

Strategi Pengembangan Pupuk Organik Cair Berbasis Inokulum Bakteri untuk Pertanian Berkelanjutan di Indonesia

Auliya Safitri^{1*}, Taslim Sjah², Ketut Budastra³

^{1*,2,3}Universitas Mataram, Mataram, Indonesia

**Corresponding Author: :safitriauliya601@gmail.com*

Article History

Received: 23-12-2025

Revised: 20-01-2026

Published: 30-01-2026

ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis strategi pengembangan pupuk organik cair (POC) berbasis inokulum bakteri melalui pendekatan Systematic Literature Review (SLR). Metode yang digunakan adalah SLR dengan protokol PRISMA, menganalisis 16 artikel ilmiah yang diterbitkan antara tahun 2017 dan 2024 dari berbagai database akademik nasional dan internasional. Hasil analisis menunjukkan bahwa strategi pengembangan POC berbasis inokulum bakteri mencakup lima aspek utama: optimalisasi formulasi menggunakan sampah organik sebagai bahan baku, inokulasi Plant Growth-Promoting Rhizobacteria (PGPR), integrasi dengan sistem pertanian berkelanjutan, pengembangan kapasitas petani, dan inovasi teknologi formulasi. Biofertilizer berbasis PGPR telah terbukti mampu mengurangi penggunaan pupuk mineral sebesar 20-40% tanpa mengurangi hasil panen secara signifikan, sekaligus meningkatkan kualitas nutrisi tanaman. Kesimpulan penelitian menunjukkan bahwa pengembangan POC berbasis inokulum bakteri memiliki potensi besar untuk mendukung pertanian berkelanjutan di Indonesia, namun masih menghadapi kendala biologis, teknis, regulasi, lapangan, dan finansial. Disarankan penguatan kolaborasi antara akademisi, industri, dan pemerintah untuk mendorong adopsi biofertilizer yang lebih luas dalam sistem pertanian nasional

Keywords: : Pupuk hayati, pupuk organik cai, pertanian berkelanjutan

PENDAHULUAN

Pertanian merupakan sektor strategis yang menjadi tulang punggung ketahanan pangan dan perekonomian di berbagai negara, termasuk Indonesia. Dalam upaya memenuhi kebutuhan pangan yang terus meningkat seiring dengan pertumbuhan populasi global,

intensifikasi pertanian melalui penggunaan pupuk kimia sintetis telah menjadi praktik umum selama beberapa dekade terakhir. Namun demikian, ketergantungan yang berlebihan terhadap pupuk anorganik menimbulkan berbagai konsekuensi yang merugikan bagi keberlanjutan sistem pertanian dan lingkungan secara global. Aplikasi pupuk anorganik secara kontinu selama 25 tahun telah menyebabkan perubahan signifikan terhadap kelimpahan dan struktur komunitas bakteri penambat nitrogen (diazotrofik) di tanah asam, yang mengindikasikan bahwa penggunaan pupuk kimia jangka panjang dapat mengganggu keseimbangan mikrobiom tanah yang krusial dalam siklus nutrisi alami (Wang et al., 2017).

Dampak negatif dari penggunaan pupuk anorganik tidak hanya terbatas pada degradasi kesuburan tanah, tetapi juga mencakup pencemaran air tanah akibat limpasan nitrat, eutrofikasi badan air, emisi gas rumah kaca, serta penurunan biodiversitas tanah. Kondisi ini telah mendorong komunitas ilmiah internasional dan berbagai organisasi pertanian global untuk mencari alternatif yang lebih ramah lingkungan dan berkelanjutan. Biofertilizer merupakan teknologi ramah lingkungan yang menawarkan solusi untuk daur ulang nutrisi dan keberlanjutan lingkungan, didefinisikan sebagai produk yang mengandung mikroorganisme hidup yang ketika diaplikasikan pada benih, permukaan tanaman, atau tanah akan mengkolonisasi rizosfer atau bagian interior tanaman dan mempromosikan pertumbuhan melalui peningkatan pasokan atau ketersediaan nutrisi primer bagi tanaman inang (Kumar et al., 2022).

Pasar biofertilizer global telah menunjukkan pertumbuhan yang sangat signifikan dalam beberapa tahun terakhir, mencerminkan meningkatnya kesadaran dan permintaan terhadap produk-produk pertanian yang berkelanjutan. Nilai pasar biofertilizer global mencapai USD 2,1 miliar pada tahun 2020 dengan proyeksi mencapai USD 4,5 miliar pada tahun 2026, menunjukkan Compound Annual Growth Rate (CAGR) sebesar 11,9% yang merupakan salah satu tingkat pertumbuhan tertinggi di sektor input pertanian (Aloo et al., 2022). Lebih lanjut, pasar biofertilizer diprediksi akan mencapai USD 5,02 miliar pada tahun 2030, didorong oleh kebijakan pertanian berkelanjutan di berbagai negara dan meningkatnya permintaan konsumen terhadap produk organik (Fadiji et al., 2024).

Di antara berbagai jenis biofertilizer yang tersedia, bakteri pemacu pertumbuhan tanaman atau Plant Growth-Promoting Rhizobacteria (PGPR) telah menjadi fokus utama penelitian dan pengembangan. PGPR memiliki berbagai mekanisme dalam meningkatkan pertumbuhan tanaman, meliputi penambatan nitrogen biologis, pelarutan fosfat, produksi fitohormon (auksin, sitokinin, giberelin), produksi siderofor untuk ketersediaan besi, serta induksi resistensi sistemik terhadap patogen. Hasil analisis pasar menunjukkan bahwa biofertilizer penambat nitrogen (N-fixing) mendominasi pasar dengan pangsa 79%, diikuti oleh biofertilizer pelarut fosfat (P-solubilizing) sebesar 14% (Basu et al., 2021).

Berbagai penelitian empiris telah membuktikan efektivitas PGPR dalam sistem budidaya tanaman. Penelitian eksperimental pada budidaya selada Batavia (*Lactuca sativa* L. var. *crispa*) dalam sistem hidroponik floating culture dengan menggunakan konsorsium PGPR yang terdiri dari *Bacillus subtilis*, *B. megaterium*, dan *Pseudomonas fluorescens* menunjukkan bahwa perlakuan 80% pupuk mineral dikombinasikan dengan PGPR menghasilkan yield yang tidak berbeda nyata dengan perlakuan 100% pupuk mineral (12,3 vs 13,2 kg/m²), sekaligus meningkatkan kualitas nutrisi tanaman meliputi kandungan fenol, flavonoid, dan vitamin C. Temuan ini mengindikasikan bahwa penggunaan pupuk mineral dapat dikurangi 20-40% tanpa mengorbankan hasil panen secara signifikan (Ikiz et al., 2024).

Di Indonesia, pengembangan pupuk organik cair (POC) berbasis inokulum bakteri memiliki relevansi yang sangat tinggi mengingat melimpahnya sumber daya hayati dan limbah organik yang dapat dimanfaatkan sebagai bahan baku. Aplikasi teknologi pembuatan pupuk organik dan pupuk hayati merupakan upaya strategis dalam pemanfaatan limbah pertanian dan peternakan menuju produksi pertanian yang berkelanjutan. Pemanfaatan limbah organik lokal tidak hanya mengurangi biaya input pertanian, tetapi juga memberikan nilai tambah ekonomi sekaligus mengatasi permasalahan pencemaran lingkungan akibat penumpukan limbah (Dewi et al., 2024). Berbagai penelitian lokal telah berhasil mengembangkan formulasi POC dengan memanfaatkan sumber daya yang tersedia di Indonesia, termasuk POC dari limbah buah pepaya dan pisang dengan penambahan bioaktivator EM4 yang menghasilkan kandungan nitrogen 3,21%, fosfor 3,81%, dan kalium 4,24%, yang seluruhnya memenuhi standar baku mutu Permentan No. 261/2019 untuk pupuk organik cair (Ika Hariyanto Putra & Ratnawati, 2019).

Pemanfaatan PGPR dari sumber lokal juga menunjukkan hasil yang menjanjikan dalam konteks pertanian Indonesia. Aplikasi PGPR akar bambu dengan konsentrasi 10 ml/L berpengaruh sangat nyata terhadap pertumbuhan kacang hijau (*Vigna radiata* L. R. Wilczek var. vima-2), meningkatkan tinggi tanaman mencapai 19,91 cm dan luas daun 24,50 cm² (Fajri et al., 2023). Pengembangan media produksi massal pupuk hayati penambat nitrogen *Azotobacter* sp. yang diisolasi dari rizosfer tanaman di berbagai wilayah Indonesia juga telah menunjukkan potensi untuk produksi biofertilizer skala komersial menggunakan sumber daya lokal (Fauziah et al., 2022).

Meskipun potensi pengembangan POC berbasis inokulum bakteri sangat besar, masih terdapat berbagai kendala dan tantangan yang perlu diatasi untuk mendorong adopsi yang lebih luas. Tantangan utama dalam formulasi biofertilizer mikroba meliputi viabilitas mikroba selama proses produksi dan penyimpanan, masa simpan produk yang relatif pendek, variabilitas efisiensi di lapangan, serta biaya produksi yang belum kompetitif dibandingkan pupuk kimia konvensional.

Kendala dalam komersialisasi biofertilizer dapat diklasifikasikan menjadi lima kategori, yaitu kendala biologis (spesifisitas strain, mutasi spontan), kendala teknis (stabilitas produk, standardisasi), kendala regulasi (registrasi produk yang kompleks), kendala lapangan (kompetisi dengan mikroba asli, kondisi tanah yang bervariasi), dan kendala finansial (investasi awal yang tinggi) (Basu et al., 2021; Fadji et al., 2024).

Di tingkat petani sebagai pengguna akhir, faktor sosial-ekonomi juga berperan penting dalam adopsi teknologi biofertilizer. Faktor eksternal seperti ketersediaan modal, sarana prasarana, dan intensitas penyuluhan berpengaruh signifikan terhadap motivasi petani dalam memanfaatkan limbah ternak sebagai pupuk organik, dimana 57,1% petani termotivasi karena alasan ekonomi untuk meningkatkan tabungan dan 61% petani ingin mempererat kerukunan melalui aktivitas bersama dalam pengolahan limbah (Nurmastiti et al., 2023). Analisis pendapatan petani padi organik (Rp29.583.850/ha/MT) yang masih lebih rendah dibandingkan petani non-organik (Rp37.042.500/ha/MT) mengindikasikan perlunya strategi untuk meningkatkan produktivitas dan efisiensi sistem pertanian organik (Rahman Cemda et al., 2024).

Dari uraian di atas, dapat diidentifikasi adanya kesenjangan (gap) penelitian terkait integrasi berbagai aspek pengembangan POC berbasis inokulum bakteri dalam suatu kerangka strategis yang komprehensif. Diperlukan lebih banyak uji lapangan dan analisis biaya-manfaat untuk mendorong komersialisasi biofertilizer cair yang lebih luas (Allouzi et al., 2022).

Berdasarkan masalah penelitian yang telah diuraikan, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis strategi pengembangan pupuk organik cair berbasis inokulum bakteri melalui pendekatan Systematic Literature Review (SLR). Secara spesifik, penelitian ini bertujuan untuk: (1) mengidentifikasi potensi dan manfaat biofertilizer berbasis PGPR dalam mendukung pertanian berkelanjutan; (2) menganalisis strategi formulasi dan optimalisasi produksi POC berbasis inokulum bakteri; (3) mengidentifikasi kendala dan tantangan dalam pengembangan dan adopsi biofertilizer; serta (4) merumuskan rekomendasi strategis bagi pengembangan biofertilizer yang aplikatif untuk mendukung transformasi sistem pertanian nasional yang lebih ramah lingkungan

METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan metode Systematic Literature Review (SLR) (Kitchenham & Charters, 2007), yaitu pendekatan sistematis dalam mengidentifikasi, mengevaluasi, dan menyintesis bukti-bukti ilmiah dari berbagai sumber literatur yang relevan dengan topik penelitian. Metode SLR dipilih karena memungkinkan peneliti untuk mengumpulkan dan menganalisis temuan dari berbagai studi secara komprehensif, terstruktur, dan dapat direplikasi, sehingga dapat menghasilkan kesimpulan yang lebih valid dan dapat digeneralisasi. Pendekatan SLR dalam penelitian ini mengadopsi protokol PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses) yang terdiri dari empat tahapan utama, yaitu identifikasi, penyaringan (screening), kelayakan (eligibility), dan tahap akhir berupa inklusi artikel yang memenuhi kriteria untuk dianalisis lebih lanjut menurut (Page et al., 2021).

Unit analisis dalam penelitian ini terdiri dari 16 artikel ilmiah dengan kata kunci yang terkait dengan pupuk organik cair, biofertilizer, PGPR, dan strategi pengembangan pertanian berkelanjutan. Artikel-artikel tersebut dipublikasikan dalam rentang waktu tahun 2017 hingga 2024, yang mencakup berbagai jenis penelitian meliputi penelitian eksperimental (experimental research), artikel tinjauan (review article), dan studi survei lapangan dari berbagai negara. Pemilihan rentang waktu publikasi mempertimbangkan relevansi dan aktualitas informasi terkait perkembangan terkini dalam bidang biofertilizer dan pertanian berkelanjutan.

Sumber data dalam penelitian ini merupakan data sekunder yang diperoleh dari artikel-artikel ilmiah yang dipublikasikan dalam jurnal nasional dan internasional bereputasi. Jurnal-jurnal internasional yang menjadi sumber data meliputi Heliyon (Elsevier), Frontiers in Plant Science (Frontiers Media), Sustainability (MDPI), Scientific Reports (Nature Publishing Group), Current Research in Microbial Sciences (Elsevier), Soil Biology and Biochemistry (Elsevier), dan Journal of Sustainable Agriculture and Environment (Wiley). Sementara itu, jurnal nasional yang menjadi sumber data meliputi Jurnal Ilmiah Agribisnis, Jurnal Sains dan Teknologi Lingkungan, Jurnal Agrium, Mimbar Agribisnis, Jurnal Budidaya Pertanian, Jurnal MeA (Media Agribisnis), Jurnal Penelitian Peternakan Terpadu, JAI: Jurnal Abdimas Indonesia, dan Agroekotek View.

Tahap pertama adalah identifikasi literatur melalui pencarian pada berbagai database akademik meliputi Google Scholar, Scopus, Web of Science, dan portal jurnal nasional seperti SINTA dan Garuda. Pengumpulan data dilakukan melalui beberapa tahapan sistematis sesuai dengan protokol PRISMA. Kata kunci pencarian yang digunakan meliputi "pupuk organik cair", "biofertilizer", "PGPR", "liquid organic fertilizer", "plant growth-promoting rhizobacteria", "pertanian berkelanjutan", "sustainable agriculture", dan kombinasi dari kata kunci tersebut dengan menggunakan operator Boolean (AND, OR).

Tahap kedua adalah penyaringan (screening) berdasarkan judul dan abstrak untuk mengeliminasi artikel yang tidak relevan. Kriteria inklusi yang ditetapkan meliputi artikel membahas tentang POC, biofertilizer, atau PGPR; artikel diterbitkan dalam rentang tahun 2017-2024; artikel ditulis dalam bahasa Indonesia atau bahasa Inggris; artikel merupakan penelitian primer atau artikel review yang dipublikasikan dalam jurnal ilmiah; dan artikel dapat diakses secara lengkap (full-text). Sementara itu, kriteria eksklusi meliputi artikel berupa prosiding, tesis, disertasi, atau laporan teknis; artikel yang membahas biofertilizer berbasis jamur atau mikroorganisme nonbakteri sebagai fokus utama; dan artikel duplikat.

Analisis data dilakukan secara deskriptif-kualitatif dengan pendekatan analisis tematik (thematic analysis). Data yang telah diekstraksi dari berbagai artikel dikelompokkan berdasarkan tema-tema utama yang muncul, kemudian disintesis untuk menghasilkan pemahaman yang komprehensif tentang strategi pengembangan POC berbasis inokulum bakteri. Sintesis temuan dilakukan dengan membandingkan dan mengintegrasikan hasil dari berbagai studi untuk mengidentifikasi pola, konsistensi, maupun perbedaan antar penelitian.

.HASIL DAN PEMBAHASAN

Karakteristik Artikel yang Dianalisis

Berdasarkan hasil analisis Systematic Literature Review terhadap 16 artikel ilmiah yang dikaji, teridentifikasi beberapa aspek penting terkait strategi pengembangan pupuk organik cair berbasis inokulum bakteri. Temuan-temuan dari berbagai studi menunjukkan konsistensi dalam hal potensi biofertilizer untuk mendukung pertanian berkelanjutan, meskipun terdapat variasi dalam pendekatan metodologi, objek penelitian, dan hasil yang dicapai. Artikel yang dianalisis terdiri dari 7 artikel penelitian eksperimental (43,75%), 5 artikel review (31,25%), dan 4 artikel survei/studi lapangan (25%). Distribusi geografis menunjukkan 9 artikel berasal dari Indonesia dan 7 artikel dari berbagai negara lain, yang memberikan perspektif lokal dan global dalam pembahasan.

Tabel 1. Ringkasan Karakteristik Artikel yang Dianalisis dalam Systematic Literature Review

Nomor	Penulis (Tahun)	Jenis Penelitian	Fokus Kajian	Temuan Utama
1	Rahman Cemda et al. (2024)	Survei	Pendapatan petani padi organik vs nonorganik	Pendapatan petani padi nonorganik lebih tinggi (Rp37,04

				juta/ha/MT) dibanding organik (Rp29,58 juta/ha/ MT)
2	Allouzi et al. (2022)	Review	Biofertilizer cair untuk pertanian berkelanjutan	Biofertilizer cair memiliki shelf life 1,5-2 tahun, tahan suhu hingga 45°C, dapat mengurangi pupuk kimia 15- 40%
3	Aloo et al. (2022)	Review	Biofertilizer PGPR untuk produksi tanaman	Pasar global USD2,1 miliar (2020), proyeksi USD4,5 miliar (2026), CAGR 11,9%
4	Nurmastiti et al. (2023)	Survei	Motivasi petani pemanfaatan limbah ternak	Faktor eksternal(modal, sarana, penyuluhan) berpengaruh signifikan; 57,1% termotivasi ekonomi
5	Ika Hariyanto Putra dan Ratnawati(2019)	Eksperiment al	POC dari limbah buah dengan EM4	POC limbah pisang + EM4 50 mL menghasilkan N 3,21%, P 3,81%, K 4,24% memenuhi standar Permentan
6	Basu et al. (2021)	Review	PGPR sebagai bioinokulan hijau	Pasar N-fixing 79%, Psolubilizing 14%; kendala biologis, teknis, regulasi, lapangan, dan finansial
7	Wang et al. (2017)	Eksperiment al	Dampak pupuk anorganik jangka panjang	Aplikasi pupuk anorganik 25 tahun mengubah kelimpahan dan struktur komunitas diazotrofik di tanah asam
8	Ikiz et al. (2024)	Eksperiment al	PGPR pada selada	80% pupuk mineral

			hidroponik	+ PGPR yield tidak berbeda nyata
9	Kumar et al. (2022)	Review	Biofertilizer untuk daur ulang nutrisi	dengan 100% pupuk mineral (12,3 vs 13,2 kg/m ²)
10	Fadiji et al. (2024)	Review	Tantangan formulasi biofertilizer mikroba	Proyeksi pasar USD5,02 miliar (2030); tantangan utama: viabilitas mikroba, stabilitas formulasi, variabilitas lapangan
11	Fajri et al. (2023)	Eksperiment al	PGPR akar bambu pada kacang hijau	Aplikasi PGPR akar bambu 10 ml/L meningkatkan tinggi tanaman (19,91 cm) dan luas daun (24,50 cm ²)
12	Fauziah et al. (2022)	Eksperiment al	Media produksi massal Azotobacter sp.	Optimalisasi media produksi untuk Azotobacter sp. dari rizosfer Indonesia untuk skala komersial
13	Dewi et al. (2024)	Studi Lapangan	Aplikasi teknologi pupuk organik dan hayati	Pemanfaatan limbah pertanian dan peternakan menuju produksi pertanian berkelanjutan
14	Prabewi et al. (2022)	Eksperiment al	Fermentasi PGPR untuk POC urine sapi	Variasi waktu fermentasi mempengaruhi kandungan nutrisi POC; optimalisasi waktu diperlukan untuk kualitas tinggi
15	Yeyen et al. (2024)	Eksperiment a	POC dari MOL kulit nanas	Pemanfaatan limbah kulit nanas sebagai biofertilizer dengan kualitas nutrisi baik

16	Busyra (2022)	Survei	Dampak jenis pupuk terhadap pendapatan petani	Pentingnya mempertimbangkan dampak jangka panjang pilihan pupuk terhadap pendapatan dan keberlanjutan usaha tani
----	---------------	--------	---	--

Potensi dan Manfaat Biofertilizer Berbasis PGPR

Hasil analisis literatur menunjukkan bahwa biofertilizer berbasis PGPR memiliki potensi yang sangat besar dalam mendukung pertanian berkelanjutan melalui berbagai mekanisme. Dari aspek agronomis, PGPR berperan dalam meningkatkan toleransi tanaman terhadap cekaman abiotik seperti kekeringan dan salinitas melalui produksi eksopolisakarida dan osmoprotektan. PGPR juga berfungsi sebagai agen biokontrol terhadap patogen tanaman melalui produksi antibiotik, kompetisi nutrisi, dan induksi resistensi sistemik pada tanaman inang (Basu et al., 2021). Mekanisme lain yang tidak kalah penting adalah peran PGPR dalam meningkatkan penyerapan nutrisi oleh tanaman. Bakteri penambat nitrogen seperti *Azotobacter*, *Azospirillum*, dan *Rhizobium* mampu mengkonversi nitrogen atmosfer (N_2) menjadi bentuk yang dapat diserap tanaman (NH_4^+). Sementara itu, bakteri pelarut fosfat seperti *Bacillus* dan *Pseudomonas* mengubah fosfat tidak larut menjadi bentuk yang tersedia bagi tanaman melalui produksi asam organik dan fosfatase (Aloo et al., 2022).

Bukti empiris dari berbagai penelitian eksperimental mendukung potensi PGPR dalam meningkatkan produktivitas tanaman. Konsorsium PGPR yang terdiri dari *Bacillus subtilis*, *B. megaterium*, dan *Pseudomonas fluorescens* yang dikombinasikan dengan reduksi pupuk mineral 20% mampu menghasilkan yield yang tidak berbeda nyata dengan perlakuan 100% pupuk mineral. Lebih dari itu, aplikasi PGPR juga meningkatkan kualitas nutrisi tanaman meliputi kandungan fenol total, flavonoid, vitamin C, dan total soluble solids (TSS) (Ikiz et al., 2024). Biofertilizer cair memiliki keunggulan dibandingkan bentuk padat, yaitu masa simpan yang lebih panjang (1,5-2 tahun), kemampuan bertahan pada suhu tinggi hingga 45°C, dan dapat diproduksi dari berbagai limbah industri pertanian dan pengolahan makanan, sehingga lebih praktis untuk diaplikasikan dan didistribusikan ke petani terutama di daerah dengan infrastruktur penyimpanan yang terbatas (Allouzi et al., 2022).

Strategi Formulasi dan Optimalisasi Produksi POC

Pengembangan formulasi POC yang efektif memerlukan pemilihan bahan baku yang tepat, optimalisasi proses fermentasi, dan inokulasi mikroba yang sesuai. Berbagai penelitian di Indonesia telah berhasil mengembangkan formulasi POC dengan memanfaatkan limbah organik lokal yang melimpah. Penelitian pembuatan POC dari limbah buah pepaya dan pisang dengan penambahan bioaktivator EM4 (Effective Microorganisms) menggunakan delapan reaktor dengan variasi jenis limbah buah dan konsentrasi EM4 (40 mL dan 50 mL). Hasil

menunjukkan bahwa campuran limbah pisang dengan EM4 50 mL yang difermentasi secara anaerobik selama 24 hari menghasilkan POC dengan kandungan nutrisi optimal yaitu nitrogen 3,21%, fosfor 3,81%, dan kalium 4,24%, yang seluruhnya memenuhi standar baku mutu Permentan No. 261/2019 untuk parameter N, P, dan K dengan kisaran 2-6% (Ika Hariyanto Putra & Ratnawati, 2019).

Pemanfaatan PGPR dari sumber lokal juga menunjukkan hasil yang menjanjikan. Aplikasi PGPR yang diisolasi dari akar bambu dengan variasi konsentrasi (0 dan 10 ml/L) dikombinasikan dengan pupuk organik cair fosfor (0, 8, 12, 16 ml/L) pada pertumbuhan kacang hijau (*Vigna radiata* L. R. Wilczek var. vima-2) menunjukkan bahwa aplikasi PGPR akar bambu 10 ml/L berpengaruh sangat nyata terhadap tinggi tanaman (19,91 cm) dan berbeda nyata pada luas daun (24,50 cm²). Meskipun jumlah koloni PGPR ($3,6 \times 10^5$ cfu/mL) masih di bawah standar mutu yang dipersyaratkan (1×10^8 cfu/mL), efek positif terhadap pertumbuhan tanaman tetap terdeteksi secara statistik (Fajri et al., 2023). Penelitian lain mengenai pengaruh waktu fermentasi menggunakan fermentator PGPR akar bambu terhadap kualitas POC urine sapi menunjukkan bahwa variasi waktu fermentasi menghasilkan perbedaan kandungan nutrisi pada produk akhir, yang mengindikasikan pentingnya optimalisasi waktu fermentasi untuk memperoleh POC dengan kualitas nutrisi tinggi (Prabewi et al., 2022).

Pengembangan POC dari mikroorganisme lokal (MOL) kulit nanas juga menunjukkan potensi sebagai biofertilizer dengan kualitas nutrisi yang baik. Pemanfaatan limbah kulit nanas yang melimpah di Indonesia tidak hanya memberikan nilai tambah ekonomi, tetapi juga mengurangi permasalahan limbah di industri pengolahan nanas (Yeyen et al., 2024). Optimalisasi media produksi untuk *Azotobacter* sp. yang diisolasi dari rizosfer tanaman di berbagai wilayah Indonesia sangat penting untuk mendukung skalabilitas dan komersialisasi biofertilizer berbasis PGPR di tingkat industri. Ketersediaan strain PGPR lokal yang telah teradaptasi dengan kondisi tanah dan iklim Indonesia memberikan keunggulan kompetitif dibandingkan dengan strain impor yang mungkin kurang efektif dalam kondisi lokal (Fauziah et al., 2022).

Kendala dan Tantangan Pengembangan Biofertilizer

Meskipun potensi biofertilizer berbasis PGPR sangat besar, terdapat berbagai kendala dan tantangan yang perlu diatasi untuk mendorong adopsi yang lebih luas. Viabilitas mikroba selama proses produksi, formulasi, dan penyimpanan menjadi tantangan utama. Mikroba hidup sangat sensitif terhadap kondisi lingkungan seperti suhu, kelembaban, pH, dan paparan oksigen, yang dapat menurunkan populasi sel hidup secara drastis jika tidak dikelola dengan baik. Masa simpan (shelf life) produk biofertilizer yang relatif pendek dibandingkan pupuk kimia konvensional menjadi kendala dalam distribusi dan penyimpanan. Variabilitas efisiensi di lapangan akibat interaksi kompleks antara strain mikroba, tanaman inang, dan kondisi lingkungan (tanah, iklim, praktik budidaya) menyebabkan hasil yang tidak konsisten antar lokasi dan musim tanam (Fadiji et al., 2024).

Kendala dalam komersialisasi biofertilizer dapat diklasifikasikan menjadi lima kategori yang saling terkait. Kendala biologis mencakup spesifisitas strain terhadap tanaman dan kondisi lingkungan tertentu, serta potensi mutasi spontan yang dapat mengubah karakteristik strain selama penyimpanan. Kendala teknis meliputi kesulitan dalam mempertahankan stabilitas produk, standardisasi proses produksi, dan kontrol kualitas yang konsisten. Kendala regulasi berkaitan dengan persyaratan registrasi produk yang kompleks dan berbeda antar negara, yang menghambat perdagangan internasional dan menambah biaya pengembangan produk. Kendala lapangan mencakup kompetisi antara strain PGPR yang diintroduksi dengan mikroba asli tanah (indigenous microbiome), kondisi tanah yang bervariasi (pH, tekstur, kandungan bahan organik), serta praktik budidaya yang tidak mendukung. Kendala finansial meliputi investasi awal yang tinggi untuk riset dan pengembangan, biaya produksi yang belum kompetitif, dan kebutuhan infrastruktur khusus untuk produksi dan penyimpanan (Basu et al., 2021).

Di tingkat petani sebagai pengguna akhir, faktor sosial-ekonomi juga berperan penting dalam adopsi teknologi biofertilizer. Analisis regresi linier berganda menunjukkan bahwa faktor internal seperti umur, pendidikan formal, dan pendidikan non-formal tidak berpengaruh signifikan terhadap motivasi petani, kecuali pengalaman usaha tani yang berpengaruh pada taraf nyata 10% (sig. 0,061). Sebaliknya, faktor eksternal seperti ketersediaan modal, ketersediaan sarana prasarana, dan intensitas penyuluhan berpengaruh sangat signifikan (sig. 0,001) terhadap motivasi petani. Temuan ini mengindikasikan bahwa untuk meningkatkan adopsi biofertilizer di kalangan petani, diperlukan intervensi yang lebih intensif pada aspek-aspek eksternal. Penyediaan akses modal melalui skema kredit atau subsidi, pengembangan sarana prasarana pengolahan limbah di tingkat kelompok tani, dan peningkatan intensitas penyuluhan merupakan langkah-langkah strategis yang perlu dipertimbangkan (Nurmastiti et al., 2023).

Implikasi terhadap Pendapatan dan Keberlanjutan Ekonomi Petani

Aspek ekonomi menjadi pertimbangan krusial dalam adopsi teknologi biofertilizer oleh petani, mengingat keputusan petani sangat dipengaruhi oleh analisis biaya-manfaat jangka pendek. Analisis komparatif pendapatan antara petani padi organik dan non-organik di Kecamatan Perbaungan, Kabupaten Serdang Bedagai menunjukkan bahwa pendapatan petani padi non-organik (Rp37.042.500/ ha/MT) masih lebih tinggi dibandingkan petani padi organik (Rp29.583.850/ha/ MT), dengan selisih Rp7.458.650/ha/MT atau sekitar 25% lebih tinggi. Perbedaan pendapatan ini terutama disebabkan oleh dua faktor utama, yaitu produktivitas padi non-organik (7.170 kg/ha) yang lebih tinggi dibandingkan padi organik (6.000 kg/ ha) dan biaya produksi sistem non-organik yang lebih rendah akibat ketersediaan pupuk kimia yang mudah dan harga yang relatif stabil dengan subsidi pemerintah (Rahman Cemda et al., 2024).

Meskipun demikian, analisis ekonomi jangka pendek ini perlu diimbangi dengan pertimbangan keberlanjutan jangka panjang. Penggunaan pupuk anorganik selama 25 tahun secara signifikan mengubah kelimpahan dan struktur komunitas bakteri penambat nitrogen di

tanah asam. Degradasi mikrobiom tanah ini berimplikasi pada menurunnya kesuburan tanah alami, yang pada gilirannya akan meningkatkan ketergantungan terhadap input eksternal dan menurunkan keberlanjutan sistem pertanian (Wang et al., 2017). Analisis dampak penggunaan berbagai jenis pupuk terhadap pendapatan petani padi sawah juga menekankan pentingnya mempertimbangkan dampak jangka panjang dari pilihan jenis pupuk terhadap pendapatan petani dan keberlanjutan usaha tani (Busyra, 2022). Transisi menuju biofertilizer bukan hanya tentang penggantian input, tetapi juga tentang perubahan paradigma dalam pengelolaan kesuburan tanah yang mempertimbangkan siklus nutrisi, kesehatan mikrobiom tanah, dan jasa ekosistem secara holistik (Kumar et al., 2022).

Tabel 2. Proyeksi Pasar Biofertilizer dan Potensi Reduksi Penggunaan Pupuk Kimia

Parameter	Nilai/Capaian	Sumber
Nilai pasar global biofertilizer (2020)	USD2,1 miliar	Aloo et al. (2022)
Proyeksi pasar global biofertilizer (2026)	USD4,5 miliar	Aloo et al. (2022)
Proyeksi pasar global biofertilizer (2030)	USD5,02 miliar	Fadiji et al. (2024)
Tingkat pertumbuhan pasar (CAGR)	11,9% per tahun	Aloo et al. (2022)
Pangsa pasar biofertilizer N-fixing	79%	Basu et al. (2021)
Pangsa pasar biofertilizer P-solubilizing	14%	Basu et al. (2021)
Potensi reduksi pupuk mineral(sistem hidroponik)	20-40%	Ikiz et al. (2024)
Potensi reduksi pupuk kimia (umum)	15-40%	Allouzi et al. (2022)
Peningkatan hasil panen dengan PGPR	Hingga 25%	Aloo et al. (2022)
Masa simpan biofertilizer cair	1,5-2 tahun	Allouzi et al. (2022)

Rekomendasi Strategis Pengembangan Biofertilizer di Indonesia (Tujuan 4) Berdasarkan sintesis temuan dari 16 artikel yang dianalisis, tujuan keempat penelitian ini adalah merumuskan rekomendasi strategis bagi pengembangan biofertilizer yang aplikatif untuk mendukung transformasi sistem pertanian nasional yang lebih ramah lingkungan. Rekomendasi strategis disusun dengan mempertimbangkan potensi biofertilizer (Tujuan 1), strategi formulasi yang telah terbukti efektif (Tujuan 2), serta kendala dan tantangan yang perlu diatasi (Tujuan 3). Pasar biofertilizer global menunjukkan prospek yang sangat menjanjikan dengan pertumbuhan Compound Annual Growth Rate (CAGR) sebesar 11,9%, dari USD 2,1 miliar (2020) menjadi proyeksi USD 5,02 miliar pada tahun 2030 (Aloo et al.,

2022; Fadji et al., 2024). Prospek ini memberikan peluang besar bagi Indonesia untuk mengembangkan industri biofertilizer berbasis sumber daya lokal.

Rekomendasi Pertama: Penguatan Riset dan Inovasi Formulasi. Berdasarkan temuan kendala teknis berupa viabilitas mikroba dan masa simpan yang terbatas (Fadji et al., 2024; Basu et al., 2021), diperlukan penguatan riset yang fokus pada: (a) pengembangan teknologi enkapsulasi untuk melindungi sel mikroba dari kondisi lingkungan yang tidak menguntungkan; (b) eksplorasi nano-formulasi untuk meningkatkan efektivitas dan stabilitas produk; (c) optimalisasi media carrier yang dapat mempertahankan viabilitas mikroba hingga mencapai standar mutu ($\geq 10^8$ cfu/ mL); dan (d) pengembangan formulasi konsorsium multi-strain yang lebih stabil dan memiliki spektrum aktivitas lebih luas. Penelitian Allouzi et al. (2022) menunjukkan bahwa biofertilizer cair memiliki keunggulan masa simpan 1,5-2 tahun dan toleransi suhu hingga 45°C, yang dapat menjadi acuan pengembangan formulasi di Indonesia.

Rekomendasi Kedua: Pengembangan Strain PGPR Lokal melalui Bioprospecting Sistematis. Temuan dari Fauziah et al. (2022) tentang isolasi *Azotobacter* sp. dari rizosfer Indonesia dan Fajri et al. (2023) tentang PGPR akar bambu menunjukkan potensi besar strain lokal yang telah teradaptasi dengan kondisi agroekologi Indonesia. Rekomendasi meliputi: (a) pelaksanaan bioprospecting sistematis di berbagai ekosistem Indonesia (hutan tropis, lahan gambut, lahan kering) untuk mengidentifikasi strain PGPR unggul; (b) karakterisasi molekuler dan fungsional strain potensial menggunakan teknik genomik dan metabolomik; (c) pengujian efektivitas pada berbagai komoditas strategis (padi, jagung, kedelai, hortikultura); dan (d) pembangunan bank koleksi strain PGPR nasional sebagai sumber daya genetik untuk pengembangan biofertilizer. Ketersediaan strain lokal yang adaptif memberikan keunggulan kompetitif dibandingkan strain impor yang mungkin kurang efektif dalam kondisi lokal.

Rekomendasi Ketiga: Penguatan Kolaborasi Multipihak untuk Hilirisasi dan Komersialisasi. Kendala regulasi dan finansial yang teridentifikasi (Basu et al., 2021) memerlukan pendekatan kolaboratif antara akademisi, industri, dan pemerintah. Langkah strategis meliputi: (a) pembentukan konsorsium riset biofertilizer nasional yang melibatkan perguruan tinggi, lembaga penelitian (BRIN, Balitbangtan), dan industri pupuk; (b) penyederhanaan prosedur registrasi produk biofertilizer tanpa mengorbankan standar keamanan dan mutu; (c) pemberian insentif fiskal (keringanan pajak, subsidi bunga kredit) bagi industri yang mengembangkan biofertilizer; (d) integrasi biofertilizer dalam program subsidi pupuk pemerintah untuk memperluas akses petani; dan (e) pengembangan skema lisensi teknologi dari lembaga penelitian ke industri untuk mempercepat komersialisasi hasil riset. Dewi et al. (2024) menekankan bahwa aplikasi teknologi pembuatan pupuk organik dan hayati merupakan upaya strategis dalam pemanfaatan limbah pertanian dan peternakan.

Rekomendasi Keempat: Pengembangan Kapasitas Petani dan Penguatan Sistem Penyuluhan. Temuan Nurmastiti et al. (2023) menunjukkan bahwa faktor eksternal (ketersediaan modal, sarana prasarana, intensitas penyuluhan) berpengaruh sangat signifikan terhadap motivasi petani mengadopsi pupuk organik. Rekomendasi operasional meliputi: (a)

peningkatan intensitas dan kualitas penyuluhan tentang manfaat dan teknik aplikasi biofertilizer melalui pendekatan demonstrasi plot (demplot) dan sekolah lapang; (b) pengembangan modul pelatihan pembuatan POC berbasis sumber daya lokal yang dapat direplikasi di tingkat kelompok tani; (c) fasilitasi akses permodalan melalui skema Kredit Usaha Rakyat (KUR) pertanian dengan persyaratan yang dipermudah; (d) pembangunan unit pengolahan limbah organik di tingkat gapoktan untuk mendukung produksi biofertilizer skala komunitas; dan (e) pengembangan aplikasi digital untuk pendampingan teknis jarak jauh.

Rekomendasi Kelima: Pengembangan Pasar dan Rantai Nilai Produk Pertanian Berkelanjutan. Temuan Rahman Cemda et al. (2024) menunjukkan kesenjangan pendapatan antara petani organik (Rp29,58 juta/ha/MT) dan nonorganik (Rp37,04 juta/ha/MT) yang perlu diatasi melalui pengembangan pasar. Strategi yang direkomendasikan meliputi: (a) pengembangan sistem sertifikasi produk pertanian yang dibudidayakan dengan biofertilizer (eco-label) untuk diferensiasi pasar; (b) pembangunan branding dan promosi produk pertanian berkelanjutan untuk meningkatkan awareness konsumen; (c) pengembangan kemitraan dengan ritel modern dan platform e-commerce untuk memperluas akses pasar; (d) fasilitasi kontrak farming antara petani pengguna biofertilizer dengan industri pengolahan yang membutuhkan bahan baku berkualitas; dan (e) advokasi kebijakan pengadaan produk pertanian berkelanjutan untuk kebutuhan institusi pemerintah. Pendekatan ini diharapkan dapat memberikan premium harga kepada petani sehingga menutup kesenjangan pendapatan dengan sistem konvensional.

Kelima rekomendasi strategis tersebut bersifat saling terkait dan perlu diimplementasikan secara terintegrasi dalam suatu roadmap pengembangan biofertilizer nasional. Kumar et al. (2022) menegaskan bahwa transisi menuju biofertilizer bukan hanya tentang penggantian input, tetapi juga tentang perubahan paradigma dalam pengelolaan kesuburan tanah yang mempertimbangkan siklus nutrisi, kesehatan mikrobiom tanah, dan jasa ekosistem secara holistik. Dengan implementasi rekomendasi ini secara sistematis, diharapkan adopsi biofertilizer berbasis PGPR dapat meningkat signifikan dan berkontribusi pada transformasi sistem pertanian nasional yang lebih berkelanjutan.

KESIMPULAN DAN SARAN

Berdasarkan hasil analisis Systematic Literature Review terhadap 16 artikel ilmiah yang dipublikasikan antara tahun 2017 hingga 2024, dapat disimpulkan bahwa:

Pertama, terkait potensi dan manfaat biofertilizer berbasis PGPR (Tujuan 1): Biofertilizer berbasis PGPR memiliki potensi signifikan dalam meningkatkan pertumbuhan tanaman, efisiensi penyerapan nutrisi, serta mendukung pengurangan penggunaan pupuk mineral hingga 20-40% tanpa menurunkan hasil panen secara signifikan. PGPR berperan penting dalam memperbaiki kualitas tanah melalui penambahan nitrogen biologis, pelarutan fosfat, dan produksi fitohormon, serta memperkuat keberlanjutan sistem pertanian dengan mengurangi ketergantungan terhadap pupuk kimia sintesis.

Kedua, terkait strategi formulasi dan optimalisasi produksi POC (Tujuan 2): Strategi formulasi dan optimalisasi produksi POC berbasis inokulum bakteri menekankan pemanfaatan limbah organik lokal (limbah buah, urine sapi, kulit nanas), penerapan

bioaktivator (EM4, MOL), serta pemilihan strain PGPR yang adaptif dari sumber lokal Indonesia. Pendekatan ini terbukti mampu menghasilkan POC dengan kandungan nutrisi yang memenuhi standar Permentan No. 261/2019 dan memberikan pengaruh positif terhadap pertumbuhan tanaman.

Ketiga, terkait kendala dan tantangan pengembangan biofertilizer (Tujuan 3): Pengembangan dan adopsi biofertilizer masih menghadapi sejumlah kendala yang dapat diklasifikasikan menjadi kendala biologis (spesifisitas strain, mutasi spontan), kendala teknis (stabilitas formulasi, viabilitas mikroba, masa simpan), kendala regulasi (registrasi produk yang kompleks), kendala lapangan (variasi efektivitas, kompetisi dengan mikroba asli), dan kendala finansial (investasi awal tinggi, biaya produksi belum kompetitif). Faktor sosial-ekonomi seperti ketersediaan modal, sarana produksi, dan intensitas penyuluhan juga menjadi penentu keberhasilan implementasi di tingkat petani.

Keempat, terkait rekomendasi strategis pengembangan biofertilizer (Tujuan 4): Rekomendasi strategis untuk pengembangan biofertilizer di Indonesia meliputi: (a) penguatan riset dan inovasi formulasi melalui teknologi enkapsulasi dan nanoformulasi; (b) pengembangan strain PGPR lokal melalui bioprospecting sistematis; (c) penguatan kolaborasi multipihak (akademisi, industri, pemerintah) untuk hilirisasi hasil penelitian; (d) peningkatan kapasitas petani melalui penyuluhan dan pendampingan teknis; serta (e) pengembangan pasar melalui sertifikasi dan branding produk pertanian organik untuk memberikan premium harga kepada petani

DAFTAR PUSTAKA

- Allouzi, M. M. A., Allouzi, S. M. A., Keng, Z. X., Supramaniam, C. V., & Singh, A. (2022). Liquid biofertilizers as a sustainable solution for agriculture. *Heliyon*, 8(12), e12609. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e12609>
- Aloo, B. N., Tripathi, V., Makumba, B. A., & Mbega, E. R. (2022). Plant growthpromoting rhizobacterial biofertilizers for crop production: The past, present, and future. *Frontiers in Plant Science*, 13, 1002448. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.1002448>
- Basu, A., Prasad, P., Das, S. N., Kalam, S., Sayyed, R. Z., Reddy, M. S., & Enshasy, H. E. (2021). Plant growth promoting rhizobacteria (PGPR) as green bioinoculants: Recent developments, constraints, and prospects. *Sustainability*, 13(3), 1-20. <https://doi.org/10.3390/su13031140>
- Busyra, R. G. (2022). Dampak penggunaan jenis pupuk terhadap pendapatan petani padi sawah di Kabupaten Batanghari. *Jurnal MeA (Media Agribisnis)*, 7(2), 124. <https://doi.org/10.33087/mea.v7i2.137>
- Dewi, M., Kandar, M., & Rahmawati, N. (2024). Aplikasi teknologi pembuatan pupuk organik dan pupuk hayati (biofertilizer) sebagai upaya pemanfaatan limbah dan produksi pertanian yang berkelanjutan. *JAI: Jurnal Abdimas Indonesia*.
- Fadji, A. E., Xiong, C., Egidi, E., & Singh, B. K. (2024). Formulation challenges associated with microbial biofertilizers in sustainable agriculture and paths forward. *Journal of Sustainable Agriculture and Environment*, 3(3). <https://doi.org/10.1002/sae2.70006>

- Fajri, H. N., Suprpto, A., & Jannah, E. N. (2023). Application bamboo root PGPR and concentration of liquid organic fertilizer to growth and yield of (*Vigna radiata* L. R. Wilczek. var. vima-2). *Jurnal Agrium*.
- Fauziah, N. O., Rusdiono, N. N., Simarmata, T., & Fitriatin, B. N. (2022). Media produksi massal pupuk hayati penambat N *Azotobacter* sp. dari rizosfer di Indonesia. *Jurnal Budidaya Pertanian*, 18(1). <https://doi.org/10.30598/jbdp.2022.18.1.13>
- Ika Hariyanto Putra, B. W. R., & Ratnawati, R. (2019). Pembuatan pupuk organik cair dari limbah buah dengan penambahan bioaktivator EM4. *Jurnal Sains dan Teknologi Lingkungan*.
- kiz, B., Dasgan, H. Y., & Gruda, N. S. (2024). Utilizing the power of plant growth promoting rhizobacteria on reducing mineral fertilizer, improved yield, and nutritional quality of Batavia lettuce in a floating culture. *Scientific Reports*, 14(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-024-51818-w>
- Kitchenham, B., & Charters, S. (2007). Guidelines for performing systematic literature reviews in software engineering (EBSE Technical Report EBSE-2007-01). Keele University and Durham University.
- Kumar, S., Diksha, Sindhu, S. S., & Kumar, R. (2022). Biofertilizers: An ecofriendly technology for nutrient recycling and environmental sustainability. *Current Research in Microbial*
- Nurmastiti, A., Setyowati, R., & Nissa, Z. N. A. (2023). Motivasi petani dalam pemanfaatan limbah ternak sebagai pupuk organik di Kabupaten Karanganyar. *JIA (Jurnal Ilmiah Agribisnis)*, 8(3), 259-269. <https://doi.org/10.37149/jia.v8i3.655>
- Page, M. J., McKenzie, J. E., Bossuyt, P. M., Boutron, I., Hoffmann, T. C., Mulrow, C. D., Shamseer, L., Tetzlaff, J. M., Akl, E. A., Brennan, S. E., Chou, R., Glanville, J., Grimshaw, J. M., Hróbjartsson, A., Lalu, M. M., Li, T., Loder, E. W., Mayo-Wilson, E., McDonald, S., ... Moher, D. (2021). The PRISMA 2021 statement: An updated guideline for reporting systematic reviews. *BMJ*, 372, n71. <https://doi.org/10.1136/bmj.n71>
- Prabewi, N., Hartati, P., & Fauzi, M. N. (2022). Perbedaan waktu fermentasi menggunakan fermentator PGPR (Plant Growth Promoting Rhizobakteri) akar bambu untuk pembuatan pupuk organik cair (POC) urine sapi kandungan nutrisi tinggi. *Jurnal Penelitian Peternakan Terpadu*. <http://jurnal.polbangtanyoma.ac.id/index.php/jppt>
- Rahman Cemda, A., Pirngadi, S., & Fadhly Siregar, A. (2024). The income analysis of organic and non-organic rice farmer at Perbaungan Sub-District Serdang Bedagai District. *Mimbar Agribisnis: Jurnal Pemikiran Masyarakat Ilmiah Berwawasan Agribisnis*, 10(2), 1830-1842.

