



Biogenerasi Vol 10 No 4, 2025
Biogenerasi: Jurnal Pendidikan Biologi
Universitas Cokroaminoto Palopo
<https://e-journal.my.id/biogenerasi>
e-ISSN 2579-7085

KARAKTERISASI ISOLAT BAKTERI RIZOSFER JAGUNG HIBRIDA (*Zea mays* L.) PADA TANAH MASAM

Akhmad Syakur*

Jurusan Pendidikan IPA, FMIPA, Universitas Negeri Makassar, Indonesia

*Corresponding author E-mail: akhmad.syakur@unm.ac.id

DOI : <https://doi.org/10.30605/cq4z0s16>

Accepted : 1 Desember 2025 Approved : 20 Desember 2025 Published : 24 Desember 2025

Abstract

Acidic soil is one of the major constraints in maize cultivation because low soil pH can increase the solubility of Al and Fe, inhibit root growth, and reduce nutrient availability, particularly phosphorus. Rhizosphere bacteria have the potential to support plant growth through various mechanisms; therefore, the exploration of local bacterial isolates from acidic soil environments is important. This study aimed to isolate and characterize rhizosphere bacteria associated with hybrid maize grown in acidic soil in Moncongloe Village, Maros Regency. Bacterial isolation was carried out using serial dilution and cultivation on Nutrient Agar (NA) medium, followed by colony purification and characterization based on colony morphology, Gram reaction using 3% KOH, and catalase activity using 3% H₂O₂. The results showed that 14 bacterial isolates were obtained from maize rhizosphere samples for further characterization. All isolates showed a Gram-positive reaction, while the catalase test revealed that 11 isolates (78.57%) were catalase-positive and 3 isolates (21.43%) were catalase-negative. Differences in morphological and basic biochemical characteristics indicate the diversity of rhizosphere bacterial isolates capable of growing under acidic soil conditions. These isolates have the potential to serve as local microbial candidates for biofertilizer development; however, further studies are required to evaluate their PGPR functional traits, biosafety, and molecular identification.

Keywords : hybrid maize, acidic soil, rhizosphere, bacterial isolation, characterization.

PENDAHULUAN

Jagung (*Zea mays L.*) merupakan komoditas penting untuk pangan, pakan, dan agroindustri. Upaya peningkatan produksi jagung pada lahan tropis masih sering bergantung pada pupuk dan pestisida sintetis, padahal penggunaan input kimia yang tinggi dapat meningkatkan biaya produksi dan menurunkan kualitas tanah apabila tidak disertai pengelolaan kesuburan yang berkelanjutan. Oleh karena itu, pendekatan berbasis mikroba tanah mulai banyak dikembangkan sebagai alternatif pendukung produktivitas tanaman yang lebih ramah lingkungan (Chandran et al., 2021; Shahwar et al., 2023; Díaz-Rodríguez et al., 2025).

Tanah masam menjadi pembatas utama dalam budidaya jagung karena pH rendah dapat meningkatkan kelarutan aluminium dan besi, memicu toksisitas Al, serta menghambat pertumbuhan akar. Kondisi tersebut juga menyebabkan fosfor mudah terikat oleh oksida Al dan Fe sehingga ketersediaannya bagi tanaman menjadi rendah. Akibatnya, penyerapan air dan hara oleh tanaman terganggu, dan respons terhadap pemupukan menjadi kurang optimal (Che et al., 2023; Du et al., 2024; Tusar et al., 2024).

Rizosfer merupakan zona tanah yang dipengaruhi langsung oleh aktivitas akar melalui pelepasan eksudat, lendir, dan sisa jaringan akar. Zona ini memiliki aktivitas biologis tinggi karena menyediakan sumber karbon dan sinyal kimia yang memengaruhi komposisi mikroorganisme di sekitar perakaran. Bakteri rizosfer yang mampu beradaptasi pada kondisi tanah masam berpotensi berperan sebagai plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR), antara lain melalui peningkatan ketersediaan hara, produksi hormon tumbuh, dan penguatan toleransi tanaman terhadap cekaman (Fu et al., 2023; Upadhyay et al., 2022; Wang et al., 2024).

Pengembangan biofertilizer yang efektif memerlukan isolat lokal yang sesuai dengan kondisi ekologis lahan target. Isolat yang berasal dari tanah masam diduga memiliki kemampuan adaptasi lebih baik terhadap pH rendah dan keterbatasan hara dibandingkan isolat dari lingkungan yang berbeda. Karakterisasi awal melalui pengamatan morfologi koloni dan uji biokimia dasar diperlukan untuk memetakan keragaman isolat

sebelum dilakukan pengujian fungsional dan molekuler lebih lanjut (dos Reis et al., 2024; Li et al., 2024; Mukhtar et al., 2025). Berdasarkan hal tersebut, penelitian ini dilakukan untuk mengisolasi dan mengarakterisasi bakteri rizosfer jagung hibrida pada tanah masam di Desa Moncongloe, Kabupaten Maros, sebagai dasar seleksi kandidat mikroba lokal yang berpotensi dikembangkan sebagai biofertilizer.

METODE

Penelitian dilaksanakan pada bulan Februari sampai Juli 2025. Pengambilan sampel dilakukan pada lahan jagung hibrida di Desa Moncongloe, Kabupaten Maros. Tahap isolasi dan karakterisasi bakteri dilakukan di Laboratorium Bioteknologi Departemen Hama dan Penyakit Tumbuhan, Fakultas Pertanian, Universitas Hasanuddin.

Bahan yang digunakan meliputi sampel tanah rizosfer jagung, media Nutrient Agar (NA), akuades steril, alkohol 70%, larutan KOH 3%, dan H₂O₂ 3%. Alat yang digunakan meliputi kantong sampel steril, cool box, laminar air flow, autoklaf, inkubator, vortex, mikropipet, tabung reaksi, cawan petri, jarum ose, bunsen, kaca objek, dan alat dokumentasi.

Sampel rizosfer diambil dari tanah yang melekat pada perakaran jagung hibrida. Pengambilan sampel dilakukan pada beberapa titik di sekitar perakaran tanaman, kemudian tanah rizosfer dikompositkan, dimasukkan ke dalam kantong steril, diberi label, dan dibawa ke laboratorium menggunakan cool box. Sampel diproses secepat mungkin untuk menjaga viabilitas bakteri.

Sebanyak 1 g sampel tanah rizosfer disuspensikan ke dalam 10 mL akuades steril dan dihomogenkan. Suspensi tersebut diencerkan secara bertingkat hingga diperoleh pengenceran yang sesuai untuk mendapatkan koloni terpisah. Suspensi dari beberapa tingkat pengenceran diinokulasikan pada media NA secara aseptik, kemudian diinkubasi pada suhu 28-30°C selama 24-48 jam. Koloni yang menunjukkan perbedaan morfologi dipilih, dimurnikan dengan metode gores pada media NA baru, dan diberi kode isolat untuk karakterisasi lanjutan.

Karakterisasi morfologi dilakukan dengan mengamati ciri makroskopis koloni, meliputi ukuran, bentuk, tepi, elevasi, dan warna koloni. Uji reaksi Gram dilakukan menggunakan metode KOH 3%, yaitu dengan

mencampurkan biakan bakteri pada satu tetes KOH 3% di atas kaca objek. Pembentukan lendir atau benang menunjukkan reaksi Gram negatif, sedangkan tidak terbentuknya lendir menunjukkan reaksi Gram positif. Uji katalase dilakukan dengan meneteskan H₂O₂ 3% pada biakan segar; terbentuknya gelembung menunjukkan hasil katalase positif.

Data hasil isolasi dan karakterisasi dianalisis secara deskriptif. Hasil pengamatan disajikan dalam bentuk uraian naratif dan tabel untuk menggambarkan keragaman morfologi, reaksi Gram, dan reaksi katalase isolat bakteri rizosfer jagung pada tanah masam.

HASIL PENELITIAN

Keanekaragaman Isolat Bakteri Rizosfer

Isolasi bakteri dari tanah rizosfer jagung hibrida pada tanah masam menghasilkan koloni dengan karakter morfologi yang bervariasi. Berdasarkan perbedaan morfologi koloni dan kestabilan pertumbuhan selama proses pemurnian, diperoleh 14 isolat bakteri yang digunakan untuk karakterisasi lebih

lanjut. Isolat tersebut diberi kode SUT, SBA, SSE, STI, dan STE sesuai kelompok sampel. Perbedaan warna, bentuk, ukuran, tepi, dan elevasi koloni menunjukkan adanya keragaman bakteri rizosfer yang mampu tumbuh pada media NA.

Keragaman morfologi koloni menjadi indikator awal bahwa isolat yang diperoleh tidak berasal dari satu tipe bakteri yang sama. Meskipun demikian, karakter morfologi belum dapat digunakan untuk memastikan identitas taksonomi bakteri hingga tingkat genus atau spesies. Oleh karena itu, hasil morfologi perlu dilanjutkan dengan uji biokimia dasar dan analisis molekuler agar identifikasi menjadi lebih akurat.

Uji Reaksi Gram dan Uji Katalase

Hasil uji reaksi Gram dan katalase terhadap 14 isolat bakteri rizosfer jagung disajikan pada Tabel 2.1. Uji Gram menggunakan KOH 3% menunjukkan bahwa seluruh isolat yang diuji merupakan bakteri Gram positif. Sementara itu, hasil uji katalase menunjukkan bahwa 11 isolat (78,57%) bersifat katalase positif dan 3 isolat (21,43%) katalase negatif.

Tabel 2.1 Hasil uji reaksi Gram dan uji katalase isolat bakteri rizosfer tanaman jagung

No	Kode Isolat	Reaksi Gram (+)	Reaksi Gram (-)	Reaksi Katalase (+)	Reaksi Katalase (-)
1	SUT	2	0	2	0
2	SBA	1	0	1	0
3	SSE	4	0	3	1
4	STI	2	0	1	1
5	STE	5	0	4	1
Jumlah		14	0	11	3
Persentase (%)		100	0	78,57	21,43

Keterangan: Simbol (+) menunjukkan hasil positif dan simbol (-) menunjukkan hasil negatif. Persentase dihitung dari total 14 isolat yang dikarakterisasi.

Pembahasan

Keberhasilan memperoleh 14 isolat bakteri dari rizosfer jagung menunjukkan bahwa tanah masam masih mendukung keberadaan bakteri kultivable di sekitar perakaran. Rizosfer merupakan lingkungan yang kaya eksudat akar sehingga dapat

menjadi tempat seleksi mikroba yang mampu memanfaatkan senyawa organik dari tanaman. Kondisi ini menjelaskan mengapa komunitas bakteri di sekitar akar sering lebih aktif dan lebih beragam dibandingkan tanah di luar pengaruh perakaran (Bano et al., 2021; Upadhyay et al., 2022).

Pada tanah masam, mikroorganisme yang mampu bertahan umumnya memiliki kemampuan adaptasi terhadap pH rendah, keterbatasan hara, serta tekanan kimia akibat tingginya kelarutan Al dan Fe. Oleh sebab itu, isolat yang diperoleh dari lingkungan tersebut berpeluang memiliki kesesuaian ekologis dengan lahan target. Kesesuaian ini penting dalam pengembangan biofertilizer karena mikroba yang berasal dari habitat setempat cenderung lebih mudah beradaptasi ketika diaplikasikan kembali pada kondisi tanah yang sama (Hakim et al., 2021; Novello et al., 2023; de Andrade et al., 2023).

Variasi morfologi koloni pada isolat yang diperoleh menunjukkan adanya perbedaan karakter fisiologis antarisolat. Perbedaan ukuran, bentuk, tepi, elevasi, dan warna koloni dapat berkaitan dengan kecepatan pertumbuhan, produksi lendir, pembentukan pigmen, serta respons bakteri terhadap media kultur. Namun, morfologi koloni hanya bersifat indikatif dan belum cukup untuk menentukan identitas taksonomi secara pasti. Identifikasi yang lebih kuat tetap memerlukan kombinasi karakterisasi biokimia, fisiologis, dan molekuler, misalnya melalui analisis gen 16S rRNA (Caldeira et al., 2024; Wang et al., 2024; Nunes Ramos et al., 2025).

Seluruh isolat pada penelitian ini menunjukkan reaksi Gram positif. Bakteri Gram positif memiliki dinding sel dengan lapisan peptidoglikan yang tebal dan tidak memiliki membran luar, sehingga selnya relatif tidak mudah rusak oleh larutan KOH 3%. Akibatnya, DNA tidak keluar dan tidak terbentuk lendir atau benang pada uji KOH. Hasil ini berbeda dengan bakteri Gram negatif yang umumnya membentuk lendir karena selnya lebih mudah terdisrupsi oleh larutan alkali (Rinijapsari, 2021; Zhydzetski et al., 2025).

Dominasi bakteri Gram positif pada koleksi isolat ini relevan dengan rizosfer tanaman karena beberapa genus Gram positif, terutama *Bacillus*, banyak dilaporkan sebagai kelompok bakteri yang mampu hidup di daerah perakaran dan mendukung pertumbuhan tanaman. Kelompok tersebut dapat berperan melalui mekanisme pelarutan hara, produksi senyawa antimikroba, pembentukan spora, dan ketahanan terhadap kondisi lingkungan yang kurang menguntungkan. Meskipun demikian, hasil uji Gram belum dapat memastikan genus

isolat, sehingga identifikasi molekuler tetap diperlukan (Dimkić et al., 2022; Morales-Cedeño et al., 2021).

Hasil uji katalase menunjukkan bahwa sebagian besar isolat bersifat katalase positif. Reaksi positif ditandai dengan terbentuknya gelembung oksigen setelah biakan bakteri diberi H₂O₂ 3%. Enzim katalase berfungsi menguraikan hidrogen peroksida menjadi air dan oksigen, sehingga membantu bakteri melindungi diri dari senyawa oksidatif yang bersifat toksik. Kemampuan ini penting bagi bakteri aerob atau fakultatif yang hidup pada lingkungan dengan tekanan oksidatif, termasuk rizosfer yang aktivitas metabolismenya tinggi (Fujiki & Bassik, 2021; Linzner et al., 2022; Sharma et al., 2024).

Secara umum, hasil karakterisasi menunjukkan bahwa isolat bakteri rizosfer jagung pada tanah masam memiliki keragaman morfologi dan perbedaan sifat biokimia dasar. Data ini menjadi dasar awal untuk memilih isolat yang layak diuji lebih lanjut sebagai kandidat PGPR. Tahap lanjutan yang perlu dilakukan meliputi pengujian kemampuan fiksasi nitrogen, pelarutan fosfat, produksi hormon tumbuh, toleransi pH masam, uji keamanan, serta identifikasi molekuler. Pengujian tersebut penting agar isolat yang dipilih tidak hanya mampu tumbuh pada media kultur, tetapi juga memiliki fungsi yang jelas, aman, dan relevan untuk dikembangkan sebagai biofertilizer (dos Reis et al., 2024; Prisa et al., 2023; Shahwar et al., 2023).

SIMPULAN DAN SARAN

Penelitian ini menghasilkan 14 isolat bakteri rizosfer jagung hibrida dari tanah masam di Desa Moncongloe, Kabupaten Maros. Isolat yang diperoleh menunjukkan keragaman morfologi koloni, sehingga mengindikasikan adanya variasi bakteri kultivable di zona rizosfer jagung. Hasil uji reaksi Gram menunjukkan bahwa seluruh isolat merupakan bakteri Gram positif. Uji katalase menunjukkan 11 isolat (78,57%) bersifat katalase positif dan 3 isolat (21,43%) katalase negatif. Berdasarkan hasil tersebut, isolat bakteri rizosfer jagung pada tanah masam berpotensi menjadi sumber kandidat mikroba lokal untuk pengembangan biofertilizer, tetapi perlu dilanjutkan dengan uji fungsional PGPR, uji keamanan, dan

identifikasi molekuler untuk memastikan potensi dan identitasnya secara lebih akurat.

DAFTAR RUJUKAN

- Agarwal, H., Bajpai, S., Mishra, A., Kohli, I., Varma, A., Fouillaud, M., Dufossé, L., & Joshi, N. C. (2023). Bacterial Pigments and Their Multifaceted Roles in Contemporary Biotechnology and Pharmacological Applications. *Microorganisms*, 11(3). <https://doi.org/10.3390/microorganisms11030614>
- Akplo, T. M., Kouelo Alladassi, F., Zoundji, M. C. C., Faye, A., Hernández, M., Yemadje, P. L., Fagnibo, A. H., & Houngnandan, P. (2025). Phosphate solubilization and mobilization: bacteria-mycorrhiza interactions. *Letters in Applied Microbiology*, 78(8). <https://doi.org/10.1093/lambio/ovaf105>
- Alonazi, M. A., Alwathnani, H. A., AL-Barakah, F. N. I., & Alotaibi, F. (2025). Native Plant Growth-Promoting Rhizobacteria Containing ACC Deaminase Promote Plant Growth and Alleviate Salinity and Heat Stress in Maize (*Zea mays* L.) Plants in Saudi Arabia. *Plants*, 14(7), 1–20. <https://doi.org/10.3390/plants14071107>
- Aloo, B. N., Tripathi, V., Makumba, B. A., & Mbega, E. R. (2022). Plant growth-promoting rhizobacterial biofertilizers for crop production: The past, present, and future. *Frontiers in Plant Science*, 13(September), 1–15. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.1002448>
- Bano, S., WU, X., & Zhang, X. (2021). Towards sustainable agriculture: rhizosphere microbiome engineering. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 105, 7141–7160. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s00253-021-11555-w>
- Barreto, J. V. de O., Casanova, L. M., Junior, A. N., Reis-Mansur, M. C. P. P., & Vermelho, A. B. (2023). Microbial Pigments: Major Groups and Industrial Applications. *Microorganisms*, 11(12). <https://doi.org/10.3390/microorganisms11122920>
- Caldeira, N. G. S., de Souza, M. L. S., de Miranda, R. V. da S. L., da Costa, L. V., Forsythe, S. J., Zahner, V., & Brandão, M. L. L. (2024). Characterization by MALDI-TOF MS and 16S rRNA Gene Sequencing of Aerobic Endospore-Forming Bacteria Isolated from Pharmaceutical Facility in Rio de Janeiro, Brazil. *Microorganisms*, 12(4). <https://doi.org/10.3390/microorganisms12040724>
- Celedón, R. S., & Díaz, L. B. (2021). Natural pigments of bacterial origin and their possible biomedical applications. *Microorganisms*, 9(4), 1–12. <https://doi.org/10.3390/microorganisms9040739>
- Chandran, H., Meena, M., & Swapnil, P. (2021). Plant growth-promoting rhizobacteria as a green alternative for sustainable agriculture. *Sustainability (Switzerland)*, 13(19), 1–30. <https://doi.org/10.3390/su131910986>
- Chaturvedi, S. B., Mainali, S., & Chaudhary, R. (2024). Antibacterial activity of pigment extracted from bacteria isolated from soil samples. *BMC Research Notes*, 17(1), 4–9. <https://doi.org/10.1186/s13104-024-06834-4>
- CHE, J., ZHAO, X. Q., & SHEN, R. F. (2023). Molecular mechanisms of plant adaptation to acid soils: A review. *Pedosphere*, 33(1), 14–22. <https://doi.org/10.1016/j.pedsph.2022.10.001>
- Cirillo, V., Romano, I., Woo, S. L., Di Stasio, E., Lombardi, N., Comite, E., Pepe, O., Venterino, V., & Maggio, A. (2023). Inoculation with a microbial consortium increases soil microbial diversity and improves agronomic traits of tomato under water and nitrogen deficiency. *Frontiers in Plant Science*, 14(December), 1–14. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1304627>
- de-Bashan, L., & Nannipieri, P. (2024). Recommendations for plant growth-promoting bacteria inoculation studies. *Biology and Fertility of Soils*, 60(3), 259–261. <https://doi.org/10.1007/s00374-024-01798-w>
- de Andrade, L. A., Santos, C. H. B., Frezarín, E. T., Sales, L. R., & Rigobelo, E. C. (2023). Plant Growth-Promoting Rhizobacteria for Sustainable Agricultural Production. *Microorganisms*, 11(4).

- <https://doi.org/10.3390/microorganisms11041088>
- Díaz-Rodríguez, A. M., Parra Cota, F. I., Cira Chávez, L. A., García Ortega, L. F., Estrada Alvarado, M. I., Santoyo, G., & de los Santos-Villalobos, S. (2025). Microbial Inoculants in Sustainable Agriculture: Advancements, Challenges, and Future Directions. *Plants*, 14(2), 1–19.
<https://doi.org/10.3390/plants14020191>
- Dimkić, I., Janakiev, T., Petrović, M., Degrassi, G., & Fira, D. (2022). Plant-associated *Bacillus* and *Pseudomonas* antimicrobial activities in plant disease suppression via biological control mechanisms - A review. *Physiological and Molecular Plant Pathology*, 117(October 2021).
<https://doi.org/10.1016/j.pmpp.2021.101754>
- dos Reis, G. A., Martínez-Burgos, W. J., Pozzan, R., Pastrana Puche, Y., Ocán-Torres, D., de Queiroz Fonseca Mota, P., Rodrigues, C., Lima Serra, J., Scapini, T., Karp, S. G., & Soccol, C. R. (2024). Comprehensive Review of Microbial Inoculants: Agricultural Applications, Technology Trends in Patents, and Regulatory Frameworks. *Sustainability (Switzerland)*, 16(19).
<https://doi.org/10.3390/su16198720>
- Du, L., Zhang, Z., Chen, Y., Wang, Y., Zhou, C., Yang, H., & Zhang, W. (2024). Heterogeneous impact of soil acidification on crop yield reduction and its regulatory variables: A global meta-analysis. *Field Crops Research*, 319(November), 109643.
<https://doi.org/10.1016/j.fcr.2024.109643>
- Ferrarezi, J. A., Defant, H., de Souza, L. F., Azevedo, J. L., Hungria, M., & Quecine, M. C. (2023). Meta-omics integration approach reveals the effect of soil native microbiome diversity in the performance of inoculant *Azospirillum brasilense*. *Frontiers in Plant Science*, 14(June), 1–15.
<https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1172839>
- Francioli, D., Kampouris, I. D., Kuhl-Nagel, T., Babin, D., Sommermann, L., Behr, J. H., Chowdhury, S. P., Zrenner, R., Moradtalab, N., Schloter, M., Geistlinger, J., Ludewig, U., Neumann, G., Smalla, K., & Grosch, R. (2025). Microbial inoculants modulate the rhizosphere microbiome, alleviate plant stress responses, and enhance maize growth at field scale. *Genome Biology*, 26(1).
<https://doi.org/10.1186/s13059-025-03621-7>
- Fu, X., Fu, Q., Zhu, X., Yang, X., Chen, H., & Li, S. (2023). Microdiversity sustains the distribution of rhizosphere-associated bacterial species from the root surface to the bulk soil region in maize crop fields. *Frontiers in Plant Science*, 14(October), 1–14.
<https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1266218>
- Fujiki, Y., & Bassik, M. C. (2021). A New Paradigm in Catalase Research. *Trends in Cell Biology*, 31(3), 148–151.
<https://doi.org/10.1016/j.tcb.2020.12.006>
- Garg, D., Sridhar, K., Stephen Inbaraj, B., Chawla, P., Tripathi, M., & Sharma, M. (2023). Nano-Biofertilizer Formulations for Agriculture: A Systematic Review on Recent Advances and Prospective Applications. *Bioengineering*, 10(9), 1–33.
<https://doi.org/10.3390/bioengineering10091010>
- Giraldo, J. D., Garrido-Miranda, K. A., & Schoebitz, M. (2023). Chitin and its derivatives: Functional biopolymers for developing bioproducts for sustainable agriculture—A reality? *Carbohydrate Polymers*, 299(October 2022), 120196.
<https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2022.120196>
- Hakim, S., Naqqash, T., Nawaz, M. S., Laraib, I., Siddique, M. J., Zia, R., Mirza, M. S., & Imran, A. (2021). Rhizosphere Engineering With Plant Growth-Promoting Microorganisms for Agriculture and Ecological Sustainability. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 5(February), 1–23.
<https://doi.org/10.3389/fsufs.2021.617157>
- Ji, L., Xu, X., Zhang, F., Si, H., Li, L., & Mao, G. (2023). The Preliminary Research on Shifts in Maize Rhizosphere Soil Microbial Communities and Symbiotic Networks under Different Fertilizer Sources. *Agronomy*, 13(8).
<https://doi.org/10.3390/agronomy13082111>
- Jiang, M., Liu, Y., Xue, H., Wang, Y., Wang, C., Yang, F., & Li, X. (2023). Expression

- and biochemical characterization of a *Bacillus subtilis* catalase in *Pichia pastoris* X-33. *Protein Expression and Purification*, 208–209(December 2022), 106277.
<https://doi.org/10.1016/j.pep.2023.106277>
- Kapishon, V., Lorrain, M. J., Leung, A. C. W., Gélinas, A. M., Wu, M., Sarrazin, M., Hrapovic, S., Pagé, A., Monteil-Rivera, F., & Hemraz, U. D. (2023). Encapsulation of Plant Growth-Promoting Bacteria in Poly(itaconic acid) Microspheres by Spray Drying. *ACS Agricultural Science and Technology*, 3(12), 1185–1193.
<https://doi.org/10.1021/acsagscitech.3c00356>
- Kashyap, A. S., Manzar, N., Meshram, S., & Sharma, P. K. (2023). Screening microbial inoculants and their interventions for cross-kingdom management of wilt disease of solanaceous crops- a step toward sustainable agriculture. *Frontiers in Microbiology*, 14(June), 1–15.
<https://doi.org/10.3389/fmicb.2023.1174532>
- Li, K., Xu, R., & Cai, Z. (2024). Aluminum mobilization characteristics in four typical soils from different climate zones during their acidification. *Plant and Soil*, 504, 29–46.
<https://doi.org/10.1007/s1104-024-06476-2>
- Linzner, N., Loi, V. Van, & Antelmann, H. (2022). The Catalase KatA Contributes to Microaerophilic H₂O₂ Priming to Acquire an Improved Oxidative Stress Resistance in *Staphylococcus aureus*. *Antioxidants*, 11(9).
<https://doi.org/10.3390/antiox11091793>
- Liu, Q., Pang, Z., Sun, H., Zeng, X., Kong, X., Li, S., & Shen, Y. (2024). Unveiling the maize-benefit: Synergistic impacts of organic-inorganic fertilizer cooperation on rhizosphere microorganisms and metabolites. *Applied Soil Ecology*, 193(April 2023), 105171.
<https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2023.105171>
- Luo, D., Shi, J., Li, M., Chen, J., Wang, T., Zhang, Q., Yang, L., Zhu, N., & Wang, Y. (2024). Consortium of Phosphorus-Solubilizing Bacteria Promotes Maize Growth and Changes the Microbial Community Composition of Rhizosphere Soil. *Agronomy*, 14(7).
<https://doi.org/10.3390/agronomy14071535>
- Ma, H., Li, P., Xiao, N., & Xia, T. (2022). Poly- γ -glutamic acid promoted maize root development by affecting auxin signaling pathway and the abundance and diversity of rhizosphere microbial community. *BMC Plant Biology*, 22(1), 1–13.
<https://doi.org/10.1186/s12870-022-03908-y>
- Morales-Cedeño, L. R., Orozco-Mosqueda, M. del C., Loeza-Lara, P. D., Parra-Cota, F. I., de los Santos-Villalobos, S., & Santoyo, G. (2021). Plant growth-promoting bacterial endophytes as biocontrol agents of pre- and post-harvest diseases: Fundamentals, methods of application and future perspectives. *Microbiological Research*, 242(September 2020).
<https://doi.org/10.1016/j.micres.2020.126612>
- Mukhtar, H., Hao, J., Xu, G., Bergmeyer, E., Ulutas, M., Yang, J., & Schachtman, D. P. (2025). Nitrogen input differentially shapes the rhizosphere microbiome diversity and composition across diverse maize lines. *Biology and Fertility of Soils*, 61(1), 1–12.
<https://doi.org/10.1007/s00374-024-01863-4>
- Muñoz-Torres, P., Cárdenas-Ninasivincha, S., & Aguilar, Y. (2024). Exploring the Agricultural Applications of Microbial Melanin. *Microorganisms*, 12(7).
<https://doi.org/10.3390/microorganisms12071352>
- Novello, G., Bona, E., Toumatia, O., Vuolo, F., Bouras, N., Titouah, H., Zitouni, A., Gorrasi, S., Massa, N., Cesaro, P., Todeschini, V., Lingua, G., & Gamalero, E. (2023). Rhizosphere Bacterial Isolation from Indigenous Plants in Arid and Semi-Arid Algerian Soils: Implications for Plant Growth Enhancement. *Processes*, 11(10), 1–17.
<https://doi.org/10.3390/pr11102907>
- Nunes Ramos, J., Veloso da Costa, L., Viana Vieira, V., & Lima Brandão, M. L. (2025). Challenges in the Identification of Environmental Bacterial Isolates from a

- Pharmaceutical Industry Facility by 16S rRNA Gene Sequences. *Dna*, 5(3), 33. <https://doi.org/10.3390/dna5030033>
- Prisa, D., Fresco, R., & Spagnuolo, D. (2023). Microbial Biofertilisers in Plant Production and Resistance: A Review. *Agriculture (Switzerland)*, 13(9), 1–18. <https://doi.org/10.3390/agriculture13091666>
- Rinijapsari, E. (2021). Penggunaan KOH String Test Sebagai Alternatif Identifikasi Awal Prodi D3 Analisis Kesehatan Politeknik Katolik Mangunwijaya Penggunaan KOH String Test Sebagai Alternatif Identifikasi Awal Bakteri Gram Negatif. *Jurnal Ilmu Kedokteran Dan Kesehatan Indonesia*, 1(1), 100–110.
- Shahwar, D., Mushtaq, Z., Mushtaq, H., Alqarawi, A. A., Park, Y., Alshahrani, T. S., & Faizan, S. (2023). Role of microbial inoculants as bio fertilizers for improving crop productivity: A review. *Heliyon*, 9(6), e16134. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e16134>
- Sharma, A., Mishra, A., & Chhabra, M. (2024). Rapid measurement of bacterial contamination in water: A catalase responsive-electrochemical sensor. *Heliyon*, 10(5), e26724. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e26724>
- Tusar, H. M., Uddin, M. K., Mia, S., Kasim, S., Wahid, S. B. A., Makino, T., & Solaiman, Z. (2024). Oxidized alkaline biochar and phosphate solubilizing bacteria mixture enhances direct seeded maize yield in an acid soil. *Sains Tanah*, 21(2), 219–237. <https://doi.org/10.20961/stjssa.v21i2.93130>
- Upadhyay, S. K., Srivastava, A. K., Rajput, V. D., Chauhan, P. K., Bhojiya, A. A., Jain, D., Chaubey, G., Dwivedi, P., Sharma, B., & Minkina, T. (2022). Root Exudates: Mechanistic Insight of Plant Growth Promoting Rhizobacteria for Sustainable Crop Production. *Frontiers in Microbiology*, 13(July). <https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.916488>
- Wang, M., Sun, H., & Xu, Z. (2024). Characterization of Rhizosphere Microbial Diversity and Selection of Plant-Growth-Promoting Bacteria at the Flowering and Fruiting Stages of Rapeseed. *Plants*, 13(2). <https://doi.org/10.3390/plants13020329>
- Zhang, L., Feng, Y., Zhao, Z., Cui, Z., Baoyin, B., Wang, H., Li, Q., & Cui, J. (2024). Maize/soybean intercropping with nitrogen supply levels increases maize yield and nitrogen uptake by influencing the rhizosphere bacterial diversity of soil. *Frontiers in Plant Science*, 15(September), 1–16. <https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1437631>
- Zhydetski, A., Głowacka-Grzyb, Z., Chlebicka, K., & Władyka, B. (2025). Detection and identification of pathogens using agents targeting the bacterial cell wall. *Folia Microbiologica*. <https://doi.org/10.1007/s12223-025-01379-w>