology* (2025) menegaskan bahwa kombinasi mikroba probiotik tanaman (*PGPR* dan *PPB*) dengan pengurangan 25 % pupuk kimia mampu meningkatkan berat tanaman, panjang daun, dan total hasil panen selada, bahkan melampaui perlakuan penuh pupuk kimia (Sen *et al.*, 2025).

Berikut adalah grafik tren penggunaan mikroorganisme dalam pertanian selama periode 2020–2025.



Gambar 1. Grafik tren penggunaan mikroorganisme tahun 2020-2025

Pada Gambar 1. Grafik ini menunjukkan bahwa penggunaan **biofertilizer**, **biopestisida**, dan **mikroba untuk remediasi tanah** mengalami peningkatan signifikan dari tahun ke tahun—mengindikasikan perhatian dan adopsi yang makin luas terhadap bioteknologi mikrobial dalam sektor pertanian berkelanjutan.

### KESIMPULAN

Bioteknologi mikrobial merupakan pendekatan strategis dalam menghadapi tantangan pertanian modern, seperti penurunan kesuburan tanah dan tingginya ketergantungan pada pupuk kimia sintesis. Pemanfaatan mikroorganisme seperti bakteri penambat nitrogen, pelarut fosfat, dan fungi mikoriza terbukti mampu meningkatkan ketersediaan hara, efisiensi pemupukan, dan pertumbuhan tanaman secara alami. Pendekatan ini tidak hanya mendukung produktivitas pertanian, tetapi juga memperkuat sistem pertanian yang lebih ramah lingkungan dan berkelanjutan. Dengan dukungan kemajuan bioteknologi, formulasi dan aplikasi pupuk hayati dapat ditingkatkan untuk menjawab kebutuhan pertanian masa depan yang efisien, adaptif, dan berwawasan ekologi.

### REFERENSI

- Baihaqi, B., Nuraida, N., Hakim, S., Fridayati, D., & Suci, I. A. (2023). Pengaruh Metode dan Lama Fermentasi Terhadap Kualitas Fisik Pliek U Tradisional Aceh. *Jurnal Agrosains Universitas Panca Bhakti*, 16(2), 1-4.
- Bhattacharyya, P. N., & Jha, D. K. (2012). Plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR): emergence in agriculture. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 28(4), 1327–1350. <https://doi.org/10.1007/s11274-011-0979-9>
- Hajoeningtjas, O. D. (2023). Potensi Mikroorganisme Lokal pada Reklamasi Lahan Terdegradasi Sebagai Pendukung Terwujudnya Ketahanan Pangan Nasional. *Proceedings Series on Physical & Formal Sciences*, 5. <https://doi.org/10.30595/pspfs.v5i.747>
- Hanudin, H., Budiarto, K., & Marwoto, B. (2018). Potensi Beberapa Mikroba Pemacu Pertumbuhan Tanaman Sebagai Bahan Aktif Pupuk Dan Pestisida Hayati. *Jurnal Penelitian Dan Pengembangan Pertanian*, 37(2), 59. <https://doi.org/10.21082/jp3.v37n2.2018.p59-70>
- Hazra, F., Nur Istiqomah, F., & Auliana Azzahra, B. (2024). Peran Mikoriza Powder dan Granul dalam Meningkatkan Pertumbuhan dan Produksi Bawang Merah (*Allium cepa* var. *aggregatum*). *Jurnal Hortikultura Indonesia*, 15(3), 172–179. <https://doi.org/10.29244/jhi.15.3.172-179>
- Irawan, N., Putri, C. R., Pranita, S. D., Edelwis, T. W., Nurmiati, N., Studi, P., Biologi, P., Biologi, D., Andalas, U., & Unand, J. R. (2025). Peran Mikrobioma Tanah Dalam Mempengaruhi Perkecambah sebagai Faktor Pendukung Pertanian Berkelanjutan. *Zarah*, 13(1), 36–45. <https://ojs.umrah.ac.id/index.php/zarah/article/view/7271>
- Isnaeni, F. C., Mugiastuti, E., Leana, N. W. A., Oktaviani, E., & Purwanto, P. (2022). Induksi

- ketahanan tanaman padi terhadap serangan pathogen busuk pelepah (*Rhizoctonia solani*) menggunakan halotoleran bakteri Diazotrof asal pantai utara Pemasang, Jawa Tengah. *Jurnal AGRO*, 8(1), 12–25. <https://doi.org/10.15575/18516>
- Mahanty, T., Bhattacharjee, S., Goswami, M., Bhattacharyya, P., Das, B., Ghosh, A., & Tribedi, P. (2017). Biofertilizers: a potential approach for sustainable agriculture development. *Environmental Science and Pollution Research*, 24(4), 3315–3335. <https://doi.org/10.1007/s11356-016-8104-0>
- Nurbaity, A., Suminar, E., & Istifadah, N. (2024). Kandungan Hormon dan Pertumbuhan Tanaman pada Bioassay Bibit Kentang yang Diberi Fungi Mikoriza Arbuskula dan Mycorrhizal Helper Bacteria. *Agrikultura*, 35(1), 1. <https://doi.org/10.24198/agrikultura.v35i1.49851>
- Rustan N M, Wahyuni, S., Baihaqi, B., Nafilawati, W. O., Ningsih, M. L., & Febryansyah, F. (2024). Bioteknologi Pangan Berbasis Mikroorganisme Rekayasa Genetika: Tren dan Tantangan Global. *Jurnal Minfo Polgan*, 13(2), 2521-2533.
- Qi, Y., Wu, Z., Wang, Y., Zhou, R., Liu, L., Wang, Y., Zhao, J., & Jiang, F. (2025). Bacillus Bio-Organic Fertilizer Altered Soil Microorganisms and Improved Yield and Quality of Radish (*Raphanus sativus* L.). *Plants*, 14(9), 1389. <https://doi.org/10.3390/plants14091389>
- Radja, A. R., & Kaleka, M. U. (2024). Penerapan Bioteknologi Di Sektor Pertanian. *Jurnal Ilmu Pertanian Tropis (JIPT)*, 1(1), 18–24.
- Rahmawati, A., & Fitrianiingsih, D. (2023). Aplikasi Bioteknologi pada Tanaman sebagai Alternatif Pencegahan Krisis Pangan. *Agritechpedia: Journal of Agriculture and Technology*, 1(1), 57–63.
- Rahmi, R. (2014). Kajian Efektifitas Mikroba Azotobacter Sp. Sebagai Pemacu Pertumbuhan Tanaman Kakao (*Theobroma Cacao* L.). *Journal Galung Tropika*, 3(2), 44–53. <https://doi.org/10.31850/jgt.v3i2.77>
- S, A., & NT, K. (2024). Role of Microbes in Biotechnology and Sustainable Agriculture. *SunText Review of BioTechnology*, 5(1). <https://doi.org/10.51737/2766-5097.2024.053>
- Sarsaiya, S., Yadav, A. N., Tiwari, P., & Singh, R. (2024). Editorial: Futuristic plant microbes biotechnology and bioengineering. *Frontiers in Microbiology*, 15. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2024.1514583>
- Sen, K., Nurgul, Kocaman, Ayhan, Aydemir, & Ete, Ö. (2025). The role of chemical fertilizer reduction and different microbial inoculants on yield increase in lettuce cultivation. *BMC Plant Biology*, 25(1), 981. <https://doi.org/10.1186/s12870-025-06986-w>
- Sood, M., Kapoor, D., Kumar, V., Sheteiwy, M. S., Ramakrishnan, M., Landi, M., Araniti, F., & Sharma, A. (2020). Trichoderma: The “Secrets” of a Multitalented Biocontrol Agent. *Plants*, 9(6), 762. <https://doi.org/10.3390/plants9060762>
- Sriwahyuni, P., & Parmila, P. (2019). PERAN BIOTEKNOLOGI DALAM PEMBUATAN PUPUK HAYATI. *Agro Bali: Agricultural Journal*, 2(1). <https://doi.org/10.37637/ab.v2i1.369>
- Wahyuni, S., Noviani, N., Sartika, A., Habibie, D., & Handayani, L. (2024). Peran Bioteknologi Dalam Keterkaitan Berbagai Aspek Bidang Ilmu Pengetahuan Serta Mewujudkan Inovasi dan Kreatifitas di Kalangan Mahasiswa Universitas Harapan Medan. *Jurnal Pengabdian West Science*, 3(01), 73–82. <https://doi.org/10.58812/jpws.v3i01.917>
- Widiyanti, N. L. P. M., Karyasa, I. W., Pertiwi, N. P. D., Citrawathi, D. M., & Bestari, I. A. P. (2024). Mikroba : Dalam Perspektif Tujuan Pembangunan Berkelanjutan (SDGs). *Wahana Matematika Dan Sains: Jurnal Matematika, Sains, Dan Pembelajarannya*, 17(2), 56–77. <https://doi.org/10.23887/wms.v17i2.52891>
- Yu, Y., Gui, Y., Li, Z., Jiang, C., Guo, J., & Niu, D. (2022). Induced Systemic Resistance for Improving Plant Immunity by Beneficial Microbes. *Plants*, 11(3), 386. <https://doi.org/10.3390/plants11030386>
- Zai, F. K., & Lase, N. K. (2025). Peran Mikrobiologi dalam Bidang Pertanian untuk Menunjang Ketahanan Pangan dan Keberlanjutan Ekosistem : Kajian Literatur. *Hidroponik : Jurnal Ilmu Pertanian Dan Teknologi Dalam Ilmu Tanaman*, 2(1), 64–70. <https://doi.org/10.62951/hidroponik.v2i1.224>

- Zendrato, E. T. A., & Lase, N. K. (2025). Peran Mikroorganisme dalam Meningkatkan Produktivitas Tanaman: Pendekatan Bioteknologi Berbasis Mikrobiologi Pertanian. *Hidroponik: Jurnal Ilmu Pertanian Dan Teknologi Dalam Ilmu Tanaman*, 2(1), 142–151. <https://doi.org/10.62951/hidroponik.v2i1.234>
- Zeng, X., Zou, D., Wang, A., Zhou, Y., Liu, Y., Li, Z., Liu, F., Wang, H., Zeng, Q., & Xiao, Z. (2020). Remediation of cadmium-contaminated soils using Brassica napus: Effect of nitrogen fertilizers. *Journal of Environmental Management*, 255, 109885. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.109885>
- Zulfahmi, S. R. A. S. E. J. (2025). Pemanfaatan Pupuk Biofertilizer dalam Sistem Pertanian Berkelanjutan dan Dampaknya pada Pertumbuhan dan Hasil Tanaman Kedelai (*Glycine max L.*). *Jurnal Pendidikan Tambusai*, 9, 6336–6345.