

Sinergisme Pupuk Hayati Konsorsium sebagai Penggerak Pertumbuhan Vegetatif dan Produksi Sultur pada Stroberi (*Fragaria* × *ananassa* Duch.): *A Systematic Review*

Ranindia Fahma Kumala¹

¹Departemen Ilmu Tanah dan Sumber Daya Lahan, Program Studi Agroteknologi, Fakultas Pertanian,
Universitas Padjadjaran

*email: ranindia22001@mail.unpad.ac.id

Abstract

*Soil degradation driven by intensive chemical fertilization poses a major challenge to modern strawberry (*Fragaria* × *ananassa* Duch.) cultivation, particularly in securing high quality vegetative growth and adequate runner supply for propagation. This review examined the synergistic roles of consortium biofertilizers in addressing both dimensions through a Systematic Literature Review (SLR) guided by the PRISMA framework. Searches across five scientific databases ScienceDirect, Scopus, Web of Science, SpringerLink, and Google Scholar, retrieved 1,996 articles; following rigorous screening, 25 articles published between 2016 and 2026 were retained for final synthesis. The findings demonstrate that PGPR consortia increased plant height by up to 51.9%, leaf number by 97.5%, leaf area by 40.5%, and root fresh weight by 68.6% relative to controls. Runner production improved substantially, ranging from 35.66% to 210.85%, with the highest output reaching 32.7 runners per plant. These gains are mediated through three interconnected pathways: (1) enhanced N, P, and K availability via biological nitrogen fixation and phosphate solubilization; (2) phytohormone production (IAA, gibberellins, and cytokinins) that activates axillary meristems toward runner differentiation; and (3) expanded nutrient absorption facilitated by arbuscular mycorrhizal hyphal networks. Consortium biofertilizers consistently outperform single-microbe inoculants and hold strong promise as an eco-friendly strategy for productive and sustainable strawberry propagation systems.*

Key words : microbial synergism, PGPR, arbuscular mycorrhizal fungi, phytohormone, axillary meristem, rhizosphere

© 2026 Kumala

PENDAHULUAN

Stroberi (*Fragaria* × *ananassa* Duch.) adalah salah satu komoditas hortikultura bernilai ekonomi tinggi yang banyak dikembangkan karena memiliki cita rasa, kandungan nutrisi, dan nilai pasar yang baik. Selain produksi buah, keberhasilan budidaya stroberi juga dipengaruhi oleh kemampuan tanaman menghasilkan pertumbuhan vegetatif dan sultur sebagai bahan perbanyakan. Pembentukan sultur pada stroberi berkaitan erat dengan kondisi fisiologis tanaman, aktivitas hormon, ketersediaan nutrisi, serta faktor

lingkungan. Namun, produktivitas stroberi saat ini masih menghadapi berbagai kendala, seperti penurunan kualitas tanah akibat penggunaan pupuk kimia secara intensif, rendahnya aktivitas mikroorganisme tanah, serta meningkatnya cekaman abiotik seperti kekeringan dan salinitas yang dapat menghambat pertumbuhan vegetatif tanaman (Fitriyani dkk., 2023).

Dalam beberapa tahun terakhir, penggunaan pupuk hayati berbasis konsorsium mikroorganisme mulai dikembangkan sebagai alternatif pertanian berkelanjutan untuk meningkatkan pertumbuhan dan produktivitas

stroberi. Konsorsium mikroorganisme seperti bakteri pelarut fosfat (BPF), bakteri penambat nitrogen (BPN), dan fungi mikoriza arbuskular (FMA) yang bekerja secara sinergis diketahui mampu meningkatkan ketersediaan hara, memperbaiki struktur rizosfer, serta menstimulasi pertumbuhan tanaman melalui produksi fitohormon seperti auksin, sitokinin, dan giberelin (Cassán *et al.*, 2014). Berbeda dari aplikasi mikrob tunggal, pupuk hayati konsorsium memanfaatkan interaksi antarorganisme sehingga menghasilkan efek yang lebih konsisten terhadap fisiologi tanaman (Backer *et al.*, 2018). Selain itu, aplikasi konsorsium *Plant Growth-Promoting Rhizobacteria* (PGPR) pada stroberi terbukti mampu meningkatkan pertumbuhan vegetatif, aktivitas enzim tanah, serta efisiensi serapan unsur hara makro dan mikro (Kumar *et al.*, 2020).

Sejumlah penelitian terdahulu telah membahas peran pupuk hayati pada tanaman hortikultura secara umum, di antaranya mencakup mekanisme PGPR dalam meningkatkan ketahanan tanaman terhadap cekaman (Tripathi *et al.*, 2024), efektivitas biofertilizer tunggal *Azotobacter* pada tanaman hortikultura (Aasfar *et al.*, 2021), serta potensi FMA dalam meningkatkan pertumbuhan tanaman hortikultura (Zhu *et al.*, 2022). Namun demikian, review-review tersebut belum secara spesifik mengkaji peran konsorsium pada tanaman stroberi, khususnya pada pertumbuhan vegetatif dan pembentukan sulur sebagai organ perbanyakan. Sebagian besar studi yang tersedia masih terfokus pada peningkatan produksi buah dan kualitas pascapanen stroberi (Negi *et al.*, 2021). Oleh karena itu, kajian yang secara khusus membahas hubungan antara pupuk hayati konsorsium dengan pertumbuhan vegetatif dan produksi sulur stroberi sangat relevan seiring dengan meningkatnya minat global terhadap sistem pertanian berbasis mikrob tanah yang berkelanjutan (Backer *et al.*, 2018).

Berbeda dengan review-review sebelumnya, artikel ini menawarkan kebaruan

dengan memfokuskan kajian pada pupuk hayati konsorsium sebagai sistem multi mikrob serta menyatukan dua analisis yang selama ini dikaji secara terpisah, yaitu pengaruh konsorsium terhadap pertumbuhan vegetatif dengan respons pembentukan sulur. Oleh karena itu, artikel review ini disusun untuk menjawab pertanyaan (1) Bagaimana pengaruh pupuk hayati konsorsium terhadap pertumbuhan vegetatif stroberi? (2) Bagaimana hubungan pupuk hayati konsorsium dengan pembentukan sulur? Kajian ini diharapkan dapat memberikan pemahaman ilmiah mengenai peran pupuk hayati konsorsium terhadap pertumbuhan vegetatif dan pembentukan sulur stroberi, sekaligus menjadi dasar pengembangan teknologi budidaya stroberi yang lebih berkelanjutan dan ramah lingkungan.

BAHAN DAN METODA

Metode penelitian ini menggunakan *Systematic Literature Review* (SLR) dengan mengacu pada pedoman *Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses* (PRISMA) (Page *et al.*, 2021). Tahapan penelitian dimulai dengan menentukan kata kunci pencarian yang relevan (Tabel 1). Penelusuran literatur dilakukan melalui lima basis data ilmiah, yaitu ScienceDirect, Scopus, Web of Science, SpringerLink, dan Google Scholar dengan rentang publikasi 2016–2026.

Seleksi dilanjutkan melalui tiga tahap, yaitu penyaringan berdasarkan kriteria inklusi-eksklusi (Tabel 2.), penelaahan teks lengkap, dan penilaian kualitas menggunakan adaptasi *Downs and Black Checklist* yang mencakup aspek kejelasan tujuan, kesesuaian desain, ukuran sampel, dan kelengkapan pelaporan data. Hanya artikel berkualitas sedang hingga tinggi (skor $\geq 50\%$) yang diikutsertakan dalam sintesis. Data diekstraksi secara sistematis meliputi penulis, tahun, tujuan, metode, komposisi konsorsium, variabel yang diukur, serta hasil utama, kemudian dianalisis secara deskriptif-naratif. Proses seleksi secara keseluruhan divisualisasikan dalam diagram alur PRISMA pada Gambar 1.

Tabel 1. Kombinasi kata kunci pencarian

Strategi Penelusuran	Sciencedirect	Scopus	Springer	Web of Science	Google Scholar
<i>consortium biofertilizer AND strawberry OR fragaria AND runner production</i>	15	18	4	12	150
<i>biofertilizer consortium AND runner OR stolon AND strawberry</i>	37	34	30	25	105
<i>PGPR AND strawberry OR fragaria x ananassa AND runner formation</i>	59	58	15	46	176
<i>microbial consortium AND strawberry propagation</i>	11	12	3	8	265
<i>biofertilizer OR consortium AND Fragaria × ananassa AND vegetative growth</i>	285	51	8	124	257
<i>strawberry AND daughter plant AND biofertilizer</i>	3	4	2	2	177
Total	1.996				

Tabel 2. Kriteis inklusi dan eksklusi yang diterapkan pada penelitian ini

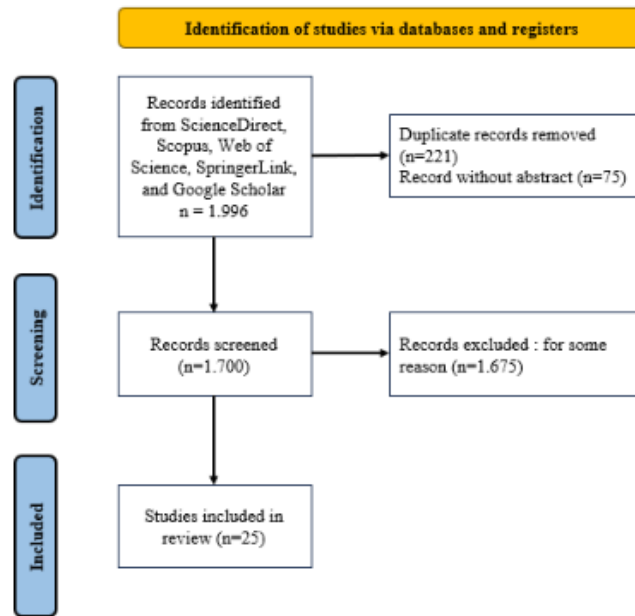
Kriteria	Inklusi	Eksklusi
Relevansi Topik	Artikel yang berfokus pada pupuk hayati konsorsium, PGPR, stroberi, pembentukan sulur, dan produksi tanaman anakan	Artikel yang tidak berfokus pada pupuk hayati konsorsium, PGPR, stroberi, pembentukan sulur, dan produksi tanaman anakan
Tahun Publikais	2016-2026	Sebelum tahun 2016
Jenis Publikasi	Artikel penelitian (<i>research article</i>)	Artikel ulasan (<i>review article</i>), bab buku, ensiklopedia, berita, dan abstrak konferensi
Bahasa Publikasi	Bahasa Inggris	Selain Bahasa Inggris
Akses	Akses terbuka	Tidak tersedia akses terbuka
Basis Data	Sciencedirect, Scopus, Web of Science, Springer, Google Scholar	Basis data lainnya

Gambar 1. memperlihatkan alur seleksi artikel secara lengkap berdasarkan metode PRISMA. Pada tahap identifikasi, penelusuran pada basis data ScienceDirect, Scopus, Web of Science, SpringerLink, dan Google Scholar menghasilkan 1.996 artikel. Dari jumlah tersebut, sebanyak 221 artikel dihapus karena merupakan duplikasi dan 75 artikel dikeluarkan karena tidak memiliki abstrak, sehingga

diperoleh 1.700 artikel yang lolos ke tahap penyaringan (*screening*). Pada tahap penyaringan, artikel disaring berdasarkan kesesuaian judul, abstrak, dan relevansi topik dengan pertanyaan penelitian yang telah ditetapkan. Sebanyak 1.675 artikel dieksklusi karena tidak memenuhi satu atau lebih kriteria inklusi, meliputi ketidaksesuaian topik, jenis publikasi bukan artikel penelitian empiris,

keterbatasan akses teks lengkap, atau tahun publikasi di luar rentang 2016–2026. Setelah melalui seluruh tahapan seleksi tersebut,

diperoleh sebanyak 25 artikel yang memenuhi seluruh kriteria inklusi dan layak diikutsertakan dalam sintesis akhir review ini.



Gambar 1. SLR dengan metode PRISMA; Sumber diolah penulis (2026)

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengaruh Pupuk Hayati Konsorsium terhadap Pertumbuhan Vegetatif Tanaman Stroberi

Hasil sintesis berbagai penelitian sebagaimana terangkum dalam Tabel 3. menunjukkan bahwa aplikasi pupuk hayati konsorsium secara konsisten memberikan pengaruh positif terhadap parameter pertumbuhan vegetatif tanaman stroberi (*Fragaria × ananassa* Duch.). Peningkatan tersebut terjadi pada berbagai kombinasi konsorsium, mulai dari konsorsium berbasis PGPR, kombinasi PGPR dengan pupuk organik, hingga konsorsium multi-mikrob yang melibatkan BPN, BPF, dan FMA secara bersamaan. Pola ini menunjukkan bahwa sinergi antarorganisme dalam konsorsium berperan lebih efektif dalam menstimulasi pertumbuhan vegetatif dibandingkan aplikasi pupuk hayati tunggal (Backer et al., 2018; Tsegaye et al., 2022).

Pada penelitian dengan perlakuan 250 g konsorsium PGPR, melaporkan peningkatan

tinggi tanaman hingga 51,9%, jumlah daun 86,3%, luas daun 12,1%, jumlah *crown* 35%, serta bobot segara akar 68,6% dibandingkan kontrol. Peningkatan yang signifikan pada seluruh parameter tersebut menunjukkan bahwa konsorsium PGPR mampu mengoptimalkan serapan nitrogen dan fosfor melalui fiksasi biologis dan solubilisasi fosfat sehingga akan mendorong pembelahan dan pemanjangan sel secara lebih aktif (Kumar et al., 2020). Sejalan dengan itu, de Andrade et al., (2019) membuktikan bahwa inokulasi tiga bakteri konsorsium, yaitu *Azospirillum brasilense* (Ab-V5), *Burkholderia cepacia* (CCMA 0056), dan *Enterobacter cloacae* (CCMA 1285), meningkatkan panjang tajuk tanaman stroberi cv. Aromas sebesar 35% dibandingkan kontrol tanpa inokulasi. Peningkatan ini dikaitkan dengan kapasitas konsorsium tersebut dalam memproduksi auksin (IAA) yang merangsang elongasi sel dan pembentukan akar lateral sehingga meningkatkan kapasitas serapan air dan hara secara keseluruhan (de Andrade et al., 2019).

Tabel 3. Efek pupuk hayati konsorsium terhadap pertumbuhan vegetatif tanaman stroberi

No	Perlakuan	Hasil	Referensi
1.	250 g konsorsium PGPR	Tinggi tanaman (28,7 cm), jumlah daun (13,23 per tanaman), luas daun (91,9 cm ²), jumlah <i>crown</i> (4,71 per tanaman), bobot segar akar (32,2 g)	Kumar <i>et al.</i> , 2020
2.	50% pupuk kandang + 50% vermikompos + <i>Azotobacter</i> + <i>Pseudomonas</i>	Tinggi tanaman (33,81 cm), jumlah daun (32,6 per tanaman), luas daun (84,64 cm ²),	Negi <i>et al.</i> , 2021
3.	<i>Azospirillum brasilense</i> - Ab-v5 + <i>Burkholderia</i> <i>cepacia</i> - CCMA 0056 + <i>Enterobacter cloacae</i> - CCMA 1285	Tinggi tanaman (23,65 cm ²), panjang akar (34,15 cm)	de Andrade <i>et al.</i> , 2019
4.	PGPR's + <i>Rhizophagus</i> <i>intraradices</i>	Luas daun (239,95 cm ²), biomassa kering (6,24 g), volume akar 92,1 mL)	Serret-López <i>et al.</i> 2016
5.	RDF + <i>Azospirillum</i> @7 kg/ha + BPF @6 kg/ha	Tinggi tanaman (31,20 cm), jumlah daun (41,90 per tanaman)	Bhagat & Panirahi 2020
6.	Panchagavya (3 %) + BPF (50 g/bed) + <i>Azotobacter</i> (50 g/bed)	Tinggi tanaman (17,61 cm), jumlah daun (17,09 per tanaman), luas daun (73,35 cm ²), jumlah <i>crown</i> (4,71 per tanaman)	Sonkar & Tripathi 2025
7.	Vermikompos (50%) + <i>Azotobacter</i> (25%) + FMA (25%)	Tinggi tanaman (23,10 cm), diameter tajuk (24,99 cm), jumlah daun (65,55 per tanaman)	Kumar <i>et al.</i> , 2024

Kombinasi konsorsium antara PGPR dan FMA terbukti memberikan efek yang lebih baik terhadap pertumbuhan vegetatif stroberi. Serret-López *et al.* (2016) melaporkan bahwa tanaman yang diinokulasi dengan PGPR (*Pseudomonas tolaasii*, *Bacillus pumilus*, dan *Paenibacillus* sp.) dikombinasikan dengan *R. intraradices* meningkatkan luas daun 40,5%, biomassa kering tajuk 7,6%, dan volume akar 133,3% dibandingkan perlakuan lainnya. Pembentukan jaringan mikoriza arbuskular oleh *R. intraradices* pada sel korteks akar terbukti memperluas jangkauan serapan fosfat dan air, sementara PGPR yang bersimbiosis di rizosfer menghasilkan fitohormon dan siderofor yang semakin memperkuat respons pertumbuhan tanaman (Serret-López *et al.*, 2016). Hal ini mengonfirmasi bahwa interaksi sinergis antara PGPR dan FMA dalam konsorsium menghasilkan efek aditif atau bahkan sinergis

yang melampaui kemampuan masing-masing mikroba secara individual.

Penambahan bahan organik sebagai komponen dalam konsorsium juga terbukti memperkuat respons pertumbuhan vegetatif stroberi. Negi *et al.* (2021) melaporkan bahwa kombinasi 50% pupuk kandang + 50% vermikompos yang diperkaya dengan *Azotobacter* dan *Pseudomonas* meningkatkan tinggi tanaman 33,3%, jumlah daun 97,5%, dan luas daun 63,9% dibandingkan kontrol. Bahan organik berperan sebagai substrat dan sumber karbon bagi aktivitas mikroorganisme konsorsium, sehingga memperpanjang kelangsungan hidup dan aktivitas metabolisme mikroba di rizosfer. Di samping itu, dekomposisi bahan organik secara bertahap menyediakan unsur hara makro dan mikro dalam bentuk yang mudah diserap tanaman sehingga meningkatkan pertumbuhan vegetatif tanaman (Negi *et al.*,

2021). Hasil serupa juga dilaporkan oleh Kumar *et al.* (2024), di mana kombinasi vermikompos (25%) + *Azotobacter* (25%) + *Arbuscular Mycorrhiza* (25%) menunjukkan peningkatannya tinggi tanaman 39,58% dan jumlah daun 31,35% dibandingkan kontrol, yang mencerminkan kontribusi FMA dalam meningkatkan efisiensi penyerapan fosfat dan air secara signifikan (Kumar *et al.*, 2024).

Kombinasi pupuk rekomendasi dengan konsorsium PGPR juga menunjukkan hasil yang konsisten positif. Bhagat dan Panigrahi (2020) melaporkan bahwa perlakuan RDF + *Azospirillum* (7 kg/ha) + Bakteri Pelarut Fosfat/BPF (6 kg/ha) pada stroberi cv. Nabila meningkatkan tinggi tanaman 34,5% dan jumlah daun 22,1% dibandingkan kontrol pada 120 hari setelah tanam. Penambahan *Azospirillum* berperan dalam merangsang produksi auksin endogen tanaman, yang memacu elongasi internodus dan pembentukan daun baru, sementara BPF meningkatkan kelarutan fosfat tanah untuk sintesis ATP dan asam nukleat dalam proses pembelahan sel (Bhagat & Panigrahi, 2020). Perlakuan Panchagavya (3%) + BPF (50 g/bedengan) + *Azotobacter* (50 g/bedengan) yang dikaji juga menghasilkan peningkatan nyata pada tinggi tanaman sebesar 25,25%, jumlah daun 56,07%, luas daun 12,52%, dan jumlah *crown* 70,65%, yang mempertegas bahwa bahan bioaktif alami dalam Panchagavya turut berperan sebagai biostimulan yang memperkuat kerja konsorsium mikroba dalam menstimulasi pertumbuhan vegetatif (Sonkar & Tripathi, 2025).

Secara keseluruhan, peningkatan parameter pertumbuhan vegetatif tersebut dapat dijelaskan melalui tiga mekanisme utama yang saling melengkapi. *Pertama*, peningkatan ketersediaan unsur hara melalui fiksasi nitrogen biologis dan solubilisasi fosfat oleh bakteri konsorsium meningkatkan nutrisi tanaman yang mendukung sintesis protein, klorofil, dan biomassa. *Kedua*, produksi fitohormon terutama auksin, sitokinin, dan giberelin oleh mikroorganisme konsorsium secara langsung menstimulasi pembelahan dan pemanjangan sel pada meristem apikal dan lateral, yang tercermin dalam peningkatan tinggi tanaman

dan jumlah daun. *Ketiga*, pembentukan jaringan hifa oleh FMA memperluas permukaan serapan akar secara efektif, meningkatkan akuisisi air dan fosfor terutama pada kondisi ketersediaan P yang terbatas (Cassán *et al.*, 2014; Serret-López *et al.*, 2016). Kombinasi ketiga mekanisme ini dalam pupuk hayati konsorsium menghasilkan efek yang lebih kaya dan berkelanjutan dibandingkan aplikasi biofertilizer tunggal.

Pengaruh Pupuk Hayati Konsorsium terhadap Pembentukan Sulur Tanaman Stroberi

Sulur merupakan organ perbanyak vegetatif utama pada stroberi yang pembentukannya dikendalikan oleh faktor fisiologis, hormonal, dan lingkungan. Secara molekuler, inisiasi dan perkembangan sulur melibatkan regulasi giberelin melalui gen *GA20ox4* serta keseimbangan antagonis antara auksin dan sitokinin dalam mengendalikan dormansi dan pertumbuhan meristem aksilar (Guo *et al.*, 2025; Qiu *et al.*, 2019). Ketersediaan nutrisi dan kondisi fisiologis tanaman, termasuk suplai fotosintat, menjadi faktor penting bagi meristem aksilar untuk bertransisi dari fase dorman ke fase aktif membentuk sulur. Oleh karena itu, segala perlakuan yang mampu meningkatkan nutrisi, fotosintesis, dan kesehatan sistem perakaran berpotensi mendorong peningkatan jumlah dan kualitas sulur. Berdasarkan sintesis data empiris pada Tabel 4, seluruh perlakuan pupuk hayati konsorsium yang diujikan terbukti mampu meningkatkan produksi sulur stroberi dibandingkan kontrol, meskipun dengan besaran respons yang bervariasi bergantung pada komposisi konsorsium, dosis, dan kondisi lingkungan tumbuh tanaman.

Produksi sulur paling tinggi ditunjukkan oleh hasil penelitian Kumar *et al.* (2020), di mana aplikasi 250 g konsorsium PGPR yang mengandung *Pseudomonas fluorescens*, *Bacillus subtilis*, *Azotobacter chroococcum*, bakteri pelarut kalium, dan fungi mikoriza menghasilkan rata-rata 32,7 sulur per tanaman atau meningkat sebesar 66% dibandingkan kontrol. PGPR dalam konsorsium tersebut meningkatkan ketersediaan N, P, K,

dan Mg melalui fiksasi nitrogen biologis dan pelarutan fosfat, yang secara langsung mendukung sintesis sitokinin, yang merupakan hormon pembelahan sel dan aktivasi meristem aksilar (Cassán *et al.*, 2014). Di sisi lain, fungi mikoriza memperluas jangkauan serapan hara

melalui jaringan hifa ekstraradikal, sehingga stroberi memiliki cadangan fotosintat yang memadai untuk menginisiasi dan mengembangkan sulur baru (Raturi *et al.*, 2023; Wang *et al.*, 2026).

Tabel 4. Efek pupuk hayati konsorsium terhadap jumlah sulur tanaman stroberi

No	Perlakuan	Hasil	Referensi
1.	250 g konsorsium PGPR	32,7 per tanaman	Kumar <i>et al.</i> , 2020
2.	50% pupuk kandang + 50% vermikompos + <i>Azotobacter</i> + <i>Pseudomonas</i>	8,33 per tanaman	Negi <i>et al.</i> , 2021
3.	PGPR's + <i>Rhizophagus intraradices</i>	5 per tanaman	Serret-López <i>et al.</i> 2016
4.	Panchagavya (3 %) + BPF (50 g/bed) + <i>Azotobacter</i> (50 g/bed)	3,67 per tanaman	Sonkar & Tripathi, 2025
5.	Vermikompos (50%) + <i>Azotobacter</i> (25%) + <i>Arbuscular Mycorrhiza</i> (25%)	7,38 per tanaman	Kumar <i>et al.</i> , 2024

Perlakuan kombinasi 50% pupuk kandang + 50% vermikompos + *Azotobacter* + *Pseudomonas* yang dilaporkan Negi *et al.* (2021) menghasilkan 8,33 sulur per tanaman dengan peningkatan mencapai 94,6% dibandingkan kontrol. Keberhasilan perlakuan ini menunjukkan bahwa integrasi bahan organik dengan konsorsium bakteri menciptakan kondisi rizosfer yang optimal bagi pembentukan sulur. Pupuk kandang dan vermikompos berperan sebagai substrat karbon yang mendukung keberlangsungan aktivitas metabolik mikrob, sementara *Azotobacter* dan *Pseudomonas* berkontribusi melalui produksi fitohormon, terutama *indole-3-acetic acid* (IAA) dan giberelin yang merangsang pertumbuhan akar adventif dan meristem aksilar (Wang & Xu, 2026). Peningkatan giberelin endogen yang distimulasi oleh PGPR berkorelasi dengan pembentukan sulur, dimana giberelin adalah hormon utama yang mengaktifkan ekspresi gen *ZFP6* dan *GA20ox4* dalam menentukan meristem aksilar berkembang menjadi sulur (Guo *et al.*, 2025).

Berbeda dengan dua perlakuan sebelumnya, kombinasi berbagai PGPR + *Rhizophagus intraradices* yang dilaporkan Serret-López *et al.* (2016) menghasilkan rata-rata 5 sulur per tanaman. Meskipun jumlah ini lebih rendah, kombinasi ini tetap signifikan

secara biologis karena *Rhizophagus intraradices* merupakan spesies FMA yang diketahui membentuk simbiosis dengan akar stroberi dan secara tidak langsung meningkatkan kapasitas serapan fosfor melalui jaringan hifa yang dapat memperpanjang jangkauan akar hingga beberapa kali lipat (Huasasquiche *et al.*, 2024). Keterbatasan jumlah sulur pada perlakuan ini kemungkinan dipengaruhi oleh kondisi spesifik lingkungan uji, varietas yang digunakan, dan interaksi antara strain PGPR yang dipilih dengan *R. intraradices* yang belum sepenuhnya teroptimasi. Hal ini mengindikasikan bahwa efektivitas konsorsium PGPR-FMA dalam mendorong pembentukan sulur sangat bergantung pada kompatibilitas antar-strain dan kesesuaian dengan kondisi edafoklimat setempat (Raturi *et al.*, 2023). Temuan Huasasquiche *et al.* (2024) mendukung perspektif ini, di mana inokulasi gabungan *Bacillus subtilis* dan *R. intraradices* pada stroberi var. San Andreas menghasilkan peningkatan signifikan pada tinggi tanaman, luas daun, dan biomassa, yang secara tidak langsung mencerminkan perbaikan kondisi fisiologis yang kondusif bagi inisiasi sulur.

Formulasi pupuk hayati berbasis *bioenhancer* menunjukkan hasil yang signifikan melalui perlakuan Panchagavya (3%) + BPF (50

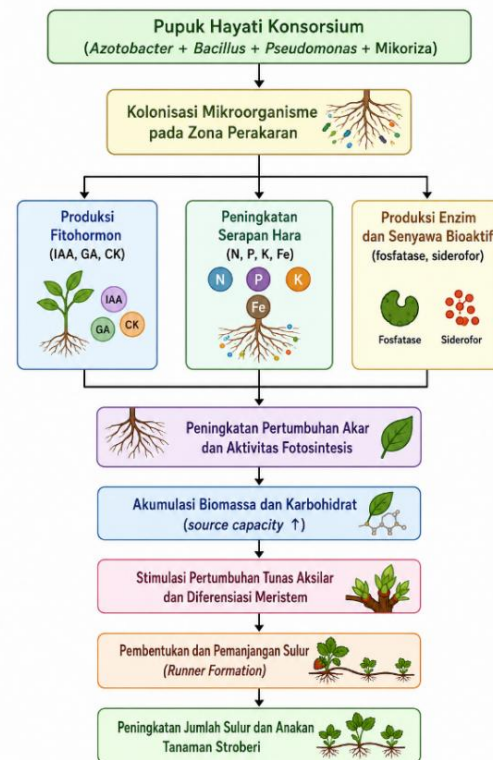
g/bedengan) + *Azotobacter* (50 g/bedengan) yang dilaporkan Sonkar & Tripathi (2025), menghasilkan 3,67 sulur per tanaman dengan persentase peningkatan tertinggi dalam dataset ini, yaitu sebesar 210,85%. Panchagavya, sebagai *bioenhancer* berbasis bahan alami hewani yang mengandung fitohormon, asam amino, vitamin, dan berbagai mikronutrien, berperan sebagai stimulan pertumbuhan yang memperkuat efek PGPR dan BPF (Singh *et al.*, 2018). Tripton dan asam amino dalam Panchagavya diketahui dapat merangsang biosintesis sitokinin endogen tanaman yang mendorong pembelahan sel dan aktivasi meristem (Tripathi *et al.*, 2014). Kombinasi Panchagavya dengan BPF dan *Azotobacter* mengoptimalkan ketersediaan P dan N untuk mendorong inisiasi sulur.

Perlakuan vermikompos (50%) + *Azotobacter* (25%) + Mikoriza Arbuskular (25%) yang dikaji Kumar *et al.* (2024) menghasilkan 7,38 sulur per tanaman dengan peningkatan 35,66% dibandingkan kontrol. Vermikompos tidak hanya menyediakan unsur hara makro dan mikro secara bertahap, tetapi juga meningkatkan kandungan bahan organik tanah yang mendukung pertumbuhan dan viabilitas populasi mikrob konsorsium (Negi *et al.*, 2021). FMA dalam konsorsium ini berperan membentuk jaringan hifa eksternal yang memperluas zona eksplorasi akar dan meningkatkan serapan P secara signifikan. Unsur P adalah unsur hara yang berperan dalam sintesis ATP dan transfer energi yang dibutuhkan meristem aktif untuk membelah dan berkembang menjadi sulur (Raturi *et al.*, 2023). Secara keseluruhan, data dari Tabel 4 menunjukkan bahwa peningkatan produksi sulur stroberi oleh pupuk hayati konsorsium bekerja melalui tiga jalur yang saling berkaitan. Pertama, jalur nutrisi: konsorsium meningkatkan ketersediaan N, P, dan K yang merupakan unsur hara esensial untuk biosintesis hormon pertumbuhan dan komponen struktural sel meristem. Kedua, jalur hormonal: berbagai strain konsorsium, terutama *Azotobacter*, *Pseudomonas*, dan *Bacillus* menghasilkan atau merangsang produksi IAA, sitokinin, dan giberelin yang mengaktifkan meristem aksilar

dan mengarahkan perkembangannya menjadi sulur (Cassán *et al.*, 2014; Qiu *et al.*, 2019; Guo *et al.*, 2025). Ketiga, jalur ekologi rizosfer: konsorsium menciptakan komunitas mikrob yang seimbang di rizosfer, menekan patogen tanah, dan memperbaiki struktur tanah sehingga akar dapat berkembang optimal dan mendukung vigor tanaman (Kumar *et al.*, 2020; Negi *et al.*, 2021).

Mekanisme Kerja Pupuk Hayati Konsorsium dalam Pembentukan Sulur Stroberi

Berbagai mekanisme biologis yang telah diuraikan pada dasarnya merupakan bagian dari satu rangkaian proses yang saling terhubung dan berujung pada peningkatan produksi sulur stroberi. Untuk memberikan gambaran yang lebih utuh dan sistematis mengenai keterkaitan antara aplikasi pupuk hayati konsorsium dengan respons fisiologis tanaman hingga terbentuknya sulur, mekanisme tersebut dirangkum secara visual dalam Gambar 2.



Gambar 2. Mekanisme kerja pupuk hayati konsorsium terhadap pembentukan sulur

Gambar 2. mengilustrasikan rangkaian mekanisme biologis yang menghubungkan aplikasi pupuk hayati konsorsium dengan peningkatan produksi sulur stroberi (*Fragaria x ananassa* Duch.). Tahap awal yang menentukan efektivitas konsorsium adalah keberhasilan kolonisasi mikroorganisme pada zona perakaran (rizosfer). Pada fase ini, masing-masing anggota konsorsium mengkolonisasi permukaan akar dan membentuk biofilm yang memfasilitasi pertukaran sinyal kimiawi antara mikrob dan tanaman, sehingga tanaman mengenali kehadiran mikrob sebagai mitra mutualistik dan bukan sebagai patogen (Backer *et al.*, 2018).

Setelah kolonisasi terjadi, konsorsium bekerja melalui tiga jalur. Jalur pertama adalah produksi fitohormon: *Azotobacter*, *Bacillus*, dan *Pseudomonas* mensintesis IAA, giberelin (GA), dan sitokinin (CK) yang mendorong pembelahan dan elongasi sel, memacu pertumbuhan akar lateral, dan meningkatkan luas permukaan serapan (Cassán *et al.*, 2014; Aasfar *et al.*, 2021). Jalur kedua adalah peningkatan serapan hara: fiksasi nitrogen biologis oleh *Azotobacter* dan pelarutan fosfat oleh *Bacillus* dan *Pseudomonas* meningkatkan ketersediaan N, P, K, dan Fe di rizosfer, sementara hifa ekstraseluler FMA memperluas jangkauan serapan P jauh melampaui zona deplesi akar (Wang *et al.*, 2023). Jalur ketiga adalah produksi enzim dan senyawa bioaktif: fosfatase melarutkan P organik, sedangkan siderofor mengkelat dan mengangkut Fe yang berperan sebagai unsur kofaktor penting dalam berbagai enzim antioksidan dan sintesis klorofil (Biswas *et al.*, 2024).

Ketiga jalur tersebut bermuara pada satu efek fisiologis yang sama, yaitu peningkatan pertumbuhan akar dan aktivitas fotosintesis. Sistem perakaran yang lebih ekstensif meningkatkan kapasitas tanaman menyerap air dan hara, sedangkan peningkatan

kandungan klorofil dan efisiensi fotosintesis yang distimulasi oleh PGPR menghasilkan laju asimilasi karbon yang lebih tinggi (Garcia-Lopez *et al.*, 2024).

Peningkatan laju fotosintesis berdampak pada akumulasi biomassa dan karbohidrat sebagai *source capacity* tanaman. Hal ini mendorong inisiasi dan perkembangan sulur karena pembentukan sulur merupakan proses yang membutuhkan suplai fotosintat dalam jumlah besar untuk mendukung pertumbuhan meristem apikal. Fitohormon yang dihasilkan konsorsium (khususnya giberelin) kemudian mengaktifkan ekspresi gen yang menentukan nasib meristem aksilar untuk berdiferensiasi menjadi sulur, (Guo *et al.*, 2025; Qiu *et al.*, 2019). Sitokinin dari konsorsium turut mematahkan dormansi meristem aksilar sehingga tunas aksilar aktif tumbuh dan memanjang membentuk sulur. Hasil akhir dari rangkaian mekanisme tersebut adalah peningkatan jumlah sulur dan anakan tanaman stroberi yang siap digunakan sebagai bahan perbanyakan vegetatif.

Keterbatasan Penelitian

Dalam menyusun review ini terdapat beberapa keterbatasan, yaitu penelitian yang mengukur produksi sulur sebagai variabel utama, bukan sebagai variabel sekunder dari studi produksi buah masih sangat jarang, sehingga data kuantitatif mengenai mekanisme langsung konsorsium terhadap inisiasi dan pemanjangan sulur belum sepenuhnya tersedia. Selain itu, perbedaan kondisi iklim, varietas, dan sistem budidaya antar penelitian membatasi generalisasi hasil. Kriteria inklusi yang hanya mencakup artikel berbahasa Inggris dan *open access* juga berpotensi menimbulkan bias seleksi.

KESIMPULAN

Pupuk hayati konsorsium terbukti secara konsisten meningkatkan pertumbuhan vegetatif dan produksi sulur stroberi (*Fragaria x ananassa* Duch.) melalui tiga jalur yang saling melengkapi, yaitu peningkatan ketersediaan unsur hara (N, P, K) melalui fiksasi nitrogen dan solubilisasi fosfat oleh mikrob di rizosfer,

produksi fitohormon (IAA, giberelin, sitokinin) yang mengaktifkan meristem aksilar dan mengarahkannya untuk berkembang menjadi sulur, serta pembentukan jaringan hifa mikoriza yang memperluas kapasitas serapan akar. Penggunaan pupuk hayati konsorsium ini menghasilkan efek yang lebih baik dan berkelanjutan dibandingkan pupuk hayati tunggal, dengan peningkatan jumlah sulur berkisar antara 35,66% hingga 210,85% bergantung pada komposisi konsorsium dan kondisi lingkungan tumbuh. Temuan ini menunjukkan bahwa pupuk hayati konsorsium tidak hanya berperan sebagai alternatif pengganti pupuk kimia, tetapi juga mampu mempengaruhi proses fisiologis dan keseimbangan hormonal tanaman stroberi. Pemanfaatannya berpotensi mendukung sistem perbanyakan bibit stroberi yang lebih produktif sekaligus lebih ramah terhadap lingkungan.

DAFTAR PUSTAKA

- Aasfar, A., Bargaz, A., Yaakoubi, K., Hilali, A., Bennis, I., Zeroual, Y., & Meftah Kadmiri, I. (2021). Nitrogen fixing *Azotobacter* species as potential soil biological enhancers for crop nutrition and yield stability. *Frontiers in Microbiology*, 12, 628379. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2021.628379>
- Backer, R., Rokem, J. S., Ilangumaran, G., Lamont, J., Praslickova, D., Ricci, E., Subramanian, S., & Smith, D. L. (2018). Plant growth-promoting rhizobacteria: Context, mechanisms of action, and roadmap to commercialization of biostimulants for sustainable agriculture. *Frontiers in Plant Science*, 9, 1473. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.01473>
- Bhagat, P., & Panigrahi, H. K. (2020). Effect of bio-fertilizers on growth, yield and quality of strawberry (*Fragaria × ananassa* Duch.) cv. Nabila under net tunnel. *The Pharma Innovation Journal*, 9(1), 442–446. <https://www.thepharmajournal.com/archives/2020/vol9issue1/PartH/9-1-38-229.pdf>
- Biswas, A. (2024). Plant growth promoting rhizobacteria (PGPR): Reports on their colonization, beneficial activities, and use as bioinoculant. *Advances in Agriculture*, 2024, 8173024. <https://doi.org/10.1155/2024/8173024>
- Cassán, F., Vanderleyden, J., & Spaepen, S. (2014). Physiological and agronomical aspects of phytohormone production by model plant-growth-promoting rhizobacteria (PGPR) belonging to the genus *Azospirillum*. *Journal of Plant Growth Regulation*, 33(2), 440–459. <https://doi.org/10.1007/s00344-013-9362-4>
- de Andrade, F. M., Pereira, T. A., Souza, T. P., Guimarães, P. H. S., Martins, A. D., Schwan, R. F., Pasqual, M., & Dória, J. (2019). Beneficial effects of inoculation of growth-promoting bacteria in strawberry. *Microbiological Research*, 223–225, 120–128. <https://doi.org/10.1016/j.micres.2019.04.005>
- Dong, C., Wang, G., Du, M., Niu, C., Zhang, P., Zhang, X., & Bao, Z. (2020). Biostimulants promote plant vigor of tomato and strawberry after transplanting. *Scientia Horticulturae*, 267, 109355. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2020.109355>
- Feng, W., Rong, F., & Hu, X. (2016). Identification of candidate soil microbes responsible for small-scale heterogeneity in strawberry plant vigour. *Journal of Integrative Agriculture*, 15(9), 2049–2058.
- Fitriyani, I. H., Hazra, F., & Rosita, D. (2023). Analisis korelasi sifat biologi dan kimia tanah pada berbagai tipe penggunaan lahan di Kabupaten Bogor. *Jurnal Tanah dan Sumberdaya Lahan*, 10(1), 119–123.
- García-López, J. V., Redondo-Gómez, S., Flores-Duarte, N. J., Rodríguez-

- Llorente, I. D., Pajuelo, E., & Mateos-Naranjo, E. (2024). PGPR-based biofertilizer modulates strawberry photosynthetic apparatus tolerance responses by severe drought, soil salinization and short extreme heat event. *Plant Stress*, 12, 100448. <https://doi.org/10.1016/j.stress.2024.100448>
- Guo, L., Li, M., Luo, X., He, T., Ma, N., Tang, S., & Liu, Z. (2026). Integrative regulation of axillary meristem maturation and stolon fate determination in strawberry by light, gibberellin, and ZFP6. *Molecular Plant*, 19(1), 191–207.
- Huwasquiche, L., Alejandro, L., Ccori, T., Cántaro-Segura, H., Samaniego, T., Quispe, K., & Solórzano, R. (2024). *Bacillus subtilis* and *Rhizopagus intraradices* improve vegetative growth, yield, and fruit quality of *Fragaria × ananassa* var. San Andreas. *Microorganisms*, 12(9), 1816. <https://doi.org/10.3390/microorganism12091816>
- Kouam, I. D., Moungang, S., Koulagna, H. I., Ntsoli, G. P., Titti, R. W., & Yaouba, A. (2024). Influence of organic and mineral fertilizers and a foliar biostimulant on the yield and nutritional quality of strawberries (*Fragaria × ananassa* Duch.) under field conditions. *Biochemical Systematics and Ecology*, 117, 104917. <https://doi.org/10.1016/j.bse.2024.104917>
- Kumar, P., Sharma, N., Sharma, S., & Gupta, R. (2020). Rhizosphere stoichiometry, fruit yield, quality attributes and growth response to PGPR transplant amendments in strawberry (*Fragaria × ananassa* Duch.) growing on solarized soils. *Scientia Horticulturae*, 265, 109215. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2020.109215>
- Kumar, D., Baksh, H., & Srivastav, A. (2024). Combined effect of organic manures and biofertilizers on vegetative growth and yield of strawberry (*Fragaria × ananassa* Duch.) cv. Winter Dawn. *International Journal of Advanced Biochemistry Research* 2025. 9(1), 47–51. <https://doi.org/10.33545/26174693.2025.v9.i1Sa.3419>
- Kumar, A., Gautam, D. K., Beer, K., Gupta, A. K., Gupta, A., Singh, A. K., & Singh, V. K. (2024). Impact of biofertilizers, vermicompost and *Trichoderma* on growth and yield in strawberry (*Fragaria × ananassa*) cv. Sweet Charlie. *The Indian Journal of Agricultural Sciences*, 90(10), 2014–2018. <https://doi.org/10.56093/ijas.v90i10.107983>
- Li, Q., Zhang, D., Song, Z., Ren, L., Jin, X., Fang, W., & Cao, A. (2022). Organic fertilizer activates soil beneficial microorganisms to promote strawberry growth and soil health after fumigation. *Environmental Pollution*, 295, 118653. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.118653>
- Mateos-Naranjo, E., García-López, J. V., Flores-Duarte, N. J., Romano-Rodríguez, E., Rodríguez-Llorente, I. D., Pérez-Romero, J. A., Pajuelo, E., & Redondo-Gómez, S. (2025). Development of a PGPR-based biofertilizer to optimize strawberry cultivation in semiarid regions: Screening, validation and scaling up to commercial production. *Scientia Horticulturae*, 340, 113929. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2024.113929>
- Negi, Y. K., Sajwan, P., Uniyal, S., & Mishra, A. C. (2021). Enhancement in yield and nutritive qualities of strawberry fruits by the application of organic manures and biofertilizers. *Scientia Horticulturae*, 283, 110038. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2021.110038>

- Page, M. J., McKenzie, J. E., Bossuyt, P. M., Boutron, I., Hoffmann, T. C., Mulrow, C. D., & Moher, D. (2021). The PRISMA 2020 statement: An updated guideline for reporting systematic reviews. *BMJ*, 372, n71. <https://doi.org/10.1136/bmj.n71>
- Qiu, Y., Guan, S. C., Wen, C., Li, P., Gao, Z., & Chen, X. (2019). Auxin and cytokinin coordinate the dormancy and outgrowth of axillary bud in strawberry runner. *BMC Plant Biology*, 19(1), 528. <https://doi.org/10.1186/s12870-019-2151-x>
- Raturi, P., Rai, R., Sharma, A. K., Singh, A. K., Dimri, D. C., & Bains, G. (2023). Effects of plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR) and arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) on morpho-physiological parameters of strawberry cv. Chandler under different moisture levels. *International Journal of Environment and Climate Change*, 13(9), 2707–2713. <https://doi.org/10.9734/ijecc/2023/v13i92502>
- Serret-López, M., Espinosa-Victoria, D., Gómez-Rodríguez, O., & Delgadillo-Martínez, J. (2016). Tolerance of strawberry (*Fragaria* × *ananassa* Duch.) plants pre-mycorrhized with *Rhizophagus intraradices* and inoculated with PGPRs to *Phytophthora capsici*. *Revista Mexicana de Fitopatología*, 34(3), 296–317.
- Sonkar, S., & Tripathi, V. K. (2025). Efficacy of organic nutrient sources, PGPR and biostimulant on vegetative growth, flowering, yield and quality of strawberry cv. Chandler. *International Journal of Applied Biology and Pharmaceutical Technology*, 16(1), 47–54.
- Tripathi, A., Pandey, V. K., Jain, D., Singh, G., Brar, N. S., Taufeeq, A., Pandey, I., Dash, K. K., Samrot, A. V., & Rustagi, S. (2024). An updated review on significance of PGPR-induced plant signalling and stress management in advancing sustainable agriculture. *Journal of Agriculture and Food Research*, 16, 101169. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2024.101169>
- Tsegaye, Z., Alemu, T., Desta, F. A., & Assefa, F. (2022). Plant growth-promoting rhizobacterial inoculation to improve growth, yield, and grain nutrient uptake of teff varieties. *Frontiers in Microbiology*, 13, 896770. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.896770>
- Wang, M. & Xu, Z. (2026). PGPR-mediated enhancement of soil nutrients, rhizosphere microbial ecology, and plant growth: A review. *npj Biofilms and Microbiomes*, 12, 95.
- Wang, P., Wu, S. H., Wen, M. X., Wang, Y., & Wu, Q. S. (2023). Arbuscular mycorrhizal fungi enhance plant phosphorus uptake through stimulating hyphosphere soil microbiome functional profiles for phosphorus turnover. *New Phytologist*, 238(6), 2578–2593. <https://doi.org/10.1111/nph.18772>
- Zhu, B., Gao, T., Zhang, D., Ding, K., Li, C., & Ma, F. (2022). Functions of arbuscular mycorrhizal fungi in horticultural crops. *Scientia Horticulturae*, 303, 111219. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2022.111219>