

Peran *Plant Growth-Promoting Rhizobacteria* (PGPR) sebagai Biofertilizer  
dalam Meningkatkan Pertumbuhan dan Produktivitas Tanaman Tomat:  
Tinjauan Literatur

*The Role of Plant Growth Promoting Rhizobacteria (PGPR) as Biofertilizer  
in Increasing Tomato Plant Growth and Productivity: Literature Review*

Annisa Fitri Humaira<sup>1)\*</sup>, Linda Advinda<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>Jurusan Biologi, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Negeri Padang  
Jl. Prof. Dr. Hamka, Air Tawar Barat, Kec. Padang Utara, Kota Padang  
Email: [annisafitrihumaira.13@gmail.com](mailto:annisafitrihumaira.13@gmail.com)

### ABSTRAK

Penggunaan pupuk kimia yang berlebihan dalam budidaya hortikultura, termasuk tomat, telah menimbulkan dampak negatif terhadap lingkungan dan kesehatan tanah. Salah satu alternatif ramah lingkungan yang potensial adalah pemanfaatan *Plant Growth-Promoting Rhizobacteria* (PGPR) sebagai biofertilizer. PGPR memiliki kemampuan meningkatkan pertumbuhan tanaman melalui mekanisme seperti produksi fitohormon, pelarutan fosfat, fiksasi nitrogen, serta peningkatan ketahanan terhadap stres abiotik dan patogen. Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji efektivitas PGPR dalam mendukung pertumbuhan dan produktivitas tanaman tomat sebagai pengganti atau pelengkap pupuk kimia. Metode yang digunakan adalah tinjauan literatur sistematis terhadap 10 artikel ilmiah yang diterbitkan dalam lima tahun terakhir (2020–2025), yang dipilih berdasarkan kriteria inklusi tertentu dan relevansi dengan topik. Hasil tinjauan menunjukkan bahwa strain PGPR dari genus *Bacillus*, *Pseudomonas*, dan actinomycetes secara konsisten meningkatkan pertumbuhan vegetatif, hasil buah, dan kualitas gizi tomat seperti likopen dan vitamin C. Selain itu, PGPR juga terbukti efektif dalam mengurangi dampak stres lingkungan seperti salinitas dan kontaminasi logam berat. Berdasarkan temuan tersebut, PGPR berpotensi besar untuk diterapkan sebagai bagian dari strategi pertanian berkelanjutan dan pengurangan ketergantungan pada input kimia. Penelitian lanjutan dalam skala lapangan diperlukan untuk menguji konsistensi hasil serta adaptabilitas strain PGPR lokal dalam berbagai kondisi agroekosistem.

**Keywords:** PGPR, tomat, biofertilizer, pupuk kimia, hasil panen.

### PENDAHULUAN

Di daerah rizosfer, terdapat kelompok mikroorganisme yang dikenal sebagai *Plant Growth-Promoting Rhizobacteria* (PGPR), yaitu bakteri yang mampu meningkatkan pertumbuhan tanaman melalui sekresi berbagai metabolit dan enzim (Rai *et al.*, 2023).

PGPR berperan penting dalam ekosistem tanah karena memiliki banyak mekanisme yang mendukung pertumbuhan tanaman, seperti produksi fitohormon (auksin, sitokinin, gibberelin, dan asam absisat), pelarutan unsur hara seperti fosfat dan kalium, sekresi siderofor untuk penyerapan besi, serta produksi enzim 1-aminocyclopropane-1-carboxylate (ACC) deaminase yang menurunkan stres etilen pada tanaman (Bhattacharyya & Jha, 2012; Souza & Passaglia, 2015; Katsenios *et al.*, 2022; Figueiredo *et al.*, 2011).

*Pseudomonad fluoresen* merupakan kelompok PGPR yang terdapat di rizosfir, dan dapat memacu pertumbuhan tanaman karena kemampuannya menghasilkan hormon tumbuh *Indole Acetic Acid* (IAA). Disamping itu kelompok bakteri dapat menghasilkan senyawa antimikroba seperti siderofor dan asam sianida sehingga berpotensi sebagai biokontrol (Advinda, 2020).

Selain itu, PGPR juga menunjukkan aktivitas antijamur, memproduksi senyawa organik volatil (VOC), dan mampu meningkatkan simbiosis antara tanaman dan mikroba. Semua mekanisme tersebut menjadikan PGPR sebagai agen hayati yang ramah lingkungan dan sangat potensial sebagai pengganti pupuk kimia dan pestisida sintetis dalam sistem pertanian berkelanjutan (Souza & Passaglia, 2015; Lopes, 2021). Mikroorganisme pemacu pertumbuhan tanaman ini tidak hanya berdampak langsung pada pertumbuhan, tetapi juga berpengaruh secara tidak langsung terhadap morfologi tanaman melalui peningkatan serapan nutrisi, kualitas jaringan tanaman, dan daya tahan terhadap stres lingkungan.

Tanaman tomat merupakan salah satu komoditas hortikultura bernilai ekonomi tinggi dan memiliki prospek yang menjanjikan untuk dibudidayakan secara luas (Widnyana, 2019). Setelah kentang, tomat menjadi sayuran terpenting kedua dalam hal kontribusi terhadap konsumsi global (Chandrasekaran *et al.*, 2019). Selain menjadi sumber vitamin A dan C yang signifikan, tomat juga mengandung berbagai senyawa bioaktif yang berperan sebagai antioksidan kuat, seperti karotenoid, asam askorbat, tokoferol, glikosida, serta senyawa fenolik dan flavonoid (Klee & Giovannoni, 2011; Saini *et al.*, 2017). Dengan potensi gizi dan nilai ekonomi tersebut, peningkatan produktivitas dan kualitas tomat melalui pendekatan hayati seperti PGPR menjadi sangat penting.

Saat ini, banyak mikroba telah diketahui memiliki kapasitas untuk mendukung pertumbuhan tanaman dan telah dikomersialisasikan dalam bentuk biofertilizer. Jenis mikroba yang paling dikenal adalah PGPR, yang bekerja melalui dua jalur utama: secara langsung, seperti melalui fiksasi nitrogen, produksi fitohormon, dan pelarutan nutrisi; dan tidak langsung, melalui peningkatan ketahanan tanaman terhadap patogen serta pengurangan toksisitas lingkungan (Hashem *et al.*, 2019; Roupael & Colla, 2020). Salah satu peran kunci PGPR adalah pelarutan fosfat, terutama di lingkungan dengan sumber daya yang terbatas. Kemampuan ini dapat mendorong pembentukan biofertilizer yang meningkatkan ketersediaan fosfor dalam tanah (Bhattacharyya & Jha, 2012; De Pascale *et al.*, 2017).

Hasil Penelitian Anhar et al., (2011) menyatakan isolat pseudomonad fluoresen Cas3 terbaik dalam meningkatkan jumlah anakan dan tinggi tanaman padi. Advinda (2009) melaporkan isolat pseudomonad fluoresen Cas3, PfPj2, dan PfPj3 terbaik dalam mengendalikan penyakit Blood Disease Bacteria (BDB) tanaman pisang. Advinda et al, (2022) mengidentifikasi enam isolat *P. fluorescens* (PfPj1, PfPj2, PfKd7, PfCas, PfCas3, dan LAHp2) dari berbagai jenis tanaman yang seluruhnya mampu menghasilkan HCN, siderofor, dan melarutkan fosfat, serta menunjukkan karakteristik khas *Pseudomonas aeruginosa* (93–94% kemiripan). Selain itu, *P. fluorescens* juga terbukti dapat mengendalikan berbagai penyakit tanaman seperti layu bakteri pada tomat dan cabai yang disebabkan oleh *Ralstonia solanacearum*, layu fusarium pada gladiol, serta bercak daun pada buncis (Gusnadi et al., 2023). Kemampuannya dalam menginduksi ketahanan sistemik tanaman didukung oleh produksi senyawa seperti asam salisilat dan DAPG yang berfungsi sebagai sinyal untuk meningkatkan respons imun tanaman terhadap patogen (Advinda et al., 2020; Gusnadi et al., 2023).

Penggunaan pupuk kimia yang luas selama ini memang bertujuan untuk meningkatkan kesuburan tanah dan hasil pertanian. Namun demikian, penggunaan berlebihan pupuk kimia menyebabkan akumulasi residu seperti nitrat yang mencemari tanah dan air tanah, serta berdampak negatif terhadap kesehatan manusia dan lingkungan (Bisht & Chauhan, 2020; Savci, 2012). Oleh karena itu, pendekatan pertanian organik dan berkelanjutan semakin digalakkan. Salah satu solusi yang menjanjikan adalah dengan menambahkan PGPR ke dalam tanah karena mereka dapat menggantikan peran pupuk kimia secara bertahap, melalui peningkatan serapan nutrisi dan toleransi terhadap stres lingkungan (Savci, 2012; Kumar et al., 2022).

## METODE PENELITIAN

Penelitian ini merupakan sebuah studi tinjauan literatur sistematis yang bertujuan untuk mengkaji peran *Plant Growth-Promoting Rhizobacteria* (PGPR) dalam meningkatkan pertumbuhan dan produktivitas tanaman tomat, serta potensinya sebagai biofertilizer alternatif pengganti pupuk kimia. Kajian dilakukan dengan menelusuri dan mengevaluasi artikel-artikel ilmiah yang diterbitkan dalam lima tahun terakhir, yaitu dari tahun 2020 hingga 2025.

Sumber data yang digunakan berasal dari berbagai jurnal ilmiah internasional bereputasi seperti MDPI, ScienceDirect, SpringerLink, Hindawi, dan Google Scholar. Proses penelusuran artikel dilakukan menggunakan kata kunci seperti “*plant growth-promoting rhizobacteria*”, “*tomato*”, “*biofertilizer*”, “*yield*”, dan “*chemical fertilizer alternative*”.

Kriteria inklusi dalam pemilihan artikel meliputi: (1) penelitian eksperimental yang mengevaluasi efek PGPR pada tanaman tomat, baik di kondisi rumah kaca maupun di lapangan; (2) kajian yang melaporkan parameter pertumbuhan seperti tinggi tanaman,

jumlah daun, bobot buah, dan kandungan senyawa bioaktif seperti vitamin C atau likopen; dan (3) artikel yang menyebutkan jenis mikroorganisme PGPR yang digunakan, seperti *Bacillus* spp., *Pseudomonas* spp., *Streptomyces* spp., dan lainnya.

Setelah tahap seleksi, sebanyak 10 artikel dipilih untuk dianalisis secara mendalam. Setiap artikel ditelaah untuk mengekstraksi data penting seperti jenis mikroorganisme PGPR, cara aplikasi (inokulasi tanah, semai biji, semprot daun, dll.), lingkungan tumbuh (stres salinitas, kekeringan, patogen), serta hasil pengamatan terkait pertumbuhan tanaman dan kualitas buah. Data yang dikumpulkan kemudian disajikan dalam bentuk tabel komparatif dan dianalisis secara deskriptif untuk mengidentifikasi tren umum, efektivitas PGPR, dan mekanisme kerja yang dilaporkan, seperti produksi hormon tanaman, solubilisasi fosfat, dan aktivitas enzim antioksidan.

Penulisan dan penyusunan tinjauan ini mengacu pada pendekatan sistematis sebagaimana disarankan oleh Kitchenham (2004) dalam pendekatan *Systematic Literature Review* (SLR) yang biasa digunakan untuk merangkum hasil riset yang tersebar dan beragam dalam suatu bidang tertentu.

## **HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN**

Penggunaan *Plant Growth Promoting Rhizobacteria* (PGPR) seperti *Pseudomonas fluorescens* telah menjadi pendekatan yang menjanjikan dalam meningkatkan pertumbuhan tanaman dan mengurangi ketergantungan terhadap pupuk kimia maupun pestisida. PGPR merupakan kelompok mikroorganisme yang hidup di sekitar perakaran tanaman dan mampu meningkatkan pertumbuhan tanaman melalui mekanisme seperti fiksasi nitrogen, pelarutan fosfat, produksi hormon Indole Acetic Acid (IAA), serta menghasilkan senyawa antimikroba seperti siderofor dan asam sianida (HCN) (Asra et al., 2024). *Pseudomonas fluorescens* secara khusus diketahui memiliki kemampuan sebagai agen biokontrol sekaligus biofertilizer karena mampu memproduksi senyawa-senyawa tersebut dan menekan patogen penyebab penyakit tanaman (Muthiah et al., 2023).

Berdasarkan pentingnya peran PGPR tersebut, telah dilakukan telaah terhadap berbagai artikel ilmiah yang diterbitkan dalam lima tahun terakhir (2020–2025) dan secara khusus meneliti efek PGPR terhadap pertumbuhan dan produktivitas tanaman tomat. Kajian ini mencakup berbagai strain mikroorganisme yang berasal dari genus *Bacillus*, *Pseudomonas*, *Streptomyces*, hingga actinomycetes endofitik, serta bentuk aplikasinya yang beragam mulai dari bio-priming benih, inokulasi tanah, hingga aplikasi di bawah kondisi stres tertentu.

Ringkasan dari hasil-hasil utama penelitian tersebut disajikan dalam Tabel 1 berikut:

Tabel 1. Literatur Review PGPR pada Tanaman Tomat (2020-2025)

No.	Judul	Penulis dan Tahun	Hasil
1.	The Application of Plant Growth-Promoting Rhizobacteria in <i>Solanum lycopersicum</i> Production: A Review	Adedayo <i>et al.</i> , (2022)	PGPR berperan sebagai biofertilizer dan agen biokontrol. Mereka memfasilitasi pertumbuhan melalui produksi fitohormon (IAA, GA, CK), solubilisasi fosfat, dan fiksasi nitrogen. PGPR juga meningkatkan ketahanan tanaman terhadap patogen melalui ISR dan menjaga keseimbangan mikrobiota tanah
2.	Plant Growth-Promoting Rhizobacteria Modulate Concentration of Bioactive Compounds in Tomato Fruits	de la <i>et al.</i> , (2021)	Inokulasi PGPR meningkatkan likopen dan aktivitas antioksidan pada kultivar Tres Cantos, namun tidak berdampak signifikan pada kultivar cherry. Efek PGPR terhadap senyawa bioaktif bersifat spesifik terhadap varietas.
3.	Endophytic Actinomycetes Promote Growth and Fruit Quality of Tomato ( <i>Solanum lycopersicum</i> ): an Approach for Sustainable Tomato Production	Khomampai <i>et al.</i> , (2024)	Inokulasi TGsR-03-04 meningkatkan tinggi tanaman, panjang buah, vitamin C (23.3 mg/100g), dan likopen (145.92 µg/g). Strain TGsL-02-05 memberikan hasil tertinggi (1.47 kg/tanaman). Actinomycetes menunjukkan potensi besar sebagai biofertilizer ramah lingkungan.
4.	Impact of Plant Growth-Promoting Rhizobacteria Inoculation on The Physiological Response and Productivity Traits of Field-Grown Tomatoes in Hungary	Nemeskéri <i>et al.</i> (2022)	Strain B2 dan B3 diuji pada tiga level irigasi. Pada kondisi kekeringan sedang, perlakuan B3 (mengandung <i>Pseudomonas</i> , <i>Rhodococcus</i> , <i>Variovorax</i> ) meningkatkan hasil buah matang sebesar 26% dan menurunkan buah mentah hingga 49%

			dibanding B2. PGPR menunjukkan efek positif terutama saat kekurangan air.
5.	Plant Growth Promoting Rhizobacteria for Biocontrol of Tomato Bacterial Wilt Caused by <i>Ralstonia solanacearum</i>	Mekonnen <i>et al.</i> , (2022)	Isolat <i>Bacillus</i> (BDUA1) dan <i>Pseudomonas</i> (BDUA2, BDUA3) menunjukkan aktivitas antagonis terhadap <i>R. solanacearum</i> , menurunkan insiden penyakit hingga 51.9%. Juga meningkatkan tinggi tanaman dan bobot kering akar-tunas hingga 4.16 g.
6.	Evaluation of the Growth Inducing Efficacy of various <i>Bacillus</i> Species on the salt-stressed tomato ( <i>Lycopersicon esculentum</i> Mill.)	Patani <i>et al.</i> , (2023)	Lima strain <i>Bacillus</i> (termasuk <i>B. pumilus</i> , <i>B. cereus</i> ) meningkatkan pertumbuhan tomat di bawah stres salinitas. Ditingkatkan kadar klorofil, prolin, dan aktivitas enzim antioksidan (SOD, CAT, APX, GR). Menurunkan kandungan Na <sup>+</sup> dan Cl <sup>-</sup> dalam jaringan tanaman.
7.	Tomato seed bio-priming with <i>Pseudomonas aeruginosa</i> strain PAR: A Study on Plant Growth Parameters under Sodium Fluoride Stress.	Singh <i>et al.</i> (2024)	PGPR strain PAR meningkatkan tinggi tunas, panjang akar, dan kandungan klorofil di bawah stres fluoride. Juga menurunkan MDA (penanda stres oksidatif) dan meningkatkan aktivitas enzim antioksidan serta efisiensi serapan Mg, K, dan P.
8.	Effects of Plant Growth Promoting Rhizobacteria (PGPR) and Cyanobacteria on Botanical Characteristics of Tomato ( <i>Solanum Lycopersicum</i> L.) Plants	Gashash <i>et al.</i> , (2022)	Kombinasi <i>Bacillus subtilis</i> dan <i>B. amyloliquefaciens</i> meningkatkan berat buah (33%), jumlah buah (76%), dan kadar asam askorbat (75%). Juga memperbaiki struktur anatomi daun dan meningkatkan kandungan N, P, K dalam buah.
9.	Assessment of PGPR Effects of Wheat Rhizosphere	Kaur <i>et al.</i> , (2024)	Isolat MKT5 dari rhizosfer gandum menunjukkan aktivitas PGPR terbaik: solubilisasi fosfat

	Actinomycetes on Tomato Seedlings.		(24 mm), produksi siderofor (10 mm), dan meningkatkan pertumbuhan bibit tomat secara signifikan dalam uji pot.
10.	Performance of Plant Growth Promoting Rhizoacteria (PGPR) Isolated from Sandy Soil on Growth of Tomato ( <i>Solanum lycopersicum</i> L.)	Rehan <i>et al.</i> , (2023)	Strain <i>P. megaterium</i> dan <i>R. aquimaris</i> meningkatkan panjang akar, luas daun, dan serapan fosfor. PGPR meningkatkan efisiensi penggunaan pupuk P dan dapat menggantikan pupuk kimia pada tanah pasir yang miskin nutrisi.

Hampir seluruh artikel yang ditinjau menunjukkan bahwa aplikasi PGPR memberikan dampak positif terhadap parameter pertumbuhan vegetatif tanaman tomat. Penggunaan strain dari genus *Bacillus*, *Pseudomonas*, dan actinomycetes terbukti mampu meningkatkan tinggi tanaman, jumlah daun, luas daun, panjang akar, serta bobot kering akar dan tunas. Rehan *et al.* (2023) melaporkan bahwa strain *Priestia megaterium* dan *Pseudomonas plecoglossicida* yang diisolasi dari tanah berpasir secara signifikan meningkatkan pertumbuhan vegetatif dan penyerapan fosfor pada tomat. Demikian pula, isolat MKT5 dari actinomycetes yang berasal dari rhizosfer gandum menunjukkan peningkatan tinggi tanaman dan panjang akar pada uji pot (Kaur *et al.*, 2024). Peningkatan ini sebagian besar didorong oleh aktivitas PGPR dalam menghasilkan hormon tumbuh (IAA), pelarutan fosfat, serta peningkatan ketersediaan unsur hara.

Selain memacu pertumbuhan vegetatif, beberapa penelitian juga melaporkan peningkatan hasil dan kualitas buah tomat sebagai akibat dari inokulasi PGPR. Penggunaan kombinasi strain *Bacillus subtilis* dan *B. amyloliquefaciens* secara signifikan meningkatkan jumlah buah, berat buah per tanaman, serta parameter kualitas seperti kandungan vitamin C, asam askorbat, dan total padatan terlarut (Gashash *et al.*, 2022). Studi oleh Khomampai *et al.* (2024) juga menunjukkan bahwa strain endofitik TGsL-02-05 mampu menghasilkan hasil hingga 1,47 kg per tanaman dan meningkatkan kandungan likopen secara signifikan. Peningkatan kualitas buah berkorelasi kuat dengan peningkatan penyerapan nutrisi (N, P, dan K) serta metabolisme sekunder yang dimediasi oleh PGPR.

PGPR juga berperan dalam meningkatkan ketahanan tanaman terhadap berbagai jenis stres abiotik seperti salinitas dan kontaminan tanah. Patani *et al.* (2023) menunjukkan bahwa beberapa strain *Bacillus halotoleran* mampu mengurangi dampak negatif stres garam pada tomat dengan meningkatkan kandungan klorofil, akumulasi prolin, dan aktivitas enzim antioksidan seperti SOD, CAT, dan APX. Sementara itu, *Pseudomonas aeruginosa* strain PAR yang diuji oleh Singh *et al.* (2024) memperlihatkan kemampuan dalam mengurangi akumulasi sodium dan fluoride pada tomat yang tumbuh di tanah

tercemar fluoride, serta meningkatkan efisiensi fotosintesis dan pertumbuhan akar-tunas. Hal ini menunjukkan bahwa PGPR tidak hanya berfungsi sebagai biofertilizer, tetapi juga sebagai agen penetral stres lingkungan.

Beberapa studi yang ditinjau juga menyoroti kemampuan PGPR sebagai agen biokontrol terhadap patogen penting tanaman tomat. Mekonnen *et al.* (2022) menunjukkan bahwa isolat *Bacillus* dan *Pseudomonas* dari rizosfer tomat mampu menekan kejadian penyakit layu bakteri (*Ralstonia solanacearum*) hingga 50% dan pada saat yang sama meningkatkan bobot kering akar dan tunas. Mekanisme yang dilaporkan meliputi produksi enzim antagonistik (seperti protease, lipase), siderofor, serta senyawa penghambat patogen seperti HCN. Kemampuan ini penting terutama dalam sistem pertanian yang menghindari penggunaan fungisida atau bakterisida sintetis.

Beberapa artikel menekankan bahwa respons tanaman terhadap PGPR sangat dipengaruhi oleh kondisi lingkungan dan kultivar tomat yang digunakan. De la Osa *et al.* (2021) mencatat bahwa peningkatan likopen akibat aplikasi PGPR hanya signifikan pada kultivar Tres Cantos, namun tidak pada varietas cherry. Sementara itu, Nemeskéri *et al.* (2022) menemukan bahwa efisiensi PGPR dalam meningkatkan hasil buah lebih tinggi pada kondisi kekeringan dibandingkan musim dengan curah hujan tinggi. Temuan ini menegaskan bahwa keberhasilan aplikasi PGPR sangat kontekstual dan perlu disesuaikan dengan spesifikasi varietas serta kondisi agroklimat.

Secara umum, hasil-hasil dalam literatur menunjukkan bahwa PGPR tidak hanya berperan sebagai biofertilizer, tetapi juga sebagai agen peningkat kualitas dan ketahanan tanaman terhadap stres. Efek yang ditimbulkan sangat tergantung pada spesies mikroba, dosis dan metode aplikasi, jenis kultivar tomat, serta kondisi lingkungan. Oleh karena itu, dalam pengembangan lebih lanjut, pemilihan strain PGPR lokal yang adaptif dan uji lapang pada skala pertanian riil sangat dibutuhkan untuk mendukung penerapannya dalam sistem pertanian berkelanjutan.

## **PENUTUP**

Berdasarkan hasil tinjauan terhadap sepuluh artikel ilmiah yang diterbitkan dalam lima tahun terakhir, dapat disimpulkan bahwa *Plant Growth-Promoting Rhizobacteria* (PGPR) memiliki potensi besar dalam meningkatkan pertumbuhan dan produktivitas tanaman tomat. Meskipun temuan dari berbagai studi menunjukkan hasil yang menjanjikan, respons tanaman terhadap aplikasi PGPR sangat dipengaruhi oleh faktor lingkungan, jenis kultivar tomat, dan cara aplikasi. Oleh karena itu, diperlukan penelitian lebih lanjut di lapangan untuk mengidentifikasi strain PGPR lokal yang paling efektif dalam kondisi agroekosistem spesifik. Selain itu, integrasi PGPR dalam sistem pertanian organik dan berkelanjutan perlu didorong melalui pendekatan multipihak yang melibatkan petani, peneliti, dan penyuluh pertanian. Sebagai saran, penggunaan PGPR dapat mulai diterapkan secara bertahap sebagai biofertilizer pengurang ketergantungan terhadap

pupuk kimia, khususnya pada sistem pertanian hortikultura. Penelitian lanjutan juga disarankan untuk mengevaluasi kombinasi PGPR dengan mikroorganisme lain seperti mikoriza, serta efektivitas jangka panjangnya dalam meningkatkan kualitas tanah dan ketahanan tanaman terhadap perubahan iklim.

## REFERENSI

- Abdelaal, K., AlKahtani, M., Attia, K., Hafez, Y., Király, L., & Künstler, A. (2021). The role of plant growth-promoting bacteria in alleviating the adverse effects of drought on plants. *Biology*, *10*(6), 520.
- Adedayo, A. A., Babalola, O. O., Prigent-Combaret, C., Cruz, C., Stefan, M., Kutu, F., & Glick, B. R. (2022). The application of plant growth-promoting rhizobacteria in *Solanum lycopersicum* production in the agricultural system: a review. *PeerJ*, *10*, e13405.
- Advinda, L. (2009). Tanggap Fisiologis Tanaman Pisang yang Diintroduksi dengan Formula *Pseudomonad* Fluoresen Terhadap Blood Disease Bacteria (BDB). *Disertasi. Padang: Universitas Andalas*.
- Advinda, L. 2020. *Pseudomonad* Fluoresen Agens Biokontrol Blood Disease Bacteria (BDB) Tanaman Pisang. Monograf. Yogyakarta: Deepublish.
- Advinda, L., Putri, D. H., Anhar, A., & Irdawati, I. (2022). Identification and Characterization of Fluorescent *Pseudomonas* Producing Active Compounds Controlling Plant Pathogens. *Yuzuncu Yil University Journal of Agricultural Sciences*, *32*(4), 795-804.
- Anhar, A., Doni, F. dan Advinda, L. 2011. Respon Pertumbuhan Tanaman Padi (*Oryza sativa* L.) Terhadap Introduksi *Pseudomonad* Fluoresen. *Eksakta* Vol. 1 Tahun XII Februari 2011
- Asra, R. H., Advinda, L., & Anhar, A. (2024). The Role of plant growth promoting rhizobacteria (PGPR) in sustainable agriculture. *Jurnal Serambi Biologi*, *9*(1), 1-7.
- Backer, R., Rokem, J. S., Ilangumaran, G., Lamont, J., Praslickova, D., Ricci, E., ... & Smith, D. L. (2018). Plant growth-promoting rhizobacteria: context, mechanisms of action, and roadmap to commercialization of biostimulants for sustainable agriculture. *Frontiers in plant science*, *9*, 1473.
- Bhattacharyya, P. N., & Jha, D. K. (2012). Plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR): emergence in agriculture. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, *28*, 1327-1350.
- Bisht, N., & Chauhan, P. S. (2020). Excessive and disproportionate use of chemicals cause soil contamination and nutritional stress. In *Soil contamination*. IntechOpen.

- Chandrasekaran, M., Chun, S. C., Oh, J. W., Paramasivan, M., Saini, R. K., & Sahayarayan, J. J. (2019). *Bacillus subtilis* CBR05 for tomato (*Solanum lycopersicum*) fruits in South Korea as a novel plant probiotic bacterium (PPB): implications from total phenolics, flavonoids, and carotenoids content for fruit quality. *Agronomy*, 9(12), 838.
- de la Osa, C., Rodríguez-Carvajal, M. Á., Gandullo, J., Aranda, C., Megías, M., Ollero, F. J., ... & Monreal, J. A. (2021). Plant growth-promoting rhizobacteria modulate the concentration of bioactive compounds in tomato fruits. *Separations*, 8(11), 223.
- De Pascale, S., Roupheal, Y., & Colla, G. (2017). Plant biostimulants: Innovative tool for enhancing plant nutrition in organic farming. *Eur. J. Hortic. Sci*, 82(6), 277-285.
- Figueiredo, M. D. V. B., Seldin, L., de Araujo, F. F., & Mariano, R. D. L. R. (2011). Plant growth promoting rhizobacteria: fundamentals and applications. *Plant growth and health promoting bacteria*, 21-43.
- Gashash, E. A., Osman, N. A., Alsahli, A. A., Hewait, H. M., Ashmawi, A. E., Alshallash, K. S., ... & Ibrahim, M. F. (2022). Effects of plant-growth-promoting rhizobacteria (PGPR) and cyanobacteria on botanical characteristics of tomato (*Solanum lycopersicon* L.) plants. *Plants*, 11(20), 2732.
- Glick, B. R. (2012). Plant growth-promoting bacteria: mechanisms and applications. *Scientifica*, 2012(1), 963401.
- Gusnadi, B., Advinda, L., Anhar, A., Putri, I. L. E., & Chatri, M. (2023). *Pseudomonas fluorescens* as a Biocontrol Agent for Controlling Various Plant Diseases. *Jurnal Serambi Biologi*, 8(2), 123-128.
- Hashem, A., Tabassum, B., & Abd Allah, E. F. (2019). *Bacillus subtilis*: a plant-growth promoting rhizobacterium that also impacts biotic stress. *Saudi J Biol Sci* 26 (6): 1291–1297.
- Katsenios, N., Andreou, V., Sparangis, P., Djordjevic, N., Giannoglou, M., Chanioti, S., ... & Efthimiadou, A. (2022). Assessment of plant growth promoting bacteria strains on growth, yield and quality of sweet corn. *Scientific Reports*, 12(1), 11598.
- Kaur, P., Sharma, P., Rawat, G., Gupta, P., & Devi, B. (2024). Assessment of PGPR effects of wheat rhizosphere actinomycetes on tomato seedlings. *International Journal of Research in Agronomy*, 7(7), 815-824
- Khomampai, J., Jeeatid, N., Kaeomuangmoon, T., Pathom-Aree, W., Rangseekaew, P., Yosen, T., ... & Chromkaew, Y. (2024). Endophytic actinomycetes promote growth and fruits quality of tomato (*Solanum lycopersicum*): an approach for sustainable tomato production. *PeerJ*, 12, e17725.
- Kitchenham, B. (2004). Procedures for performing systematic reviews. *Keele, UK, Keele University*, 33(2004), 1-26.

- Klee, H. J., & Giovannoni, J. J. (2011). Genetics and control of tomato fruit ripening and quality attributes. *Annual review of genetics*, 45(1), 41-59.
- Kumar, S., Sindhu, S. S., & Kumar, R. (2022). Biofertilizers: An ecofriendly technology for nutrient recycling and environmental sustainability. *Current Research in Microbial Sciences*, 3, 100094.
- Lopes, M. J. D. S., Dias-Filho, M. B., & Gurgel, E. S. C. (2021). Successful plant growth-promoting microbes: inoculation methods and abiotic factors. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 5, 606454.
- Mekonnen, H., Kibret, M., & Assefa, F. (2022). Plant growth promoting rhizobacteria for biocontrol of tomato bacterial wilt caused by *Ralstonia solanacearum*. *International Journal of Agronomy*, 2022(1), 1489637.
- Muthiah, A., Advinda, L., Anhar, A., Putri, I. L. E., & Farma, S. A. (2023). Pseudomonas fluorescens as Plant Growth Promoting Rhizobacteria (PGPR). *Jurnal Serambi Biologi*, 8(1), 67-73.
- Nemeskéri, E., Horváth, K. Z., Andryei, B., Ilahy, R., Takács, S., Neményi, A., ... & Helyes, L. (2022). Impact of plant growth-promoting rhizobacteria inoculation on the physiological response and productivity traits of field-grown tomatoes in Hungary. *Horticulturae*, 8(7), 641.
- Omar, A. F., Abdelmageed, A. H., Al-Turki, A., Abdelhameid, N. M., Sayyed, R. Z., & Rehan, M. (2022). Exploring the plant growth-promotion of four Streptomyces strains from rhizosphere soil to enhance cucumber growth and yield. *Plants*, 11(23), 3316.
- Patani, A., Prajapati, D., Ali, D., Kalasariya, H., Yadav, V. K., Tank, J., ... & Patel, A. (2023). Evaluation of the growth-inducing efficacy of various *Bacillus* species on the salt-stressed tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.). *Frontiers in Plant Science*, 14, 1168155.
- Rai, S., Omar, A. F., Rehan, M., Al-Turki, A., Sagar, A., Ilyas, N., ... & Hasanuzzaman, M. (2023). Crop microbiome: their role and advances in molecular and omic techniques for the sustenance of agriculture. *Planta*, 257(2), 27.
- Rehan, M., Al-Turki, A., Abdelmageed, A. H., Abdelhameid, N. M., & Omar, A. F. (2023). Performance of plant-growth-promoting rhizobacteria (PGPR) isolated from sandy soil on growth of tomato (*Solanum lycopersicum* L.). *Plants*, 12(8), 1588.
- Rouphael, Y., & Colla, G. (2020). Toward a sustainable agriculture through plant biostimulants: From experimental data to practical applications. *Agronomy*, 10(10), 1461.
- Saini, R. K., Zamany, A. J., & Keum, Y. S. (2017). Ripening improves the content of carotenoid,  $\alpha$ -tocopherol, and polyunsaturated fatty acids in tomato (*Solanum lycopersicum* L.) fruits. *3 Biotech*, 7, 1-7.

- Savci, S. (2012). Investigation of effect of chemical fertilizers on environment. *Apcbee Procedia*, *1*, 287-292.
- Singh, A., Patani, A., Patel, M., Vyas, S., Verma, R. K., Amari, A., ... & Patel, A. (2024). Tomato seed bio-priming with *Pseudomonas aeruginosa* strain PAR: a study on plant growth parameters under sodium fluoride stress. *Frontiers in Microbiology*, *14*, 1330071.
- Souza, R. D., Ambrosini, A., & Passaglia, L. M. (2015). Plant growth-promoting bacteria as inoculants in agricultural soils. *Genetics and molecular biology*, *38*, 401-419.
- Widnyana, I. K. (2019). PGPR (Plant Growth Promoting Rhizobacteria) Benefits in Spurring Germination, Growth and Increase the Yield. *Recent advances in tomato breeding and production*, *17*.