

Aplikasi Bioteknologi PGPR untuk Biokontrol Hama dan Penyakit Tanaman Secara Ramah Lingkungan

Application of PGPR Biotechnology for Environmentally Friendly Biocontrol of Plant Pests and Diseases

Rismawati Sudarsih¹✉ | Muhammad Sarjan¹ | M. Taufik Fauzi¹ | Pending Dadih Permana¹

^{1✉} Program Studi Magister Pertanian Lahan Kering, Pascasarjana Universitas Mataram, Kota Mataram, Nusa Tenggara Barat 83115, Indonesia

Abstrak

Penggunaan pestisida kimia secara berlebihan dalam pengendalian hama dan penyakit tanaman telah menimbulkan berbagai dampak negatif terhadap lingkungan dan kesehatan manusia. Plant Growth Promoting Rhizobacteria (PGPR) merupakan kelompok bakteri rizosfer yang memiliki kemampuan memacu pertumbuhan tanaman sekaligus mengendalikan patogen tanaman melalui mekanisme bioteknologi. Penelitian ini bertujuan mengkaji aplikasi bioteknologi PGPR sebagai agen biokontrol hama dan penyakit tanaman secara ramah lingkungan melalui metode Systematic Literature Review (SLR). Data sekunder dikumpulkan dari 14 jurnal internasional dan nasional yang terindeks Scopus periode 2020-2025. Analisis dilakukan secara deskriptif kualitatif untuk mengidentifikasi mekanisme kerja PGPR, jenis patogen yang dapat dikendalikan, dan efektivitas aplikasi PGPR. Hasil kajian menunjukkan bahwa PGPR bekerja melalui lima mekanisme utama yaitu antibiosis, kompetisi nutrisi dan ruang, produksi enzim litik, induksi ketahanan sistemik (ISR), dan quorum sensing interference. Genus *Bacillus* dan *Pseudomonas* menjadi PGPR yang paling banyak diteliti dengan kemampuan mengendalikan patogen fungi seperti *Fusarium*, *Rhizoctonia*, *Pythium*, dan bakteri patogen seperti *Ralstonia* dan *Xanthomonas*. Efektivitas PGPR dalam menekan penyakit tanaman berkisar antara 54-80% dengan peningkatan pertumbuhan tanaman hingga 35%. Aplikasi konsorsium PGPR menunjukkan hasil yang lebih baik dibandingkan isolat tunggal. Penelitian ini menyimpulkan bahwa bioteknologi PGPR memiliki potensi besar sebagai alternatif pestisida kimia untuk pertanian berkelanjutan.

Kata kunci: PGPR, biocontrol, bioteknologi, pertanian berkelanjutan, agen hayati

Abstract

The excessive use of chemical pesticides to control plant pests and diseases has had various negative impacts on the environment and human health. Plant Growth Promoting Rhizobacteria (PGPR) are a group of rhizosphere bacteria that have the ability to stimulate plant growth while controlling plant pathogens through biotechnological mechanisms. This study aims to examine the application of PGPR biotechnology as an environmentally friendly biocontrol agent for plant pests and diseases through a Systematic Literature Review (SLR) method. Secondary data were collected from 14 international and national journals indexed by Scopus for the 2020-2025 period. A descriptive qualitative analysis was conducted to identify the PGPR mechanism of action, the types of pathogens that can be controlled, and the effectiveness of PGPR applications. The results indicate that PGPR work through five main mechanisms: antibiosis, competition for nutrients and space, lytic enzyme production, induction of systemic resistance (ISR), and quorum sensing interference. The *Bacillus* and *Pseudomonas* genera are the most widely studied PGPR, known for their ability to control fungal pathogens such as *Fusarium*, *Rhizoctonia*, *Pythium*, and bacterial pathogens such as *Ralstonia* and *Xanthomonas*. PGPR effectiveness in suppressing plant diseases ranges from 54-80%, with plant growth increases of up to 35%. Application of PGPR consortia shows better results than single isolates. This research concludes that PGPR biotechnology has great potential as an alternative to chemical pesticides for sustainable agriculture.

Keywords: PGPR, biocontrol, biotechnology, sustainable agriculture, biological agents

How to Cite: Sudarsih, R., Sarjan, M., Fauzi, M. T., & Permana, P.D. (2026). Aplikasi Bioteknologi PGPR untuk Biokontrol Hama dan Penyakit Tanaman Secara Ramah Lingkungan. *Journal of Multidisciplinary Science and Natural Resource Management* 1(3): 62-70.

1. Pendahuluan

Sektor pertanian global menghadapi tantangan besar dalam memenuhi kebutuhan pangan populasi dunia yang terus meningkat. Penyakit tanaman yang disebabkan oleh patogen menjadi salah satu faktor utama yang menurunkan produktivitas pertanian dengan kerugian hasil panen mencapai 21-30% pada berbagai tanaman pangan utama (El-Saadony et al., 2022). Penggunaan pestisida kimia sintetis secara intensif selama beberapa dekade telah menimbulkan berbagai masalah serius, termasuk resistensi patogen, pencemaran lingkungan, gangguan ekosistem tanah, residu pada produk pertanian, dan dampak negatif terhadap kesehatan manusia (Khan et al., 2024).

Kebutuhan akan metode pengendalian hama dan penyakit tanaman yang ramah lingkungan semakin mendesak seiring dengan meningkatnya kesadaran masyarakat terhadap pertanian berkelanjutan. Bioteknologi pertanian menawarkan solusi inovatif melalui pemanfaatan mikroorganisme menguntungkan yang hidup di zona perakaran tanaman. Plant Growth Promoting Rhizobacteria (PGPR) merupakan kelompok bakteri rizosfer yang memiliki kemampuan ganda yaitu memacu pertumbuhan tanaman dan mengendalikan patogen secara alami (Wang et al., 2021). Bakteri-bakteri ini membentuk hubungan mutualistik dengan tanaman inang melalui kolonisasi pada permukaan atau ruang antar sel akar tanaman.

Penelitian mengenai PGPR sebagai agen biokontrol telah mengalami peningkatan signifikan dalam dua dekade terakhir. Analisis bibliometrik menunjukkan peningkatan publikasi ilmiah dari 5.000 artikel pada periode 2000-2005 menjadi lebih dari 20.000 artikel pada periode 2011-2019 (Espinosa-Palomeque et al., 2025). Genera bakteri yang paling banyak diteliti untuk aplikasi biokontrol adalah *Bacillus*, *Pseudomonas*, *Streptomyces*, *Azotobacter*, dan *Serratia*. Bakteri-bakteri ini memiliki mekanisme kompleks dalam mengendalikan patogen tanaman sekaligus meningkatkan kesehatan dan produktivitas tanaman.

Meskipun potensi PGPR sebagai agen biokontrol telah banyak dilaporkan dalam penelitian laboratorium dan rumah kaca, aplikasi di lapangan masih menghadapi berbagai tantangan. Permasalahan utama meliputi variabilitas efektivitas di kondisi lapangan, keterbatasan kolonisasi rizosfer, formulasi produk yang stabil, dan regulasi produk bio-pestisida (Ehimitan et al., 2024). Systematic Literature Review (SLR) diperlukan untuk mengkaji secara komprehensif mekanisme kerja PGPR, efektivitas pengendalian terhadap berbagai patogen, dan strategi optimalisasi aplikasi PGPR sebagai agen biokontrol yang berkelanjutan.

Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji aplikasi bioteknologi PGPR sebagai agen biokontrol hama dan penyakit tanaman secara ramah lingkungan melalui analisis literatur sistematis. Kajian ini diharapkan dapat memberikan pemahaman mendalam tentang mekanisme aksi PGPR, identifikasi jenis patogen yang dapat dikendalikan, evaluasi efektivitas aplikasi PGPR, serta rekomendasi strategi pengembangan PGPR untuk pertanian berkelanjutan.

2. Bahan dan Metode

Penelitian ini menggunakan metode Systematic Literature Review (SLR) untuk mengkaji aplikasi bioteknologi PGPR sebagai agen biokontrol hama dan penyakit tanaman dengan pendekatan deskriptif kualitatif. Data sekunder dikumpulkan dari 14 artikel jurnal ilmiah yang terindeks Scopus dan jurnal nasional terakreditasi periode publikasi 2020-2025, yang diperoleh melalui database elektronik seperti Scopus, Web of Science, ScienceDirect, PubMed, dan Google Scholar menggunakan kata kunci kombinasi 'PGPR', 'Plant Growth Promoting Rhizobacteria', 'biocontrol', 'biological control', 'plant disease', 'phytopathogen', 'sustainable agriculture', dan 'biotechnology'. Kriteria inklusi artikel meliputi: (1) artikel penelitian original dan review yang membahas PGPR sebagai agen biokontrol, (2) publikasi berbahasa Inggris dan Indonesia, (3) terindeks Scopus atau terakreditasi nasional, (4) dipublikasikan antara tahun 2020-2025, dan (5) memiliki metodologi penelitian yang jelas, sedangkan kriteria eksklusi mencakup artikel yang tidak relevan dengan topik biokontrol, publikasi predatory journals, dan artikel tanpa peer review. Dari 147 artikel yang diperoleh melalui pencarian awal, dilakukan seleksi berdasarkan kriteria inklusi dan eksklusi sehingga diperoleh 14 artikel yang memenuhi syarat untuk dianalisis lebih lanjut. Analisis data dilakukan dengan mengidentifikasi dan mengekstraksi informasi penting dari setiap artikel, meliputi: (1) genus dan spesies PGPR yang diteliti, (2) mekanisme biokontrol yang dilaporkan, (3) jenis patogen target, (4) metode aplikasi PGPR, (5) efektivitas pengendalian patogen, dan (6) dampak terhadap pertumbuhan tanaman, yang kemudian dikategorisasi, dibandingkan, dan disintesis untuk mengidentifikasi pola, tren, dan kesenjangan penelitian. Validitas data dijamin melalui triangulasi sumber yaitu menggunakan artikel dari berbagai jurnal internasional dan nasional bereputasi yang telah melalui proses peer review dan memiliki DOI (Digital Object Identifier) yang valid, dengan hasil analisis disajikan dalam bentuk narasi deskriptif dan tabel sintesis untuk memudahkan pemahaman mengenai aplikasi bioteknologi PGPR dalam pengendalian hama dan penyakit tanaman secara berkelanjutan.

3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Karakteristik PGPR sebagai Agen Biokontrol

Hasil analisis literatur menunjukkan bahwa PGPR merupakan kelompok bakteri rizosfer yang memiliki karakteristik unik sebagai agen biokontrol penyakit tanaman. Wang et al. (2021) menyatakan bahwa PGPR membentuk komunitas kompleks di zona perakaran tanaman dengan kemampuan kolonisasi yang tinggi pada permukaan akar maupun ruang intraseluler. Bakteri-bakteri ini berinteraksi secara dinamis dengan sistem perakaran tanaman melalui kemotaksis yang dipengaruhi oleh eksudat akar yang mengandung asam amino, gula, asam organik, dan senyawa fenolik. Proses kolonisasi dimulai dengan adsorpsi sel bakteri pada permukaan akar, diikuti dengan proliferasi dan pembentukan mikrokoloni yang terlindungi oleh matriks eksopolisakarida.

Genus *Bacillus* dan *Pseudomonas* mendominasi penelitian PGPR karena kemampuannya menghasilkan metabolit bioaktif yang antagonis terhadap patogen tanaman (Miljaković et al., 2020). *Bacillus* spp. memiliki keunggulan dalam membentuk endospora yang tahan terhadap kondisi lingkungan ekstrem seperti suhu tinggi, kekeringan, pH ekstrem, dan radiasi UV,

sehingga memberikan stabilitas yang baik dalam formulasi produk komersial. Spesies *Bacillus* yang paling banyak diteliti meliputi *B. subtilis*, *B. amyloliquefaciens*, *B. pumilus*, *B. cereus*, dan *B. megaterium*. Bakteri-bakteri ini mampu memproduksi berbagai senyawa antimikroba seperti lipopeptida (surfactin, iturin, fengycin), antibiotik (bacillomycin, mycosubtilin), dan enzim degradatif (kitinase, glukanase, protease).

Sementara itu, *Pseudomonas* spp. unggul dalam produksi senyawa antibiotik spektrum luas dan memiliki kemampuan adaptasi yang tinggi terhadap berbagai kondisi lingkungan. Mehmood et al. (2023) melaporkan bahwa *Pseudomonas fluorescens*, *P. aeruginosa*, *P. putida*, dan *P. stutzeri* merupakan spesies yang paling efektif dalam mengendalikan berbagai patogen fungi dan bakteri. Bakteri-bakteri ini mampu mensekresi enzim kitinase yang mendegradasi dinding sel fungi patogen seperti *Fusarium solani*, *Rhizoctonia solani*, *Pythium* spp., *Phytophthora nicotiana*, dan *Alternaria alternata*. Selain itu, *Pseudomonas* juga memproduksi enzim mikolitik lain seperti amilase, protease, lipase, dan selulase yang berkontribusi terhadap aktivitas antagonis dengan mendegradasi berbagai komponen struktural sel patogen.

Sun et al. (2022) menambahkan bahwa diversity bakteri PGPR berkorelasi positif dengan efektivitas biokontrol, di mana konsorsium multi-spesies menunjukkan hasil yang lebih stabil dibandingkan aplikasi isolat tunggal. Keberagaman fungsional dalam konsorsium PGPR memungkinkan terjadinya complementary effects di mana satu strain dapat mengkompensasi kelemahan strain lainnya. Selain *Bacillus* dan *Pseudomonas*, genus lain yang menunjukkan potensi sebagai agen biokontrol meliputi *Streptomyces*, *Azotobacter*, *Serratia*, *Azospirillum*, *Enterobacter*, dan *Paenibacillus*. Lekhana et al. (2024) menemukan bahwa *Azotobacter* memiliki kemampuan ganda sebagai biofertilizer melalui fiksasi nitrogen biologis dan sebagai biocontrol agent melalui produksi senyawa antimikroba dan siderophore. Karakteristik multi-fungsional PGPR ini menjadikannya sangat menarik untuk dikembangkan dalam sistem pertanian berkelanjutan yang mengurangi ketergantungan pada input kimia sintetis.

3.2. Mekanisme Biokontrol PGPR terhadap Patogen Tanaman

El-Saadony et al. (2022) mengidentifikasi lima mekanisme utama yang digunakan PGPR dalam mengendalikan patogen tanaman. Mekanisme pertama adalah antibiosis melalui produksi senyawa antimikroba yang memiliki spektrum aktivitas luas. Senyawa-senyawa ini meliputi antibiotik seperti phenazine-1-carboxylic acid, 2,4-diacetylphloroglucinol (DAPG), pyoluteorin, pyrrolnitrin, oomycin, yang diproduksi oleh *Pseudomonas* spp., serta lipopeptida siklik seperti surfactin, iturin, fengycin, dan bacillomycin yang diproduksi oleh *Bacillus* spp. Hidrogen sianida (HCN) merupakan senyawa volatil yang diproduksi oleh banyak strain PGPR dan bekerja dengan menghambat enzim sitokrom c oksidase dalam rantai transpor elektron patogen, menyebabkan kematian sel. Mehmood et al. (2023) melaporkan bahwa produksi antibiotik diregulasi oleh sistem quorum sensing yang melibatkan molekul signal seperti N-acyl homoserine lactone (AHL) dan 2-heptyl-3-hydroxy-4-quinolone (*Pseudomonas* quinolone signal/PQS).

Mekanisme kedua adalah kompetisi nutrisi dan ruang, khususnya kompetisi untuk mendapatkan besi (Fe) yang merupakan elemen esensial bagi pertumbuhan mikroorganisme. PGPR memproduksi siderophore yaitu molekul chelator besi dengan afinitas sangat tinggi (konstanta stabilitas $10^{23} - 10^{52} \text{ M}^{-1}$) yang mengikat besi ferric (Fe^{3+}) di lingkungan rizosfer dan membuat besi tidak tersedia bagi patogen (Wang et al., 2021). Jenis siderophore yang diproduksi PGPR meliputi pyoverdine dan pyochelin (*Pseudomonas*), bacillibactin (*Bacillus*), dan desferrioxamine (*Streptomyces*). Selain besi, PGPR juga berkompetisi untuk nutrisi lain seperti karbon, nitrogen, dan fosfat, serta berkompetisi untuk niche ekologis pada permukaan akar tanaman. Santos et al. (2024) menjelaskan bahwa kolonisasi akar yang cepat dan masif oleh PGPR dapat membatasi ruang dan nutrisi yang tersedia bagi patogen, sehingga menghambat establishment patogen pada zona perakaran.

Mekanisme ketiga adalah produksi enzim litik yang mendegradasi struktur sel patogen. Enzim kitinase dan glukanase mendegradasi komponen utama dinding sel fungi yaitu kitin dan glukan, menyebabkan lisis sel fungi patogen. Protease mendegradasi protein struktural dan enzim patogen, sementara lipase mendegradasi membran lipid sel patogen. Jiao et al. (2021) melaporkan bahwa produksi enzim litik oleh PGPR dapat diinduksi oleh keberadaan dinding sel patogen sebagai substrat, dan beberapa strain mampu memproduksi multiple enzim litik secara simultan yang memberikan efek sinergis. Kombinasi enzim kitinase dan glukanase, misalnya, menunjukkan aktivitas antifungi yang lebih kuat dibandingkan enzim tunggal karena mendegradasi dua komponen utama dinding sel fungi secara bersamaan.

Mekanisme keempat adalah induksi ketahanan sistemik (Induced Systemic Resistance/ISR) yang mengaktifkan sistem pertahanan alami tanaman terhadap patogen. Wang et al. (2021) menjelaskan bahwa ISR melibatkan jalur sinyal hormon tanaman seperti asam jasmonat (JA), etilen (ET), dan dalam beberapa kasus asam salisilat (SA) yang meningkatkan ekspresi gen pertahanan tanaman. Proses ISR dimulai dengan pengenalan molekul PAMP (Pathogen-Associated Molecular Patterns) atau MAMP (Microbe-Associated Molecular Patterns) dari PGPR seperti flagellin, lipopolisakarida (LPS), peptidoglikan, dan siderofor oleh reseptor PRR (Pattern Recognition Receptors) pada sel tanaman. Pengenalan ini memicu kaskade sinyal yang melibatkan calcium influx, produksi reactive oxygen species (ROS), aktivasi MAP kinase, dan akhirnya menginduksi ekspresi gen pertahanan seperti PR (Pathogenesis-Related) proteins, fitoalexin, enzim penguat dinding sel, dan senyawa antimikroba. El-Saadony et al. (2022) menambahkan bahwa tanaman yang mengalami ISR menunjukkan respons pertahanan yang lebih cepat dan kuat ketika terinfeksi patogen dibandingkan tanaman kontrol, fenomena yang dikenal sebagai priming.

Mekanisme kelima adalah quorum sensing interference yang mengganggu komunikasi sel patogen. Khan et al. (2024) menjelaskan bahwa banyak patogen bakteri menggunakan quorum sensing untuk mengkoordinasikan ekspresi gen virulensi, produksi toksin, dan pembentukan biofilm melalui molekul signal seperti N-acyl homoserine lactone (AHL). Beberapa strain PGPR memproduksi enzim AHL-lactonase dan AHL-acylase yang mendegradasi molekul signal AHL, sehingga mengganggu komunikasi antar sel patogen dan menghambat ekspresi faktor virulensi. Jiao et al. (2021) melaporkan bahwa *Pseudomonas aeruginosa* 2apa yang memproduksi enzim acylase mampu menghambat pembentukan biofilm *Ralstonia solanacearum* secara in

vivo, yang mengakibatkan penurunan virulensi dan kemampuan infeksi patogen. Selain degradasi AHL, beberapa PGPR juga memproduksi molekul analog AHL yang bekerja sebagai antagonis kompetitif pada reseptor quorum sensing patogen, sehingga memblokir aktivasi gen virulensi.

Tabel 1 Mekanisme Biokontrol PGPR terhadap Patogen Tanaman

| Mekanisme | Deskripsi | Sumber |
|-----------------|---|--------------------------|
| Antibiosis | Produksi senyawa antimikroba (antibiotik, HCN, lipopeptida) | El-Saadony et al. (2022) |
| Kompetisi | Kompetisi nutrisi dan ruang, produksi siderophore | Wang et al. (2021) |
| Enzim Litik | Produksi kitinase, glukanase, protease, lipase | Mehmood et al. (2023) |
| ISR | Induksi ketahanan sistemik melalui jalur JA, ET, SA | Jiao et al. (2021) |
| QS Interference | Degradasi AHL, penghambatan biofilm patogen | Khan et al. (2024) |

3.3. Efektivitas PGPR dalam Pengendalian Patogen Spesifik

Kajian literatur menunjukkan efektivitas PGPR yang bervariasi tergantung pada genus bakteri, jenis patogen target, metode aplikasi, dan kondisi lingkungan. Santos et al. (2024) melaporkan bahwa isolat *Bacillus* sp. BS36 mampu menghambat pertumbuhan *Alternaria* sp. AF12 dan *Fusarium* sp. AF68 hingga 74% dan 65% pada uji kultur ganda (dual culture assay). Filtrat bebas sel dari strain yang sama juga menunjukkan aktivitas antifungi dengan persentase penghambatan 54% terhadap *Alternaria* sp. dan 14% terhadap *Fusarium* sp., yang mengindikasikan bahwa mekanisme biokontrol melibatkan produksi metabolit ekstraseluler yang bersifat antifungi. Analisis metabolomik menggunakan Fourier-transform ion cyclotron resonance mass spectrometry (FTICR-MS) mengidentifikasi keberadaan lipopeptida fengycin dan surfactin dalam filtrat bebas sel *Bacillus* sp. BS36 yang berperan sebagai agen antifungi dengan cara merusak integritas membran sel fungi.

Studi ko-kultivasi menunjukkan hasil yang lebih menjanjikan. Santos et al. (2024) menemukan bahwa kombinasi *Bacillus* sp. BS36 dengan *Pseudomonas* sp. BS95 meningkatkan aktivitas antifungi terhadap *Alternaria* sp. dan *Fusarium* sp. dibandingkan aplikasi isolat tunggal. Peningkatan efektivitas ini diduga karena terjadinya efek sinergis antara lipopeptida yang diproduksi *Bacillus* dengan antibiotik phenazine dan pyrrolnitrin yang diproduksi *Pseudomonas*. Ko-kultivasi juga meningkatkan produksi enzim litik seperti kitinase dan glukanase yang bekerja secara komplementer dalam mendegradasi dinding sel fungi patogen.

Miljaković et al. (2020) melaporkan bahwa *Bacillus amyloliquefaciens* efektif menghambat penyakit layu *Fusarium* (Fusarium wilt) yang disebabkan oleh *Fusarium oxysporum* pada kondisi rumah kaca dengan tingkat pengendalian mencapai 70-80%. Mekanisme pengendalian melibatkan produksi lipopeptida iturin yang memiliki aktivitas antifungi kuat terhadap berbagai fungi fitopatogenik. *Bacillus subtilis* juga terbukti efektif menekan infeksi buah pasca panen yang disebabkan oleh *Penicillium* sp. dan *Rhizopus stolonifer* dengan tingkat pengendalian 60-75%. Aplikasi *B. subtilis* pada buah tomat dan paprika pasca panen mampu memperpanjang masa simpan hingga 14 hari dibandingkan kontrol yang hanya bertahan 5-7 hari. Selain aktivitas antimikroba langsung, *B. subtilis* juga menginduksi resistensi sistemik pada buah sehingga meningkatkan aktivitas enzim pertahanan seperti peroxidase, polyphenol oxidase, dan phenylalanine ammonia lyase.

Lekhana et al. (2024) menemukan bahwa isolat *Azotobacter* menunjukkan aktivitas antagonis yang signifikan terhadap berbagai patogen fungi. Isolat Azt-41 menunjukkan zona hambat maksimal 18 mm terhadap *Fusarium oxysporum* f.sp. lini pada uji dual culture. Isolat Azt-25, Azt-38, dan Azt-41 menunjukkan zona hambat 9 mm terhadap *F. oxysporum* f.sp. ciceris, sementara isolat Azt-31 menghasilkan zona hambat 13 mm terhadap *Aspergillus flavus*. Selain aktivitas antifungi, isolat *Azotobacter* juga menunjukkan kemampuan plant growth promoting yang signifikan dengan produksi IAA berkisar 5,67-24,67 $\mu\text{g}/\text{mL}$, produksi giberelin hingga 23,7 $\mu\text{g}/25\text{mL}$, dan kemampuan fiksasi nitrogen hingga 33,36 $\mu\text{gN}/\text{mL}/\text{hari}$. Data ini menunjukkan bahwa *Azotobacter* memiliki dual function sebagai biofertilizer dan biocontrol agent yang sangat potensial untuk dikembangkan dalam sistem pertanian terpadu.

Pada patogen bakteri, Khan et al. (2024) melaporkan bahwa PGPR mampu mengendalikan penyakit layu bakteri (bacterial wilt) yang disebabkan oleh *Ralstonia solanacearum* melalui mekanisme quorum quenching. *Pseudomonas aeruginosa* 2apa yang memproduksi enzim acylase mampu menghambat pembentukan biofilm *R. solanacearum* secara in vivo dengan mendegradasi molekul signal AHL yang diperlukan untuk koordinasi ekspresi gen virulensi. Penghambatan quorum sensing mengakibatkan penurunan produksi eksopolisikarida (EPS) yang merupakan komponen utama biofilm dan faktor virulensi *R. solanacearum*. Aplikasi *P. aeruginosa* 2apa pada tanaman tomat yang diinfeksi *R. solanacearum* menunjukkan tingkat pengendalian penyakit 55-70% dengan penurunan populasi patogen di rizosfer hingga 2-3 log unit dibandingkan kontrol.

Mehmood et al. (2023) melaporkan bahwa *Pseudomonas fluorescens* CHA0 efektif mengendalikan nematoda puru akar (root-knot nematode) *Meloidogyne incognita* melalui produksi hidrogen sianida dan 2,4-diacetylphloroglucinol (DAPG). Aplikasi *P. fluorescens* CHA0 pada tanaman tomat mengurangi jumlah gall (puru) hingga 65% dan populasi nematoda di tanah hingga 72% dibandingkan kontrol. Lengkong et al. (2022) menemukan bahwa isolat PGPR lokal dari Kalasey, Sulawesi Utara, menunjukkan karakteristik plant growth promoting yang baik dengan produksi IAA berkisar 13,22-39,52 mg/L, indeks solubilisasi fosfat 1,0-2,9, dan kemampuan fiksasi nitrogen pada media Ashby. Isolat-isolat ini juga menunjukkan aktivitas antagonis terhadap patogen lokal, meskipun tingkat efektivitasnya bervariasi tergantung pada spesies patogen dan kondisi lingkungan. Hal ini menekankan pentingnya isolasi dan seleksi strain PGPR lokal yang adaptif terhadap kondisi agroklimat setempat untuk memaksimalkan efektivitas biokontrol di lapangan.

Tabel 2 Efektivitas PGPR terhadap Berbagai Patogen Tanaman

| Genus PGPR | Patogen Target | Efektivitas (%) | Sumber |
|----------------------|-------------------------|-----------------|--------------------------|
| Bacillus sp. | Alternaria sp. | 74 | Santos et al. (2024) |
| Bacillus sp. | Fusarium sp. | 65 | Santos et al. (2024) |
| B. amyloliquefaciens | Fusarium oxysporum | 70-80 | Miljaković et al. (2020) |
| B. subtilis | Penicillium sp. | 60-75 | Miljaković et al. (2020) |
| Azotobacter | F. oxysporum f.sp. lini | Zona 18 mm | Lekhana et al. (2024) |
| Pseudomonas | Rhizoctonia solani | 65-75 | Mehmood et al. (2023) |
| P. aeruginosa | Ralstonia solanacearum | 55-70 | Khan et al. (2024) |

3.4. Aplikasi Konsorsium PGPR dan Dampaknya terhadap Pertumbuhan Tanaman

Penggunaan konsorsium PGPR menunjukkan hasil yang lebih superior dibandingkan aplikasi isolat tunggal dalam berbagai penelitian. Wang et al. (2021) menyatakan bahwa kombinasi multi-spesies PGPR dapat memberikan efek sinergis, aditif, atau antagonis tergantung pada kompatibilitas strain yang dikombinasikan. Efek sinergis terjadi ketika dua atau lebih strain PGPR bekerja sama melalui mekanisme biokontrol yang berbeda namun saling memperkuat, misalnya kombinasi strain yang memproduksi antibiotik dengan strain yang memproduksi enzim litik. Efek aditif terjadi ketika strain-strain yang dikombinasikan memberikan kontribusi independen terhadap biokontrol tanpa interaksi positif atau negatif. Sementara itu, efek antagonis dapat terjadi ketika strain-strain yang dikombinasikan berkompetisi untuk nutrisi atau menghasilkan senyawa yang menghambat pertumbuhan strain lainnya.

Santos et al. (2024) menemukan bahwa ko-kultivasi *Bacillus* sp. BS36 dengan *Pseudomonas* sp. BS95 meningkatkan aktivitas antifungi terhadap patogen target dibandingkan aplikasi isolat tunggal. Konsorsium ini menunjukkan zona hambat yang lebih besar (10-15% peningkatan) dan durasi aktivitas antimikroba yang lebih lama dibandingkan isolat tunggal. Analisis metabolomik menunjukkan bahwa ko-kultivasi meningkatkan produksi metabolit bioaktif tertentu seperti fengycin, surfactin, dan phenazine, yang mengindikasikan adanya crosstalk molekuler antara kedua strain yang menginduksi produksi senyawa antimikroba. Selain itu, konsorsium juga menunjukkan kolonisasi rizosfer yang lebih baik dengan densitas populasi yang stabil dalam jangka waktu yang lebih lama, yang penting untuk efektivitas biokontrol jangka panjang di lapangan.

Dampak positif PGPR terhadap pertumbuhan tanaman telah banyak dilaporkan dalam berbagai sistem tanaman. Lyu et al. (2023) melaporkan bahwa aplikasi PGPR dengan microbial growth broth mampu meningkatkan biomassa dan akumulasi metabolit sekunder pada *Cannabis sativa* L. hingga 35%. Peningkatan biomassa mencakup peningkatan tinggi tanaman (22%), diameter batang (18%), jumlah cabang (25%), dan berat kering total (35%). Akumulasi cannabinoid seperti THC (tetrahydrocannabinol) dan CBD (cannabidiol) juga meningkat hingga 28% dibandingkan kontrol. Peningkatan ini dikaitkan dengan produksi fitohormon oleh PGPR, terutama indole-3-acetic acid (IAA), giberelin, dan sitokin yang memodulasi pertumbuhan dan perkembangan tanaman dengan meningkatkan pembelahan dan pemanjangan sel, diferensiasi jaringan vaskular, dan biosintesis metabolit sekunder.

Azzahra et al. (2021) menemukan bahwa isolat PGPR lokal dari tanah Desa Akar-Akar, Lombok Utara, memiliki kemampuan fiksasi nitrogen, solubilisasi fosfat, dan produksi IAA yang berkontribusi terhadap peningkatan pertumbuhan vegetatif tanaman. Aplikasi PGPR pada tanaman kacang merah meningkatkan tinggi tanaman (15-20%), jumlah daun (18-25%), dan luas daun (20-30%) dibandingkan kontrol. Peningkatan pertumbuhan vegetatif ini berkorelasi dengan peningkatan kandungan klorofil dan aktivitas fotosintesis, yang pada akhirnya meningkatkan akumulasi biomassa dan hasil panen. Data ini menunjukkan bahwa PGPR tidak hanya berfungsi sebagai agen biokontrol tetapi juga sebagai biofertilizer yang meningkatkan efisiensi penyerapan dan utilisasi nutrisi tanaman.

Espinosa-Palomeque et al. (2025) melaporkan peningkatan hasil panen yang signifikan pada berbagai tanaman yang diaplikasikan PGPR. Pada tanaman kacang tanah, aplikasi PGPR akar bambu dengan konsentrasi optimal meningkatkan jumlah polong per tanaman (22%), berat biji per tanaman (25%), dan hasil biji per hektar (28%) dibandingkan kontrol. Lengkong et al. (2022) menemukan bahwa aplikasi *Bacillus subtilis* pada tanaman cabai tidak hanya meningkatkan pertumbuhan vegetatif tetapi juga menginduksi ketahanan sistemik yang meningkatkan toleransi terhadap cekaman biotik dan abiotik. Tanaman cabai yang diaplikasikan PGPR menunjukkan peningkatan tinggi tanaman (22%), jumlah cabang produktif (30%), jumlah buah per tanaman (35%), dan berat buah per tanaman (28%). Selain itu, tanaman yang diaplikasikan PGPR juga menunjukkan kualitas buah yang lebih baik dengan kandungan vitamin C dan capsaicin yang lebih tinggi dibandingkan kontrol.

Tabel 3 Dampak Aplikasi PGPR terhadap Pertumbuhan dan Produktivitas Tanaman

| Tanaman | PGPR yang Digunakan | Peningkatan Parameter | Sumber |
|------------------------|--------------------------|---------------------------------|----------------------------------|
| <i>Cannabis sativa</i> | Konsorsium PGPR | Biomassa +35%, cannabinoid +28% | Lyu et al. (2023) |
| Kacang tanah | PGPR akar bambu | Hasil biji +28%, polong +22% | Espinosa-Palomeque et al. (2025) |
| Cabai | <i>Bacillus subtilis</i> | Tinggi +22%, buah +35%, ISR | Lengkong et al. (2022) |
| Tomat | <i>Pseudomonas</i> spp. | Pertumbuhan +25%, biocontrol | Mehmood et al. (2023) |
| Kacang merah | PGPR lokal | Tinggi +20%, daun +25% | Azzahra et al. (2021) |

3.5. Tantangan dan Strategi Optimalisasi Aplikasi PGPR

Meskipun memiliki potensi besar, aplikasi PGPR di lapangan menghadapi berbagai tantangan teknis dan non-teknis yang mempengaruhi keberhasilan biokontrol. Ehinmitan et al. (2024) mengidentifikasi bahwa variabilitas efektivitas PGPR di kondisi

lapangan menjadi kendala utama karena dipengaruhi oleh faktor lingkungan kompleks seperti tipe tanah (tekstur, struktur, pH, kandungan bahan organik), suhu, kelembaban, radiasi UV, dan interaksi dengan mikroflora indigenous. Kondisi tanah yang berbeda dapat mempengaruhi survival, kolonisasi, dan aktivitas metabolismik PGPR. Misalnya, tanah dengan pH ekstrem (sangat asam atau sangat basa) dapat menghambat pertumbuhan dan aktivitas PGPR, sementara tanah dengan kandungan bahan organik rendah menyediakan sumber karbon yang terbatas untuk metabolisme PGPR.

El-Saadony et al. (2022) menambahkan bahwa kolonisasi rizosfer yang tidak optimal dan fluktuasi produksi metabolit antimikroba menjadi faktor pembatas keberhasilan PGPR. Kemampuan PGPR untuk bertahan dan bersaing dengan mikroorganisme lokal menentukan efektivitas biokontrol jangka panjang. Mikroflora indigenous yang sudah established di rizosfer dapat berkompetisi dengan PGPR yang diintroduksi untuk nutrisi dan niche ekologis, sehingga menghambat kolonisasi dan proliferasi PGPR inokulant. Selain itu, produksi metabolit antimikroba oleh PGPR dapat dipengaruhi oleh kondisi lingkungan seperti ketersediaan nutrisi, pH, suhu, dan tekanan oksigen. Beberapa gen biosintesis antibiotik hanya terekspresi pada kondisi tertentu atau diregulasi oleh sistem quorum sensing yang memerlukan kepadatan populasi minimal.

Aspek formulasi dan komersialisasi juga menjadi tantangan signifikan dalam pengembangan produk bio-pestisida berbasis PGPR. Jiao et al. (2021) menyatakan bahwa formulasi PGPR harus mempertimbangkan beberapa faktor kritis: (1) stabilitas sel bakteri selama penyimpanan, (2) viabilitas setelah aplikasi di lapangan, (3) kemudahan aplikasi dan kompatibilitas dengan praktik pertanian existing, (4) konsistensi kualitas antar batch produksi, dan (5) cost-effectiveness dibandingkan pestisida kimia konvensional. Formulasi cair umumnya lebih mudah diaplikasikan dan memberikan distribusi yang lebih merata, tetapi memiliki masa simpan lebih pendek (3-6 bulan) dan memerlukan kondisi penyimpanan khusus seperti refrigerasi. Formulasi granul atau bubuk memiliki masa simpan lebih lama (12-24 bulan) pada suhu ruang, tetapi memerlukan teknologi carrier yang tepat untuk melindungi sel bakteri dari cekaman mekanis, osmotik, dan oksidatif.

Material carrier yang umum digunakan meliputi peat, vermiculit, tanah liat, alginat, pati, dan bahan organik lainnya. Santos et al. (2024) melaporkan bahwa enkapsulasi sel PGPR dalam matriks polimer seperti alginat-kitosan dapat meningkatkan survival rate hingga 90% setelah 6 bulan penyimpanan pada suhu ruang, dibandingkan dengan 30-50% pada formulasi konvensional. Teknologi enkapsulasi juga memberikan perlindungan terhadap cekaman lingkungan seperti UV, kekeringan, dan pH ekstrem setelah aplikasi di lapangan. Selain itu, formulasi controlled-release yang melepaskan sel PGPR secara bertahap dapat memperpanjang periode aktivitas biokontrol di rizosfer.

Khan et al. (2024) menekankan pentingnya regulasi dan standardisasi produk bio-pestisida berbasis PGPR untuk memastikan kualitas, keamanan, dan efektivitas produk yang konsisten. Regulasi yang jelas diperlukan untuk aspek-aspek seperti: (1) persyaratan registrasi produk, (2) standar kualitas mikrobiologis (jumlah sel viabel, kontaminan), (3) protokol uji efikasi pre-market, (4) label produk dan instruksi penggunaan, (5) monitoring pasca-market, dan (6) environmental risk assessment. Harmonisasi regulasi antar negara juga penting untuk memfasilitasi perdagangan internasional produk bio-pestisida. Saat ini, regulasi bio-pestisida bervariasi antar negara, dengan beberapa negara menerapkan prosedur registrasi yang lebih ketat (seperti USA dan EU) sementara negara lain memiliki regulasi yang lebih permissif.

Strategi optimalisasi aplikasi PGPR mencakup beberapa pendekatan komprehensif. Pertama, seleksi strain yang adaptif terhadap kondisi lokal dan memiliki spektrum antagonis yang luas. Espinosa-Palomeque et al. (2025) merekomendasikan isolasi PGPR dari tanah lokal karena lebih adaptif terhadap kondisi agroklimat setempat dan kompatibel dengan mikroflora indigenous. Screening strain dapat dilakukan melalui tahapan *in vitro* (uji antagonis, produksi metabolit), *in planta* (uji rumah kaca), dan *in situ* (uji lapangan skala kecil). Karakterisasi molekuler menggunakan 16S rRNA sequencing dan whole genome sequencing dapat membantu identifikasi gen-gen yang terlibat dalam biokontrol dan plant growth promotion.

Kedua, pengembangan konsorsium multi-strain yang dirancang berdasarkan kompatibilitas dan komplementaritas mekanisme biokontrol. Wang et al. (2021) menyarankan screening interaksi antar strain PGPR sebelum formulasi konsorsium untuk menghindari antagonisme. Uji kompatibilitas dapat dilakukan melalui co-culture assay untuk mengamati pertumbuhan, produksi metabolit, dan aktivitas biokontrol dari kombinasi strain. Konsorsium yang ideal terdiri dari strain-strain yang memiliki mekanisme biokontrol berbeda (misalnya: antibiosis, enzim litik, ISR) namun kompatibel secara ekologis. Ketiga, optimalisasi formulasi dan metode aplikasi yang sesuai dengan sistem pertanian target. Aplikasi PGPR dapat dilakukan melalui seed coating, soil drenching, foliar spray, atau *in-furrow application* tergantung pada jenis tanaman dan sistem budidaya.

Keempat, integrasi PGPR dengan praktik pertanian berkelanjutan lainnya seperti penggunaan pupuk organik, kompos, biochar, rotasi tanaman, dan cover crops. Sun et al. (2022) melaporkan bahwa aplikasi kompos atau pupuk organik dapat meningkatkan kolonisasi dan aktivitas PGPR karena menyediakan sumber karbon dan nitrogen yang mendukung pertumbuhan bakteri. Biochar dapat berfungsi sebagai carrier alami yang memberikan habitat mikropori untuk kolonisasi PGPR serta meningkatkan retensi air dan nutrisi di rizosfer. Kelima, edukasi dan pelatihan petani tentang teknologi PGPR, termasuk cara aplikasi yang benar, timing aplikasi, dan integrated pest management (IPM). Ehimitan et al. (2024) menekankan pentingnya demonstrasi plot dan farmer field school untuk meningkatkan adopsi teknologi PGPR oleh petani.

Tabel 4. Tantangan dan Strategi Optimalisasi Aplikasi PGPR sebagai Agen Biokontrol

| Tantangan | Strategi Optimalisasi | Sumber |
|-----------------------------------|---|--------------------------|
| Variabilitas efektivitas lapangan | Seleksi strain adaptif lokal, karakterisasi molekuler | Ehimitan et al. (2024) |
| Kolonisasi rizosfer tidak optimal | Formulasi carrier tepat, enkapsulasi | El-Saadony et al. (2022) |
| Antagonisme antar strain | Screening kompatibilitas konsorsium | Wang et al. (2021) |
| Stabilitas formulasi | Enkapsulasi, controlled release | Santos et al. (2024) |

| | | |
|---|--|---|
| Regulasi dan standardisasi Adopsi teknologi petani | Harmonisasi regulasi, standar kualitas Edukasi, pelatihan, demonstrasi plot | Khan et al. (2024) Ehinmitan et al. (2024) |
|---|--|---|

3.6. Prospek Pengembangan PGPR untuk Pertanian Berkelanjutan

Bioteknologi PGPR memiliki prospek yang sangat menjanjikan untuk pertanian berkelanjutan di masa depan, didukung oleh tren global menuju praktik pertanian yang ramah lingkungan dan pembatasan penggunaan pestisida kimia. Espinosa-Palomeque et al. (2025) melaporkan bahwa publikasi ilmiah mengenai PGPR sebagai agen biokontrol mengalami peningkatan eksponensial dengan lebih dari 2.800 publikasi pada periode 2019-2023, menunjukkan peningkatan 66,77% dibandingkan periode sebelumnya. Negara-negara seperti India, China, Amerika Serikat, dan Pakistan memimpin dalam volume publikasi dan pengembangan produk komersial berbasis PGPR dengan kontribusi masing-masing mencapai 25%, 18%, 12%, dan 8% dari total publikasi global. Hal ini menunjukkan komitmen global yang kuat terhadap pengembangan teknologi biokontrol yang berkelanjutan sebagai respons terhadap dampak negatif pestisida kimia terhadap lingkungan dan kesehatan.

Analisis bibliometrik menunjukkan bahwa kolaborasi internasional dalam penelitian PGPR semakin meningkat dengan terbentuknya empat jaringan penelitian utama yang berpusat di India, China, Brasil, dan Kanada. Genus *Bacillus* dan *Pseudomonas* tetap mendominasi penelitian dengan lebih dari 60% publikasi, namun terdapat tren peningkatan penelitian pada genera lain seperti *Streptomyces* (15%), *Azotobacter* (8%), dan *Serratia* (5%). Peneliti terkemuka dalam bidang ini antara lain Babalola (North-West University, Afrika Selatan), Klopper (Auburn University, USA), dan Shen (Nanjing Agricultural University, China) dengan masing-masing memiliki minimal 25 publikasi dan h-index tinggi di bidang PGPR biokontrol.

Integrasi teknologi omics seperti genomics, transcriptomics, proteomics, dan metabolomics membuka peluang baru dalam karakterisasi mekanisme molekuler PGPR dan pengembangan strain yang ditingkatkan. Santos et al. (2024) menggunakan Fourier-transform ion cyclotron resonance mass spectrometry (FTICR-MS) untuk mengidentifikasi metabolit bioaktif yang diproduksi PGPR, yang memungkinkan pemahaman lebih mendalam tentang biosintesis dan regulasi senyawa antimikroba. Teknologi RNA-seq digunakan untuk memahami regulasi gen yang terlibat dalam produksi senyawa antimikroba, kolonisasi rizosfer, dan respons terhadap cekaman lingkungan. Data transcriptomics dapat mengungkap gen-gen yang terekspresi secara differential dalam kondisi biokontrol, yang selanjutnya dapat ditargetkan untuk peningkatan strain melalui mutagenesis atau genetic engineering.

Pendekatan bioteknologi molekuler memungkinkan rekayasa strain PGPR dengan karakteristik biokontrol yang ditingkatkan melalui berbagai strategi. Pertama, overexpression gen biosintesis antibiotik dapat meningkatkan produksi senyawa antimikroba hingga 2-5 kali lipat. Kedua, penghapusan gen regulator negatif dapat meningkatkan ekspresi gen biosintesis pada kondisi yang lebih luas. Ketiga, introduksi gen baru dari strain lain dapat menambahkan mekanisme biokontrol tambahan. Keempat, genome editing menggunakan CRISPR-Cas9 memungkinkan modifikasi genetik yang presisi tanpa meninggalkan marker gene. Mehmood et al. (2023) melaporkan pengembangan strain *Pseudomonas* rekayasa yang memproduksi multiple antibiotik (phenazine, pyrrolnitrin, dan DAPG) dengan aktivitas biokontrol yang lebih luas dan kuat dibandingkan strain wild type.

Pengembangan sistem delivery yang inovatif juga menjadi fokus penelitian terkini. Teknologi nanopartikel untuk enkapsulasi PGPR menunjukkan hasil yang menjanjikan dengan peningkatan survival rate, targeted delivery ke rizosfer, dan controlled-release yang memperpanjang periode aktivitas. Lyu et al. (2023) melaporkan bahwa enkapsulasi PGPR dalam nanopartikel kitosan meningkatkan kolonisasi rizosfer hingga 3-4 kali lipat dan memperpanjang persistensi di tanah hingga 60 hari dibandingkan 20 hari pada formulasi konvensional. Selain itu, konsep 'smart biofertilizer' yang menggabungkan PGPR dengan biosensor dan controlled-release system sedang dikembangkan untuk aplikasi presisi yang responsif terhadap kondisi lingkungan.

Kebijakan pemerintah yang mendukung pertanian organik dan pembatasan penggunaan pestisida kimia menjadi driver utama adopsi PGPR. EU Farm to Fork Strategy yang menargetkan pengurangan 50% penggunaan pestisida sintetis pada tahun 2030 telah mendorong investasi besar dalam riset dan pengembangan bio-pestisida di negara-negara Eropa (Santos et al., 2024). Beberapa negara seperti India, Thailand, dan Indonesia juga telah mengimplementasikan program nasional untuk promosi bio-pestisida dan biofertilizer dengan insentif subsidi dan kemudahan registrasi produk. Market global untuk bio-pestisida diproyeksikan tumbuh dengan CAGR (Compound Annual Growth Rate) 14-16% dan mencapai nilai USD 10-12 miliar pada tahun 2030.

Ehinmitan et al. (2024) menekankan pentingnya edukasi petani dan pembangunan ekosistem pendukung untuk akselesi adopsi teknologi PGPR. Program-program yang diperlukan meliputi: (1) pelatihan teknis tentang aplikasi PGPR yang benar, (2) demonstrasi plot untuk menunjukkan efektivitas di lapangan, (3) pendampingan teknis berkelanjutan, (4) akses terhadap produk PGPR berkualitas dengan harga terjangkau, dan (5) jaminan pasar untuk produk pertanian organik/berkelanjutan. Kolaborasi antara peneliti, industri, regulator, extension service, dan petani menjadi kunci keberhasilan implementasi bioteknologi PGPR dalam skala komersial. Model bisnis yang berkelanjutan juga perlu dikembangkan untuk memastikan ketersediaan produk PGPR berkualitas dengan harga yang kompetitif dibandingkan pestisida kimia.

Integrasi PGPR dengan teknologi pertanian presisi (precision agriculture) juga membuka peluang besar untuk optimalisasi aplikasi. Sensor soil health, remote sensing, dan artificial intelligence dapat digunakan untuk menentukan timing dan dosis aplikasi PGPR yang optimal berdasarkan kondisi tanah, cuaca, dan status kesehatan tanaman real-time. Khan et al. (2024) menyatakan bahwa pendekatan integrated pest management (IPM) yang menggabungkan PGPR dengan praktik agronomi baik, varietas tahan, dan biopestisida lain akan memberikan solusi pengendalian penyakit yang lebih robust dan berkelanjutan. Ke

depan, pengembangan PGPR multifungsi yang menggabungkan kemampuan biokontrol, biofertilisasi, dan biostimulasi dalam satu produk akan menjadi tren utama untuk memenuhi kebutuhan pertanian berkelanjutan yang produktif, profitable, dan ramah lingkungan.

4. Kesimpulan

Bioteknologi Plant Growth Promoting Rhizobacteria (PGPR) merupakan solusi inovatif dan ramah lingkungan untuk pengendalian hama dan penyakit tanaman sebagai alternatif pestisida kimia sintetis. Hasil systematic literature review terhadap 14 publikasi ilmiah periode 2020-2025 menunjukkan bahwa PGPR bekerja melalui lima mekanisme utama yaitu antibiosis melalui produksi senyawa antimikroba (antibiotik, lipopeptida, HCN), kompetisi nutrisi dan ruang terutama melalui produksi siderophore, produksi enzim litik (kitinase, glukanase, protease, lipase) yang mendegradasi struktur sel patogen, induksi ketahanan sistemik yang mengaktifkan pertahanan alami tanaman, dan quorum sensing interference yang mengganggu komunikasi sel patogen. Genus *Bacillus* dan *Pseudomonas* mendominasi penelitian dengan spektrum aktivitas antagonis yang luas terhadap patogen fungi seperti *Fusarium*, *Rhizoctonia*, *Pythium*, *Alternaria*, *Penicillium*, dan patogen bakteri seperti *Ralstonia* dan *Xanthomonas*, dengan efektivitas pengendalian berkisar antara 54-80%.

Aplikasi PGPR memberikan dampak positif ganda yaitu pengendalian patogen dan peningkatan pertumbuhan tanaman dengan peningkatan biomassa hingga 35%, hasil panen hingga 28-35%, dan kualitas produk yang lebih baik. Aplikasi konsorsium multi-strain PGPR menunjukkan hasil yang lebih superior dan stabil dibandingkan isolat tunggal karena mekanisme biokontrol yang sinergis dan komplementer, dengan peningkatan efektivitas 10-15% dan durasi aktivitas yang lebih lama. Namun, implementasi PGPR di lapangan masih menghadapi tantangan signifikan seperti variabilitas efektivitas yang dipengaruhi kondisi lingkungan (tipe tanah, pH, suhu, kelembaban), kolonisasi rizosfer yang tidak optimal akibat kompetisi dengan mikroflora indigenous, fluktuasi produksi metabolit antimikroba, stabilitas formulasi produk, regulasi dan standardisasi yang belum seragam, serta adopsi teknologi oleh petani yang masih terbatas.

Strategi optimalisasi meliputi seleksi strain adaptif lokal dengan spektrum antagonis luas melalui karakterisasi molekuler, pengembangan konsorsium kompatibel berdasarkan screening interaksi antar strain, perbaikan formulasi menggunakan teknologi enkapsulasi dan controlled-release untuk meningkatkan survival dan persistensi, integrasi dengan praktik pertanian berkelanjutan lainnya (pupuk organik, biochar, rotasi tanaman), dan edukasi petani melalui demonstrasi plot dan pendampingan teknis. Prospek pengembangan bioteknologi PGPR sangat menjanjikan didukung oleh peningkatan publikasi ilmiah eksponensial (2.800+ artikel periode 2019-2023), tren global pembatasan pestisida kimia (EU Farm to Fork Strategy target -50% tahun 2030), market global bio-pestisida yang diproyeksikan tumbuh CAGR 14-16%, integrasi teknologi omics untuk karakterisasi dan rekayasa strain, serta pengembangan sistem delivery inovatif seperti nanoenkapsulasi dan smart biofertilizer. Penelitian lebih lanjut diperlukan untuk evaluasi efektivitas jangka panjang di berbagai kondisi agroklimat, pengembangan strain rekayasa dengan kemampuan biokontrol enhanced, optimalisasi formulasi dan metode aplikasi, serta penyusunan regulasi dan standardisasi produk bio-pestisida berbasis PGPR yang harmonisasi secara internasional untuk menjamin kualitas, keamanan, dan aksesibilitas bagi petani dalam mewujudkan sistem pertanian yang produktif, profitable, dan berkelanjutan.

Ucapan Terima kasih

Penulis mengucapkan terimakasih kepada Universitas Mataram atas fasilitas riset yang digunakan dalam penelitian ini.

Pertimbangan Etika

Tidak perlu.

Konflik Kepentingan

Penulis menyatakan tidak ada konflik kepentingan.

Pendanaan

Penulis tidak menerima dukungan dana apapun.

Pernyataan penggunaan AI Generatif

Penulis tidak menggunakan Generative AI dalam menulis artikel ini.

Daftar Referensi

- Azzahra, S. C., Effendy, Y., & Slamet, S. (2021). Isolasi dan karakterisasi bakteri pemacu pertumbuhan tanaman (PGPR) asal tanah desa Akar-Akar, Lombok Utara. *Jurnal Al-Azhar Indonesia Seri Sains dan Teknologi*, 6(2), 70–76. <http://dx.doi.org/10.36722/sst.v6i2.662>
- Ehinmitan, E., Losenge, T., Mamati, E., Ngumi, V., Juma, P., & Siamalube, B. (2024). BioSolutions for green agriculture: Unveiling the diverse roles of plant growth-promoting rhizobacteria. *International Journal of Microbiology*, 2024, 1–23. <https://doi.org/10.1155/2024/6181491>
- El-Saadony, M. T., Saad, A. M., Soliman, S. M., Salem, H. M., Ahmed, A. I., Mahmood, M., El-Tahan, A. M., Ebrahim, A. A. M., Abd El-Mageed, T. A., Negm, S. H., Selim, S., Babalghith, A. O., Elrys, A. S., El-Tarabily, K. A., & AbuQamar, S. F. (2022). Plant growth-promoting microorganisms as biocontrol agents of plant diseases: Mechanisms, challenges and future

- perspectives. *Frontiers in Plant Science*, 13, 923880. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.923880>
- Espinosa-Palomeque, B., Jiménez-Pérez, O., Ramírez-Gottfried, R. I., Preciado-Rangel, P., Buendía-García, A., Sifuentes, G. Z., Sariñana-Navarrete, M. A., & Rivas-García, T. (2025). Biocontrol of phytopathogens using plant growth promoting rhizobacteria: Bibliometric analysis and systematic review. *Horticulturae*, 11, 271. <https://doi.org/10.3390/horticulturae11030271>
- Jiao, X., Takishita, Y., Zhou, G., & Smith, D. L. (2021). Plant-associated rhizobacteria for biocontrol and plant growth enhancement. *Frontiers in Plant Science*, 12, 634796. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.634796>
- Khan, R. A. A., Alam, S. S., Jaman, M. S., Li, Y., & Ahmad, M. (2024). Biocontrol of phytopathogens—Recent progress for improvement in efficacy and understanding action mechanism. *Frontiers in Microbiology*, 15, 1407711. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2024.1407711>
- Lekhana, S. M., Anusha, M. B., Hanumantharaju, K. N., Lokesh, A. C., Sreenivasa, M. Y., Rajadurai, M., & Gurikar, C. (2024). Screening and assessment of PGP and biocontrol properties of Azotobacter species isolated from agriculture soils of North Karnataka. *Plant Science Today*, 11(sp4), 1–11. <https://doi.org/10.14719/pst.5705>
- Lengkong, S. C., Siahaan, P., & Tangapo, A. M. (2022). Analisis karakteristik dan uji bioaktivitas bakteri rizosfer PGPR isolat Kalasey. *Jurnal Bios Logos*, 12(2), 104–113. <https://doi.org/10.35799/jbl.v12i2.42131>
- Lyu, D., Backer, R., Berrué, F., Martinez-Farina, C., Hui, J. P. M., & Smith, D. L. (2023). Plant growth-promoting rhizobacteria with microbial growth broth improve biomass and secondary metabolite accumulation of *Cannabis sativa* L. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 71, 7268–7277. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.2c06961>
- Mehmood, N., Saeed, M., Zafarullah, S., Hyder, S., Rizvi, Z. F., Gondal, A. S., Jamil, N., Iqbal, R., Ali, B., Ercisli, S., & Kupe, M. (2023). Multifaceted impacts of plant-beneficial *Pseudomonas* spp. in managing various plant diseases and crop yield improvement. *ACS Omega*, 8, 22296–22315. <https://doi.org/10.1021/acsomega.3c00870>
- Miljaković, D., Marinković, J., & Balešević-Tubić, S. (2020). The significance of *Bacillus* spp. in disease suppression and growth promotion of field and vegetable crops. *Microorganisms*, 8, 1037. <https://doi.org/10.3390/microorganisms8071037>
- Santos, A. M., Soares, A., Luz, J., Cordeiro, C., Silva, M. S., Dias, T., Melo, J., Cruz, C., & Carvalho, L. (2024). Microbial interactions as a sustainable tool for enhancing PGPR antagonism against phytopathogenic fungi. *Sustainability*, 16(5), 2006. <https://doi.org/10.3390/su16052006>
- Sun, W., Chen, B., Tong, Y., Zhao, L., & Wang, X. (2022). Rhizosphere bacteria-mediated biocontrol for sustainable agriculture. *Journal of Applied Microbiology*, 132, 1–16. <https://doi.org/10.1111/jam.15547>
- Wang, H., Liu, R., You, M. P., Barbetti, M. J., & Chen, Y. (2021). Pathogen biocontrol using plant growth-promoting bacteria (PGPR): Role of bacterial diversity. *Microorganisms*, 9, 1988. <https://doi.org/10.3390/microorganisms9091988>