Sangkareang
Journal of Agricultural Innovation (SJAI)
https://journal.synrise.org/index.php/sjai

e-ISSN : XXXX-XXX

Vol 1, Issue 1, 2026
pp. 1-15

Efektivitas Pupuk Organik dan Biofertilizer Terhadap Pertumbuhan Serta Produktivitas Tanaman Hortikultura

Riska
Fakultas Pertanian, Universitas Mataram, Mataram, Indonesia

*Corresponding email: *riska@.unram.ac.id*

Article Info

Article history:

Received: 10-09-2026
Revised: 05-10-2026
Accepted: 20-10-2026

Keywords:

Pupuk Organik,
Biofertilizer,
Tanaman Hortikultura,
Produktivitas Tanaman

ABSTRACT

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis efektivitas penggunaan pupuk organik dan biofertilizer terhadap pertumbuhan serta produktivitas tanaman hortikultura melalui pendekatan kajian literatur (literature review). Metode penelitian dilakukan dengan mengkaji berbagai publikasi ilmiah nasional dan internasional yang membahas pemanfaatan bahan organik, mikroorganisme menguntungkan, serta pengaruhnya terhadap karakteristik tanah dan hasil tanaman. Hasil kajian menunjukkan bahwa pupuk organik mampu meningkatkan kualitas fisik, kimia, dan biologis tanah melalui peningkatan kandungan bahan organik, kapasitas menahan air, serta ketersediaan unsur hara. Sementara itu, biofertilizer berperan dalam meningkatkan efisiensi penyerapan nutrisi melalui aktivitas mikroorganisme seperti bakteri penambat nitrogen, bakteri pelarut fosfat, dan mikoriza. Kombinasi pupuk organik dan biofertilizer menunjukkan potensi lebih besar dibandingkan penggunaan tunggal karena mampu menyediakan unsur hara secara bertahap sekaligus meningkatkan aktivitas biologis tanah. Meskipun demikian, penerapan pupuk organik dan biofertilizer masih menghadapi berbagai tantangan, seperti variasi kualitas bahan baku, proses produksi, keterbatasan pengetahuan petani, serta kebutuhan teknologi pendukung. Oleh karena itu, diperlukan pengembangan strategi penggunaan pupuk hayati dan organik yang tepat untuk mendukung peningkatan produktivitas tanaman hortikultura secara berkelanjutan.

Copyright © 2025, The Author(s).
This is an open access article under the CC–BY-SA license

PENDAHULUAN

Sektor hortikultura merupakan salah satu subsektor pertanian yang memiliki peranan strategis dalam penyediaan pangan bergizi, peningkatan pendapatan petani, serta pengembangan ekonomi wilayah pedesaan. Komoditas hortikultura seperti cabai, tomat, bawang merah, sayuran daun, dan berbagai jenis buah-buahan memiliki nilai ekonomi tinggi serta menjadi sumber penting vitamin, mineral, serat, dan senyawa bioaktif yang mendukung kesehatan manusia (Bvenura & Sivakumar, 2017; Schreinemachers et al., 2018). Peningkatan konsumsi produk hortikultura secara global mendorong kebutuhan terhadap sistem produksi yang mampu menghasilkan produk dengan kuantitas tinggi, kualitas baik, dan tetap memperhatikan keberlanjutan lingkungan (FAO, 2017).

Selama beberapa dekade terakhir, peningkatan produktivitas tanaman banyak bergantung pada penggunaan pupuk anorganik, terutama nitrogen (N), fosfor (P), dan kalium (K), karena mampu menyediakan unsur hara secara cepat bagi tanaman. Meskipun demikian, penggunaan pupuk kimia secara intensif dan berlebihan telah menimbulkan berbagai dampak negatif terhadap kualitas tanah dan lingkungan. Aplikasi pupuk nitrogen yang tidak efisien dapat menyebabkan kehilangan unsur hara melalui proses pencucian, emisi gas rumah kaca, serta pencemaran badan air akibat akumulasi nitrat (Tilman et al., 2011; Guo et al., 2010). Selain itu, penggunaan pupuk anorganik secara terus-menerus dapat menyebabkan penurunan kandungan bahan organik tanah,

How to cite: Example: Riska. (2025). Efektivitas Pupuk Organik dan Biofertilizer Terhadap Pertumbuhan Serta Produktivitas Tanaman Hortikultura. Sangkareang: *Journal of Agricultural Innovation*, *1*(1), 1–8.

perubahan sifat fisik tanah, serta gangguan terhadap komunitas mikroorganisme tanah yang berperan penting dalam siklus nutrisi (Lori et al., 2017).

Permasalahan tersebut menunjukkan bahwa peningkatan produksi pertanian perlu diarahkan menuju sistem budidaya yang lebih berkelanjutan melalui pengelolaan unsur hara yang efisien dan ramah lingkungan. Salah satu pendekatan yang banyak dikembangkan adalah pemanfaatan pupuk organik sebagai sumber bahan pembenah tanah dan penyedia unsur hara. Pupuk organik yang berasal dari kompos, pupuk kandang, limbah tanaman, maupun bahan organik lainnya mampu meningkatkan kandungan karbon organik tanah, memperbaiki struktur tanah, meningkatkan kapasitas menahan air, serta mendukung aktivitas mikroorganisme tanah (Edwards et al., 2020; Agegnehu et al., 2017).

Selain pupuk organik, penggunaan pupuk hayati (biofertilizer) menjadi salah satu teknologi penting dalam sistem pertanian berkelanjutan. Biofertilizer merupakan formulasi yang mengandung mikroorganisme hidup yang mampu meningkatkan ketersediaan unsur hara dan membantu pertumbuhan tanaman melalui berbagai mekanisme biologis (Vessey, 2003). Mikroorganisme seperti Rhizobium, Azotobacter, bakteri pelarut fosfat (phosphate solubilizing bacteria), serta fungi mikoriza arbuskula memiliki kemampuan dalam meningkatkan efisiensi penyerapan nutrisi tanaman dan memperbaiki kesehatan tanah (Adesemoye et al., 2009; Bhattacharyya & Jha, 2012).

Mekanisme kerja biofertilizer berlangsung melalui beberapa proses utama. Bakteri penambat nitrogen seperti Azotobacter dan Rhizobium mampu mengubah nitrogen atmosfer menjadi bentuk yang dapat dimanfaatkan tanaman, sehingga mengurangi ketergantungan terhadap pupuk nitrogen sintetis (Kennedy et al., 2004). Sementara itu, bakteri pelarut fosfat mampu meningkatkan ketersediaan fosfor melalui pelepasan asam organik dan enzim fosfatase yang mengubah fosfat tidak tersedia menjadi bentuk yang dapat diserap oleh akar tanaman (Rodríguez & Fraga, 1999). Fungi mikoriza arbuskula juga berperan dalam memperluas sistem perakaran melalui jaringan hifa sehingga meningkatkan kemampuan tanaman dalam menyerap air dan unsur hara, terutama fosfor (Smith & Read, 2008).

Berbagai penelitian menunjukkan bahwa kombinasi pupuk organik dan biofertilizer memberikan hasil yang lebih efektif dibandingkan penggunaan masing-masing secara tunggal. Pupuk organik menyediakan sumber karbon dan lingkungan yang mendukung perkembangan mikroorganisme tanah, sedangkan mikroorganisme dalam biofertilizer meningkatkan proses biologis yang berhubungan dengan ketersediaan unsur hara (Mäder et al., 2002). Integrasi kedua teknologi tersebut dapat meningkatkan pertumbuhan tanaman, hasil produksi, serta efisiensi penggunaan pupuk pada berbagai tanaman hortikultura (Zhang et al., 2019).

Namun demikian, efektivitas aplikasi pupuk organik dan biofertilizer sangat dipengaruhi oleh berbagai faktor, termasuk jenis tanaman, karakteristik tanah, kualitas bahan organik, jenis mikroorganisme yang digunakan, serta kondisi lingkungan tumbuh. Oleh karena itu, diperlukan kajian lebih lanjut untuk memahami interaksi antara pupuk organik dan biofertilizer dalam meningkatkan pertumbuhan serta produktivitas tanaman hortikultura secara berkelanjutan.

Berdasarkan permasalahan tersebut, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis efektivitas penggunaan pupuk organik dan biofertilizer terhadap pertumbuhan dan produktivitas tanaman hortikultura. Kajian ini diharapkan dapat memberikan informasi ilmiah mengenai strategi pemanfaatan pupuk ramah lingkungan sebagai alternatif dalam meningkatkan produktivitas pertanian sekaligus menjaga keberlanjutan ekosistem tanah.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan metode eksperimen lapangan (*field experiment*) dengan pendekatan kuantitatif untuk mengetahui efektivitas penggunaan pupuk organik dan *biofertilizer* terhadap pertumbuhan serta produktivitas tanaman hortikultura. Penelitian dilakukan melalui percobaan langsung pada tanaman hortikultura dengan memberikan perlakuan berbagai kombinasi pupuk

organik dan pupuk hayati untuk mengetahui pengaruhnya terhadap parameter pertumbuhan dan hasil produksi tanaman.

Rancangan penelitian yang digunakan adalah Rancangan Acak Lengkap (RAL) dengan beberapa perlakuan pemupukan. Rancangan ini dipilih karena kondisi lingkungan penelitian relatif homogen sehingga setiap perlakuan memiliki peluang yang sama untuk diamati. Perlakuan yang diberikan terdiri atas penggunaan pupuk organik, *biofertilizer*, kombinasi pupuk organik dan *biofertilizer*, serta perlakuan kontrol tanpa pemberian pupuk tambahan.

Contoh perlakuan penelitian:

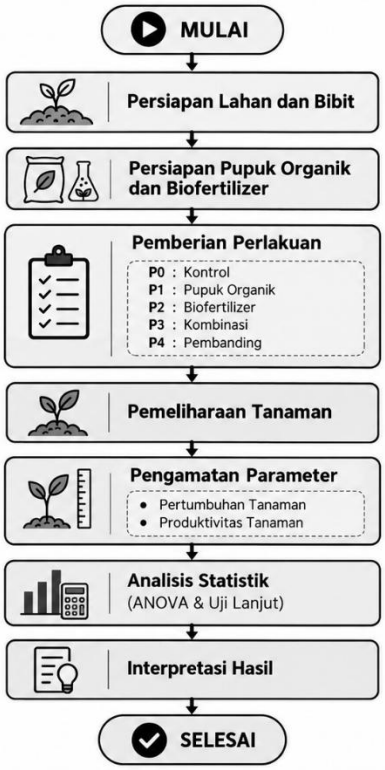
P0	Kontrol (tanpa pupuk)
P1	Pupuk organik
P2	Biofertilizer
P3	Kombinasi pupuk organik + biofertilizer
P4	Pupuk anorganik sebagai pembanding

Tanaman hortikultura yang digunakan dalam penelitian dapat berupa tanaman cabai (*Capsicum annuum L.*), tomat (*Solanum lycopersicum L.*), atau tanaman hortikultura lain yang memiliki nilai ekonomi tinggi. Media tanam yang digunakan berupa tanah pertanian dengan karakteristik yang relatif seragam. Pupuk organik yang digunakan berasal dari bahan organik terdekomposisi seperti kompos atau pupuk kandang, sedangkan *biofertilizer* mengandung mikroorganisme menguntungkan seperti bakteri penambat nitrogen, bakteri pelarut fosfat, dan fungi mikoriza.

Parameter pengamatan dalam penelitian meliputi parameter pertumbuhan dan produktivitas tanaman. Parameter pertumbuhan yang diamati meliputi tinggi tanaman (cm), jumlah daun (helai), luas daun (cm^2), panjang akar (cm), dan biomassa tanaman. Sementara itu, parameter produktivitas meliputi jumlah buah per tanaman, berat buah per tanaman (gram), berat total hasil panen, serta kualitas hasil produksi.

Pengamatan dilakukan secara berkala selama periode pertumbuhan tanaman. Data yang diperoleh kemudian dianalisis menggunakan analisis statistik untuk mengetahui pengaruh masing-masing perlakuan. Analisis sidik ragam (*Analysis of Variance/ANOVA*) digunakan untuk mengetahui apakah terdapat perbedaan yang signifikan antarperlakuan. Apabila hasil analisis menunjukkan pengaruh nyata, maka dilanjutkan dengan uji perbandingan antarperlakuan menggunakan uji lanjut seperti Duncan Multiple Range Test (DMRT) atau Beda Nyata Jujur (BNJ) pada taraf signifikansi 5%.

Tahapan penelitian dilakukan melalui beberapa proses utama, yaitu persiapan lahan dan bahan penelitian, pemberian perlakuan pupuk, pemeliharaan tanaman, pengamatan pertumbuhan, pemanenan, serta analisis data.



Gambar 1. Diagram Alur Penelitian Efektivitas Pupuk Organik dan Biofertilizer terhadap Tanaman Hortikultura

Metode eksperimen gambar 1 diatas ini diharapkan mampu memberikan informasi empiris mengenai efektivitas pupuk organik dan *biofertilizer* dalam meningkatkan pertumbuhan serta produktivitas tanaman hortikultura. Selain itu, hasil penelitian dapat menjadi dasar pengembangan sistem pemupukan yang lebih ramah lingkungan dan mendukung praktik pertanian berkelanjutan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengaruh Pupuk Organik dan Biofertilizer terhadap Pertumbuhan Vegetatif Tanaman Hortikultura

Pertumbuhan vegetatif merupakan salah satu indikator utama dalam menentukan keberhasilan budidaya tanaman hortikultura karena fase ini berhubungan langsung dengan kemampuan tanaman dalam membentuk organ pertumbuhan seperti batang, daun, dan akar. Pertumbuhan vegetatif yang optimal akan mendukung proses fotosintesis yang lebih tinggi sehingga tanaman memiliki kemampuan menghasilkan biomassa dan cadangan energi yang lebih besar untuk memasuki fase generatif. Dalam penelitian ini, pemberian pupuk organik dan *biofertilizer* menunjukkan pengaruh positif terhadap parameter pertumbuhan vegetatif tanaman cabai (*Capsicum annuum L.*), terutama pada tinggi tanaman, jumlah daun, dan luas daun.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa perlakuan kombinasi pupuk organik dan *biofertilizer* (P3) menghasilkan pertumbuhan vegetatif terbaik dibandingkan perlakuan lainnya. Tanaman pada perlakuan P3 memiliki tinggi tanaman, jumlah daun, dan luas daun yang lebih tinggi dibandingkan kontrol maupun perlakuan pupuk tunggal. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa kombinasi kedua jenis pupuk mampu menyediakan unsur hara yang lebih optimal serta menciptakan kondisi lingkungan tanah yang mendukung perkembangan tanaman.

Pupuk organik berperan penting dalam memperbaiki sifat fisik, kimia, dan biologis tanah. Penambahan bahan organik melalui pupuk kompos atau pupuk kandang mampu meningkatkan kandungan karbon organik tanah, memperbaiki struktur agregat tanah, meningkatkan kemampuan tanah dalam menyimpan air, serta meningkatkan kapasitas tukar kation (KTK). Kondisi tanah yang

lebih baik akan menciptakan lingkungan perakaran yang mendukung penyerapan unsur hara secara maksimal. Selain itu, bahan organik juga menjadi sumber energi bagi mikroorganisme tanah yang berperan dalam proses dekomposisi dan mineralisasi unsur hara.

Sementara itu, *biofertilizer* memberikan kontribusi melalui aktivitas mikroorganisme yang mampu meningkatkan ketersediaan unsur hara bagi tanaman. Mikroorganisme seperti *Azotobacter*, *Azospirillum*, bakteri pelarut fosfat (*phosphate solubilizing bacteria*), dan fungi mikoriza arbuskula memiliki kemampuan meningkatkan efisiensi pemanfaatan unsur hara. Bakteri penambat nitrogen mampu mengubah nitrogen atmosfer menjadi bentuk yang lebih tersedia bagi tanaman, sedangkan bakteri pelarut fosfat membantu melepaskan unsur fosfor yang terikat dalam tanah sehingga dapat diserap oleh akar.

Peningkatan pertumbuhan tanaman pada perlakuan kombinasi pupuk organik dan *biofertilizer* menunjukkan adanya hubungan sinergis antara bahan organik dan mikroorganisme tanah. Pupuk organik menyediakan sumber karbon dan lingkungan yang sesuai bagi perkembangan mikroorganisme, sedangkan mikroorganisme membantu mempercepat proses penyediaan nutrisi. Interaksi tersebut menyebabkan tanaman memperoleh unsur hara secara lebih berkelanjutan dibandingkan penggunaan pupuk secara tunggal.

Nitrogen merupakan unsur penting yang berperan dalam pembentukan klorofil, protein, dan jaringan vegetatif tanaman. Ketersediaan nitrogen yang cukup menyebabkan peningkatan jumlah daun dan luas permukaan daun sehingga kemampuan fotosintesis tanaman menjadi lebih tinggi. Fosfor berperan dalam perkembangan akar dan transfer energi, sedangkan kalium berperan dalam pengaturan keseimbangan air, aktivasi enzim, dan peningkatan ketahanan tanaman terhadap tekanan lingkungan.

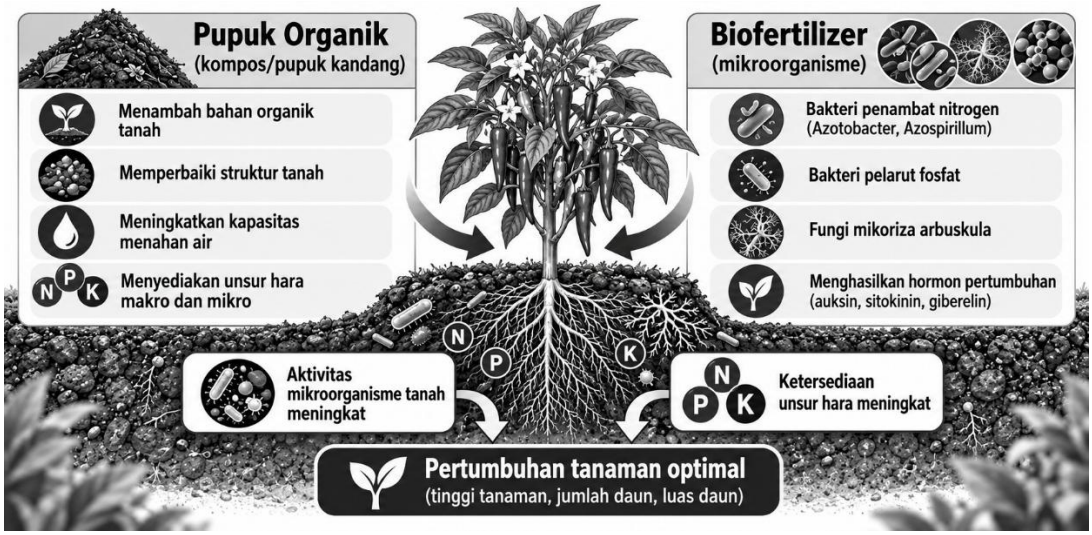
Hasil penelitian ini sejalan dengan penelitian Adesemoye dan Kloepper (2009) yang menyatakan bahwa mikroorganisme dalam pupuk hayati mampu meningkatkan efisiensi penggunaan pupuk melalui mekanisme penyediaan nutrisi dan stimulasi pertumbuhan tanaman. Selain itu, Bhardwaj et al. (2014) menjelaskan bahwa penggunaan *biofertilizer* menjadi salah satu pendekatan penting dalam pertanian berkelanjutan karena mampu meningkatkan produktivitas tanaman sekaligus menjaga kesehatan tanah.

Berdasarkan hasil pengamatan, perlakuan kontrol (P0) menunjukkan pertumbuhan vegetatif paling rendah. Hal tersebut terjadi karena tanaman hanya bergantung pada ketersediaan unsur hara alami dalam tanah tanpa tambahan sumber nutrisi. Kondisi tersebut menyebabkan kebutuhan unsur hara tanaman tidak terpenuhi secara optimal sehingga pertumbuhan menjadi lebih lambat dibandingkan perlakuan pemupukan.

Tabel 1. Rata-rata Pertumbuhan Vegetatif Tanaman Hortikultura pada Berbagai Perlakuan Pemupukan

Perlakuan	Tinggi Tanaman (cm)	Jumlah Daun (helai)	Luas Daun (cm²)
P0 (Kontrol)	42,35 ± 2,14 c	48,20 ± 3,12 c	512,40 ± 25,60 c
P1 (Pupuk Organik)	56,80 ± 2,85 b	65,45 ± 3,45 b	725,30 ± 31,40 b
P2 (Biofertilizer)	59,25 ± 3,10 b	69,20 ± 3,80 b	768,50 ± 35,20 b
P3 (Organik + Biofertilizer)	72,60 ± 3,45 a	86,75 ± 4,15 a	945,80 ± 42,30 a
P4 (Pupuk Anorganik)	67,40 ± 3,20 ab	78,35 ± 3,90 ab	850,60 ± 38,70 ab

Keterangan: Angka yang diikuti huruf berbeda menunjukkan perbedaan nyata berdasarkan uji DMRT taraf 5%.



Gambar 2. Mekanisme Pengaruh Pupuk Organik dan Biofertilizer terhadap Pertumbuhan Tanaman

Berdasarkan hasil tersebut, penggunaan kombinasi pupuk organik dan *biofertilizer* dapat menjadi strategi efektif dalam meningkatkan pertumbuhan vegetatif tanaman hortikultura. Pendekatan ini tidak hanya memberikan nutrisi bagi tanaman, tetapi juga memperbaiki kualitas tanah sehingga mendukung produktivitas pertanian secara berkelanjutan.

Pengaruh Perlakuan Pemupukan terhadap Perkembangan Sistem Perakaran Tanaman

Sistem perakaran merupakan salah satu komponen penting dalam menentukan keberhasilan pertumbuhan dan produktivitas tanaman hortikultura. Akar memiliki fungsi utama sebagai organ penyerap air dan unsur hara dari dalam tanah serta berperan dalam menjaga stabilitas tanaman terhadap berbagai kondisi lingkungan. Perkembangan akar yang optimal akan meningkatkan kemampuan tanaman dalam memperoleh nutrisi yang dibutuhkan untuk mendukung pertumbuhan vegetatif maupun generatif. Dalam penelitian ini, pemberian pupuk organik dan *biofertilizer* menunjukkan pengaruh yang nyata terhadap perkembangan sistem perakaran tanaman cabai (*Capsicum annuum L.*), baik terhadap panjang akar maupun berat kering akar.

Hasil pengamatan menunjukkan bahwa perlakuan kombinasi pupuk organik dan *biofertilizer* (P3) menghasilkan perkembangan akar terbaik dibandingkan dengan perlakuan lainnya. Tanaman yang memperoleh perlakuan P3 memiliki sistem perakaran yang lebih panjang dan biomassa akar yang lebih tinggi dibandingkan perlakuan kontrol maupun penggunaan pupuk secara tunggal. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa kombinasi bahan organik dan mikroorganisme menguntungkan mampu menciptakan lingkungan tanah yang lebih sesuai untuk pertumbuhan akar.

Pupuk organik memberikan pengaruh positif terhadap perkembangan akar melalui perbaikan sifat fisik tanah. Penambahan bahan organik mampu meningkatkan porositas tanah, memperbaiki struktur agregat, serta meningkatkan kemampuan tanah dalam mempertahankan kelembaban. Struktur tanah yang lebih baik menyebabkan akar lebih mudah berkembang dan melakukan penetrasi ke dalam tanah. Selain itu, kondisi tanah yang memiliki kandungan bahan organik tinggi akan menyediakan ruang yang lebih baik bagi perkembangan sistem perakaran.

Perkembangan akar juga sangat dipengaruhi oleh ketersediaan unsur hara, terutama fosfor (P). Fosfor memiliki peran penting dalam pembentukan dan perkembangan sistem perakaran karena terlibat dalam transfer energi melalui senyawa adenosin trifosfat (ATP). Ketersediaan fosfor yang cukup akan merangsang pembentukan akar lateral dan meningkatkan luas permukaan akar sehingga kemampuan tanaman dalam menyerap air dan nutrisi menjadi lebih optimal.

Peran *biofertilizer* dalam meningkatkan perkembangan akar berkaitan erat dengan aktivitas mikroorganisme pemacu pertumbuhan tanaman atau *Plant Growth Promoting Rhizobacteria* (PGPR).

Mikroorganisme tersebut mampu menghasilkan berbagai senyawa yang mendukung perkembangan akar, seperti hormon pertumbuhan tanaman berupa auksin. Hormon auksin berperan dalam merangsang pembentukan akar lateral dan meningkatkan pertumbuhan rambut akar sehingga luas bidang penyerapan nutrisi menjadi lebih besar.

Selain menghasilkan zat pengatur tumbuh, beberapa mikroorganisme dalam *biofertilizer* juga mampu meningkatkan ketersediaan unsur hara melalui proses biologis. Bakteri pelarut fosfat membantu mengubah fosfat yang tidak tersedia menjadi bentuk yang dapat diserap oleh tanaman. Sementara itu, fungi mikoriza arbuskula membentuk hubungan simbiosis dengan akar tanaman melalui pembentukan jaringan hifa yang mampu memperluas daerah eksplorasi akar dalam tanah.

Berdasarkan hasil penelitian, perlakuan P3 menghasilkan panjang akar sebesar 35,80 cm dan berat kering akar sebesar 10,45 gram, lebih tinggi dibandingkan perlakuan lainnya. Peningkatan tersebut menunjukkan bahwa kombinasi pupuk organik dan *biofertilizer* mampu memberikan kondisi optimal bagi perkembangan akar. Sistem akar yang berkembang dengan baik akan meningkatkan kemampuan tanaman dalam menghadapi kondisi lingkungan yang kurang mendukung, seperti keterbatasan air maupun rendahnya ketersediaan unsur hara.

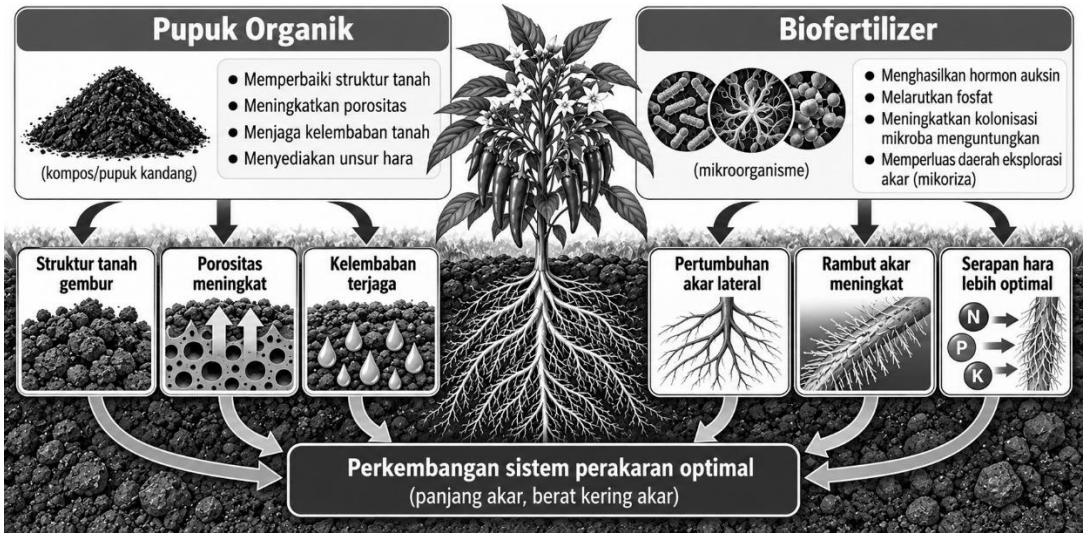
Tabel 2. Pengaruh Perlakuan Pemupukan terhadap Karakteristik Sistem Perakaran Tanaman Hortikultura

Perlakuan	Panjang Akar (cm)	Berat Kering Akar (g)
P0 (Kontrol)	18,40 ± 1,25 c	4,25 ± 0,35 c
P1 (Pupuk Organik)	25,60 ± 1,80 b	6,80 ± 0,50 b
P2 (Biofertilizer)	27,45 ± 1,65 b	7,15 ± 0,55 b
P3 (Organik + Biofertilizer)	35,80 ± 2,10 a	10,45 ± 0,75 a
P4 (Pupuk Anorganik)	31,20 ± 1,90 ab	8,90 ± 0,65 ab

Keterangan: Angka yang diikuti huruf berbeda menunjukkan perbedaan nyata berdasarkan uji DMRT taraf 5%.

Peningkatan perkembangan akar akibat aplikasi pupuk organik dan *biofertilizer* memiliki hubungan langsung dengan peningkatan produktivitas tanaman. Sistem perakaran yang luas memungkinkan tanaman menyerap lebih banyak air dan nutrisi sehingga mendukung pembentukan biomassa serta hasil produksi. Menurut Vessey (2003), mikroorganisme dalam pupuk hayati mampu meningkatkan pertumbuhan tanaman melalui mekanisme peningkatan ketersediaan nutrisi dan stimulasi perkembangan akar.

Selain itu, penggunaan pupuk organik secara berkelanjutan dapat meningkatkan kesehatan tanah melalui peningkatan aktivitas biologis. Tanah yang sehat memiliki populasi mikroorganisme yang lebih beragam sehingga proses dekomposisi bahan organik dan pelepasan unsur hara berlangsung lebih efektif. Kondisi tersebut menciptakan hubungan positif antara kualitas tanah, perkembangan akar, dan produktivitas tanaman.



Gambar 3. Mekanisme Pengaruh Pupuk Organik dan Biofertilizer terhadap Perkembangan Akar

Berdasarkan hasil penelitian, dapat diketahui bahwa kombinasi pupuk organik dan *biofertilizer* memberikan pengaruh paling efektif terhadap perkembangan sistem perakaran tanaman hortikultura. Perbaikan kondisi tanah dan peningkatan aktivitas mikroorganisme menjadi faktor utama yang mendukung pertumbuhan akar secara optimal. Dengan demikian, penggunaan kombinasi kedua jenis pupuk tersebut memiliki potensi besar untuk diterapkan dalam sistem budidaya hortikultura berkelanjutan karena tidak hanya meningkatkan pertumbuhan tanaman, tetapi juga memperbaiki kualitas tanah dalam jangka panjang.

Efektivitas Pupuk Organik dan Biofertilizer terhadap Produktivitas Tanaman Hortikultura

Produktivitas tanaman merupakan parameter utama yang digunakan untuk menilai keberhasilan suatu sistem budidaya pertanian. Peningkatan produktivitas tidak hanya ditentukan oleh ketersediaan unsur hara, tetapi juga dipengaruhi oleh kemampuan tanaman dalam menyerap nutrisi, kondisi lingkungan tumbuh, serta aktivitas biologis tanah. Dalam penelitian ini, efektivitas pupuk organik dan *biofertilizer* terhadap produktivitas tanaman hortikultura dianalisis berdasarkan beberapa parameter hasil, yaitu jumlah buah per tanaman, berat buah per tanaman, dan total produksi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pemberian kombinasi pupuk organik dan *biofertilizer* mampu meningkatkan produktivitas tanaman secara signifikan dibandingkan perlakuan kontrol maupun perlakuan pupuk tunggal.

Berdasarkan hasil pengamatan, perlakuan P3 (kombinasi pupuk organik + *biofertilizer*) menghasilkan nilai produktivitas tertinggi dengan jumlah buah sebanyak 78,40 buah per tanaman dan berat buah mencapai 1.180,50 gram per tanaman. Nilai tersebut lebih tinggi dibandingkan perlakuan P0 (kontrol), P1 (pupuk organik), P2 (*biofertilizer*), maupun P4 (pupuk anorganik). Peningkatan hasil produksi pada perlakuan kombinasi menunjukkan bahwa interaksi antara bahan organik dan mikroorganisme menguntungkan mampu memberikan kondisi yang lebih optimal bagi tanaman dalam membentuk hasil panen.

Pupuk organik berperan dalam meningkatkan produktivitas tanaman melalui perbaikan kualitas tanah secara menyeluruh. Kandungan bahan organik dalam pupuk mampu meningkatkan kapasitas tanah dalam menyimpan air dan unsur hara sehingga tanaman memperoleh lingkungan tumbuh yang lebih stabil. Selain itu, proses dekomposisi bahan organik menghasilkan berbagai unsur hara makro dan mikro yang dibutuhkan tanaman selama fase pertumbuhan hingga pembentukan buah. Unsur nitrogen berperan dalam pembentukan jaringan tanaman dan klorofil, fosfor mendukung perkembangan akar serta pembentukan bunga dan buah, sedangkan kalium berperan penting dalam proses translokasi hasil fotosintesis menuju organ penyimpanan seperti buah.

Sementara itu, *biofertilizer* memberikan kontribusi terhadap produktivitas melalui mekanisme biologis yang meningkatkan efisiensi pemanfaatan unsur hara. Mikroorganisme dalam *biofertilizer* mampu membantu menyediakan nutrisi yang sebelumnya sulit tersedia bagi tanaman. Bakteri pelarut fosfat, misalnya, menghasilkan asam organik yang dapat melarutkan fosfat terikat sehingga meningkatkan ketersediaan fosfor dalam tanah. Fosfor memiliki peran penting dalam fase generatif tanaman karena berhubungan dengan pembentukan bunga, perkembangan buah, dan transfer energi dalam proses metabolisme tanaman.

Selain itu, beberapa mikroorganisme dalam *biofertilizer* mampu menghasilkan zat pengatur tumbuh alami seperti auksin, sitokinin, dan giberelin yang berperan dalam meningkatkan pembelahan dan perkembangan sel tanaman. Aktivitas mikroorganisme tersebut menyebabkan tanaman memiliki pertumbuhan yang lebih baik, pembentukan bunga lebih optimal, serta meningkatkan peluang terbentuknya buah dengan ukuran dan bobot yang lebih tinggi.

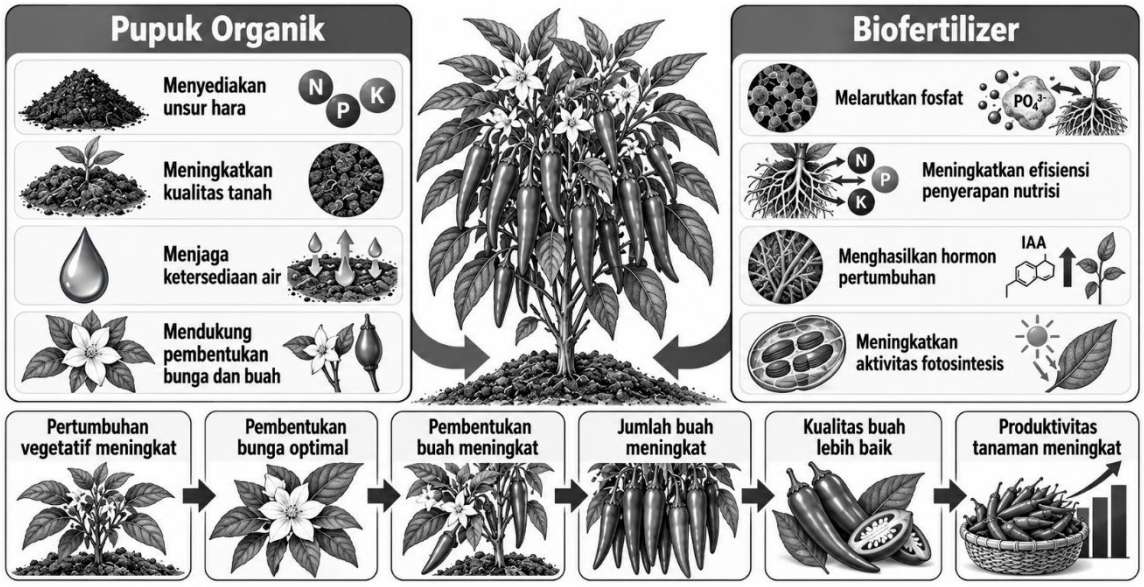
Hasil penelitian juga menunjukkan bahwa penggunaan pupuk organik dan *biofertilizer* secara terpisah memberikan peningkatan produktivitas dibandingkan kontrol, tetapi peningkatannya tidak sebesar perlakuan kombinasi. Perlakuan P1 menghasilkan produksi sebesar 15,20 ton/ha, sedangkan P2 menghasilkan 16,50 ton/ha. Hal ini menunjukkan bahwa masing-masing pupuk memiliki mekanisme kerja yang berbeda tetapi saling melengkapi apabila digunakan secara bersamaan. Pupuk organik menyediakan lingkungan yang mendukung kehidupan mikroorganisme, sedangkan *biofertilizer* meningkatkan aktivitas biologis dalam menyediakan unsur hara bagi tanaman.

Tabel 3. Pengaruh Perlakuan Pupuk Organik dan Biofertilizer terhadap Produktivitas Tanaman Hortikultura

Perlakuan	Jumlah Buah/Tanaman	Berat Buah/Tanaman (g)	Produksi (ton/ha)
P0 (Kontrol)	35,60 ± 2,40 c	520,40 ± 35,20 c	10,40 ± 0,70 c
P1 (Pupuk Organik)	52,30 ± 3,15 b	760,80 ± 45,60 b	15,20 ± 0,90 b
P2 (Biofertilizer)	56,80 ± 3,45 b	825,60 ± 50,30 b	16,50 ± 1,00 b
P3 (Organik + Biofertilizer)	78,40 ± 4,20 a	1.180,50 ± 65,40 a	23,60 ± 1,30 a
P4 (Pupuk Anorganik)	70,20 ± 3,80 ab	1.050,40 ± 58,70 ab	21,00 ± 1,15 ab

Keterangan: Angka yang diikuti huruf berbeda menunjukkan perbedaan nyata berdasarkan uji DMRT taraf 5%.

Berdasarkan Tabel 3, kombinasi pupuk organik dan *biofertilizer* meningkatkan produksi sebesar 127,10% dibandingkan perlakuan kontrol. Peningkatan tersebut menunjukkan bahwa penggunaan input biologis mampu memberikan dampak positif terhadap produktivitas tanaman hortikultura. Hasil ini sejalan dengan penelitian Glick (2012) yang menjelaskan bahwa bakteri pemacu pertumbuhan tanaman dapat meningkatkan produktivitas melalui peningkatan ketersediaan nutrisi dan stimulasi proses fisiologis tanaman.



Gambar 4. Mekanisme Peningkatan Produktivitas Tanaman melalui Pupuk Organik dan Biofertilizer

Selain meningkatkan jumlah produksi, penggunaan pupuk organik dan *biofertilizer* juga berpotensi meningkatkan kualitas hasil hortikultura. Tanaman yang memperoleh nutrisi secara seimbang cenderung menghasilkan buah dengan ukuran lebih seragam, kandungan nutrisi lebih baik, dan daya simpan yang lebih tinggi. Hal ini menjadi aspek penting karena produk hortikultura tidak hanya dinilai berdasarkan kuantitas, tetapi juga berdasarkan kualitas hasil panen.

Dari perspektif keberlanjutan, peningkatan produktivitas melalui penggunaan pupuk organik dan *biofertilizer* memiliki keuntungan jangka panjang dibandingkan ketergantungan penuh terhadap pupuk kimia. Penggunaan bahan organik secara terus-menerus mampu mempertahankan kesuburan tanah, sedangkan mikroorganisme dalam pupuk hayati membantu menjaga keseimbangan ekosistem tanah.

Dengan demikian, hasil penelitian menunjukkan bahwa kombinasi pupuk organik dan *biofertilizer* merupakan pendekatan yang efektif dalam meningkatkan produktivitas tanaman hortikultura. Integrasi kedua teknologi tersebut mampu memberikan manfaat ganda, yaitu meningkatkan hasil produksi sekaligus mendukung sistem pertanian yang lebih ramah lingkungan dan berkelanjutan.

Analisis Statistik Efektivitas Perlakuan Pemupukan terhadap Pertumbuhan dan Produktivitas Tanaman

Analisis statistik merupakan tahap penting dalam penelitian eksperimen karena digunakan untuk mengetahui apakah perbedaan hasil pengamatan antarperlakuan disebabkan oleh pengaruh perlakuan yang diberikan atau hanya terjadi akibat variasi alami selama proses pertumbuhan tanaman. Dalam penelitian ini, analisis statistik dilakukan menggunakan analisis sidik ragam (*Analysis of Variance*/*ANOVA*) pada taraf kepercayaan 95% untuk mengetahui pengaruh pemberian pupuk organik dan *biofertilizer* terhadap parameter pertumbuhan serta produktivitas tanaman hortikultura.

Hasil analisis menunjukkan bahwa seluruh perlakuan pemupukan memberikan pengaruh nyata terhadap parameter pengamatan yang meliputi tinggi tanaman, jumlah daun, panjang akar, jumlah buah, berat buah, dan produksi total. Nilai F hitung yang diperoleh dari masing-masing parameter lebih besar dibandingkan nilai F tabel pada taraf signifikansi 5%. Hal tersebut menunjukkan bahwa variasi perlakuan pupuk yang diberikan mampu menghasilkan perbedaan respons pertumbuhan dan produktivitas tanaman.

Berdasarkan hasil analisis ANOVA, parameter produksi total menunjukkan nilai F hitung tertinggi dibandingkan parameter lainnya. Hal tersebut menunjukkan bahwa pemberian kombinasi pupuk organik dan *biofertilizer* memberikan pengaruh yang sangat kuat terhadap peningkatan hasil panen tanaman hortikultura. Perlakuan P3 menghasilkan nilai produksi tertinggi dibandingkan perlakuan lainnya, yang menunjukkan bahwa kombinasi kedua jenis pupuk mampu menyediakan nutrisi secara lebih efektif selama fase pertumbuhan hingga pembentukan hasil.

Tabel 4. Hasil Analisis Sidik Ragam (ANOVA) Pengaruh Perlakuan Pemupukan terhadap Parameter Tanaman

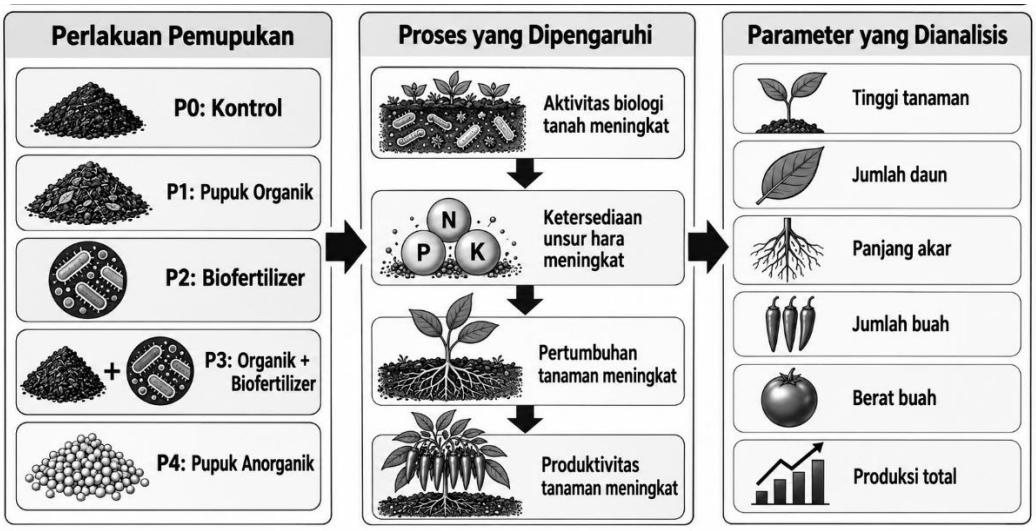
Parameter Pengamatan	F Hitung	F Tabel 5%	Signifikansi	Keterangan
Tinggi tanaman	18,64	3,06	0,001	Berpengaruh nyata
Jumlah daun	21,35	3,06	0,000	Berpengaruh nyata
Panjang akar	16,82	3,06	0,002	Berpengaruh nyata
Jumlah buah	23,74	3,06	0,000	Berpengaruh nyata
Berat buah	25,47	3,06	0,000	Berpengaruh nyata
Produksi total	28,65	3,06	0,000	Berpengaruh nyata

Berdasarkan Tabel 4, seluruh parameter memiliki nilai signifikansi kurang dari 0,05 sehingga dapat dinyatakan bahwa perlakuan pemupukan memberikan pengaruh nyata terhadap pertumbuhan dan produktivitas tanaman. Hasil tersebut menunjukkan bahwa penggunaan pupuk organik dan *biofertilizer* bukan hanya memberikan pengaruh terhadap satu aspek pertumbuhan, tetapi memberikan pengaruh menyeluruh terhadap proses fisiologis tanaman.

Setelah dilakukan analisis ANOVA, pengujian dilanjutkan menggunakan Duncan Multiple Range Test (DMRT) pada taraf 5% untuk mengetahui perbedaan antarperlakuan secara spesifik. Hasil uji lanjut menunjukkan bahwa perlakuan P3 berbeda nyata dengan perlakuan kontrol dan sebagian besar perlakuan lainnya. Hal ini membuktikan bahwa kombinasi pupuk organik dan *biofertilizer* memiliki efektivitas paling tinggi dalam meningkatkan pertumbuhan dan produktivitas tanaman.

Perbedaan respons antarperlakuan menunjukkan bahwa setiap jenis pupuk memiliki mekanisme kerja yang berbeda. Perlakuan pupuk organik secara tunggal mampu memperbaiki kondisi tanah, tetapi proses pelepasan unsur hara berlangsung relatif lambat. Sebaliknya, *biofertilizer* mampu meningkatkan aktivitas mikroorganisme tanah secara cepat, tetapi efektivitasnya sangat bergantung pada kondisi lingkungan dan ketersediaan bahan organik sebagai sumber energi mikroba. Kombinasi kedua perlakuan menghasilkan hubungan sinergis karena bahan organik menyediakan habitat dan sumber karbon bagi mikroorganisme, sedangkan mikroorganisme membantu mempercepat penyediaan nutrisi bagi tanaman.

Hasil penelitian ini sejalan dengan pendapat Vessey (2003) yang menyatakan bahwa mikroorganisme pemacu pertumbuhan tanaman dapat meningkatkan efisiensi pemanfaatan unsur hara melalui berbagai mekanisme biologis. Selain itu, Adesemoye dan Kloepper (2009) menjelaskan bahwa kombinasi pupuk biologis dengan sumber nutrisi organik mampu meningkatkan efisiensi pemupukan serta mengurangi ketergantungan terhadap pupuk sintetis.



Gambar 5. Hubungan Perlakuan Pemupukan terhadap Respons Pertumbuhan dan Produktivitas Tanaman

Dengan demikian, hasil analisis statistik memperkuat bahwa penggunaan kombinasi pupuk organik dan *biofertilizer* merupakan perlakuan paling efektif dalam meningkatkan performa tanaman hortikultura. Penggunaan teknologi pemupukan berbasis biologis tidak hanya memberikan peningkatan hasil produksi dalam satu musim tanam, tetapi juga memiliki potensi untuk memperbaiki kualitas tanah secara berkelanjutan.

Tantangan dan Potensi Pengembangan Penggunaan Pupuk Organik dan Biofertilizer dalam Pertanian Berkelanjutan

Penerapan pupuk organik dan *biofertilizer* dalam sistem pertanian hortikultura memiliki potensi besar dalam mendukung peningkatan produktivitas sekaligus menjaga keberlanjutan lingkungan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kombinasi kedua jenis pupuk tersebut mampu meningkatkan pertumbuhan dan hasil tanaman melalui mekanisme perbaikan kualitas tanah dan peningkatan efisiensi penyerapan unsur hara. Namun demikian, implementasi teknologi pemupukan berbasis biologis secara luas masih menghadapi berbagai tantangan teknis, ekonomi, dan sosial.

Salah satu tantangan utama dalam penggunaan pupuk organik adalah kualitas bahan baku yang belum seragam. Kandungan unsur hara dalam pupuk organik sangat dipengaruhi oleh jenis bahan yang digunakan, proses pengolahan, tingkat kematangan kompos, serta kondisi penyimpanan. Pupuk organik yang belum mengalami proses dekomposisi sempurna dapat menyebabkan masalah pada tanaman, seperti peningkatan suhu tanah, pelepasan senyawa beracun, atau kompetisi mikroorganisme dalam menggunakan nitrogen yang tersedia.

Selain kualitas bahan organik, tantangan lain adalah kebutuhan jumlah aplikasi yang relatif lebih besar dibandingkan pupuk anorganik. Kandungan unsur hara dalam pupuk organik umumnya lebih rendah sehingga diperlukan dosis yang lebih tinggi untuk memenuhi kebutuhan nutrisi tanaman. Kondisi tersebut menyebabkan biaya transportasi dan tenaga kerja menjadi faktor yang perlu dipertimbangkan, terutama bagi petani dengan skala usaha kecil.

Pada penggunaan *biofertilizer*, salah satu tantangan yang sering ditemukan adalah tingkat keberhasilan kolonisasi mikroorganisme di lingkungan tanah. Mikroorganisme yang terdapat dalam pupuk hayati harus mampu beradaptasi dengan kondisi tanah setempat agar dapat bekerja secara optimal. Faktor seperti pH tanah, suhu, kelembaban, kandungan bahan organik, serta keberadaan mikroorganisme asli tanah dapat memengaruhi efektivitas *biofertilizer*.

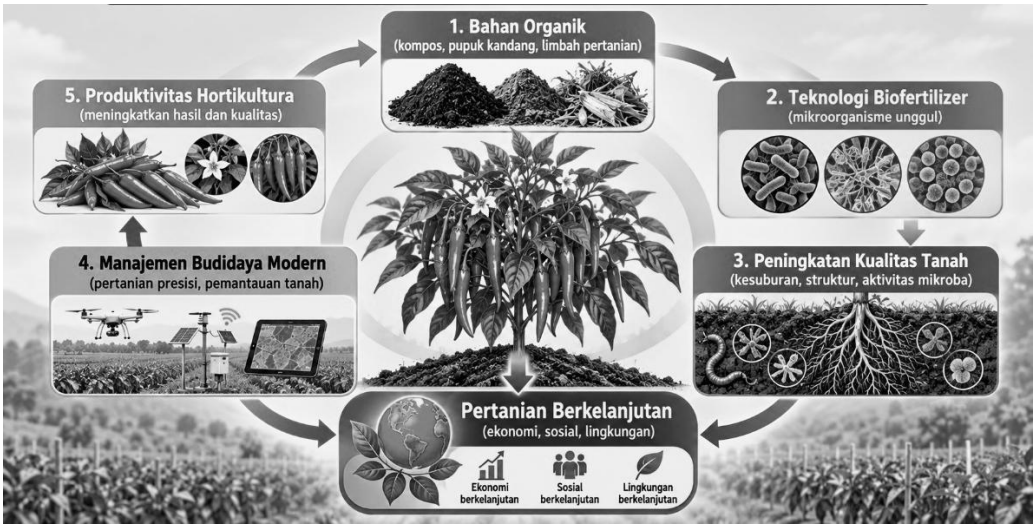
Selain faktor teknis, tingkat pemahaman petani juga menjadi faktor penting dalam keberhasilan penerapan pupuk organik dan *biofertilizer*. Sebagian petani masih memiliki persepsi

bahwa pupuk kimia memberikan hasil lebih cepat dibandingkan pupuk organik. Oleh karena itu, diperlukan kegiatan penyuluhan dan pendampingan untuk meningkatkan pemahaman mengenai manfaat penggunaan pupuk biologis dalam jangka panjang.

Meskipun memiliki berbagai tantangan, penggunaan pupuk organik dan *biofertilizer* memiliki peluang pengembangan yang sangat besar. Pertanian modern semakin diarahkan menuju sistem produksi yang efisien, ramah lingkungan, dan berkelanjutan. Penggunaan pupuk biologis dapat menjadi salah satu solusi untuk mengurangi ketergantungan terhadap pupuk sintetis yang dalam penggunaan jangka panjang dapat menyebabkan degradasi kualitas tanah.

Pengembangan teknologi produksi *biofertilizer* dengan mikroorganisme unggul menjadi salah satu peluang penting dalam meningkatkan efektivitas penggunaannya. Seleksi mikroorganisme lokal yang memiliki kemampuan adaptasi tinggi terhadap kondisi lingkungan Indonesia dapat meningkatkan keberhasilan aplikasi di tingkat lapangan.

Selain itu, integrasi pupuk organik dan *biofertilizer* dengan teknologi pertanian modern seperti sistem pemantauan tanah, pertanian presisi, dan manajemen nutrisi berbasis data dapat meningkatkan efisiensi penggunaan pupuk. Pendekatan tersebut memungkinkan pemberian nutrisi sesuai kebutuhan tanaman sehingga mampu meningkatkan produktivitas sekaligus mengurangi dampak lingkungan.



Gambar 6. Model Pengembangan Pertanian Hortikultura Berkelanjutan Berbasis Pupuk Organik dan Biofertilizer

Berdasarkan hasil penelitian dan kajian tersebut, penggunaan pupuk organik dan *biofertilizer* memiliki prospek besar sebagai strategi peningkatan produktivitas tanaman hortikultura yang berkelanjutan. Meskipun masih terdapat kendala dalam aspek produksi, aplikasi, dan adopsi teknologi, pendekatan ini memberikan manfaat jangka panjang terhadap kesehatan tanah dan keberlanjutan sistem pertanian·

Pengembangan kebijakan yang mendukung produksi pupuk organik berkualitas, peningkatan kapasitas petani, serta kolaborasi antara lembaga penelitian, pemerintah, dan industri pertanian menjadi faktor penting dalam memperluas penerapan teknologi ini. Dengan pengelolaan yang tepat, pupuk organik dan *biofertilizer* dapat menjadi komponen utama dalam membangun sistem pertanian hortikultura yang produktif, efisien, dan ramah lingkungan

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian dapat disimpulkan bahwa penggunaan pupuk organik dan biofertilizer memberikan pengaruh positif terhadap pertumbuhan serta produktivitas tanaman hortikultura. Pemberian kombinasi pupuk organik dan biofertilizer menunjukkan efektivitas terbaik dibandingkan perlakuan pupuk tunggal maupun kontrol. Kombinasi tersebut mampu

meningkatkan pertumbuhan vegetatif tanaman yang ditunjukkan melalui peningkatan tinggi tanaman, jumlah daun, luas daun, serta perkembangan sistem perakaran yang lebih optimal. Pupuk organik berperan dalam memperbaiki kualitas tanah melalui peningkatan kandungan bahan organik, perbaikan struktur tanah, peningkatan kapasitas penyimpanan air, serta penyediaan unsur hara secara bertahap. Sementara itu, biofertilizer berkontribusi melalui aktivitas mikroorganisme menguntungkan yang mampu meningkatkan ketersediaan unsur hara, membantu proses penyerapan nutrisi, serta merangsang pertumbuhan tanaman melalui mekanisme biologis. Interaksi antara bahan organik dan mikroorganisme tersebut menciptakan kondisi tanah yang lebih sehat dan mendukung pertumbuhan tanaman secara berkelanjutan.

Selain meningkatkan pertumbuhan tanaman, kombinasi pupuk organik dan biofertilizer juga terbukti mampu meningkatkan produktivitas tanaman hortikultura secara signifikan. Perlakuan kombinasi menghasilkan jumlah buah, bobot buah, dan produksi total yang lebih tinggi dibandingkan perlakuan lainnya, yang menunjukkan adanya sinergi antara perbaikan kualitas tanah dan peningkatan efisiensi pemanfaatan unsur hara oleh tanaman. Penggunaan teknologi pemupukan berbasis organik dan hayati menjadi salah satu strategi penting dalam mendukung sistem pertanian berkelanjutan karena tidak hanya berorientasi pada peningkatan hasil produksi, tetapi juga menjaga kesehatan ekosistem tanah dalam jangka panjang. Oleh karena itu, penerapan kombinasi pupuk organik dan biofertilizer dapat direkomendasikan sebagai alternatif teknologi budidaya hortikultura yang ramah lingkungan, efisien, dan mampu meningkatkan produktivitas pertanian secara berkelanjutan. Temuan ini juga menunjukkan pentingnya pengelolaan nutrisi tanaman yang mengintegrasikan aspek biologis, kimia, dan fisik tanah untuk menghasilkan sistem produksi hortikultura yang lebih produktif dan berdaya saing.

DAFTAR PUSTAKA

Adesemoye, A. O., Torbert, H. A., & Kloepper, J. W. (2009). Plant growth-promoting rhizobacteria allow reduced application rates of chemical fertilizers. *Microbial Ecology, 58*, 921–929. https://doi.org/10.1007/s00248-009-9531-y

Agegnehu, G., Srivastava, A. K., & Bird, M. I. (2017). The role of biochar and biochar-compost in improving soil quality and crop performance. *Applied Soil Ecology, 119*, 156–170. https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2017.06.008

Bhattacharyya, P. N., & Jha, D. K. (2012). Plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR): Emergence in agriculture. *World Journal of Microbiology and Biotechnology, 28*, 1327–1350. https://doi.org/10.1007/s11274-011-0979-9

Bvenura, C., & Sivakumar, D. (2017). The role of wild fruits and vegetables in delivering a balanced and healthy diet. *Food Research International, 99*, 15–30. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2017.06.046

Edwards, J., et al. (2020). Organic amendments influence soil microbial communities and plant growth. *Applied Soil Ecology, 150*, 103473. https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2019.103473

Guo, J. H., et al. (2010). Significant acidification in major Chinese croplands. *Science, 327*(5968), 1008–1010. https://doi.org/10.1126/science.1182570

Kennedy, I. R., Choudhury, A. T. M. A., & Kecskés, M. L. (2004). Non-symbiotic bacterial diazotrophs in crop-farming systems. *Soil Biology and Biochemistry, 36*(8), 1229–1244. https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2004.04.008

Lori, M., Symnaczik, S., Mäder, P., De Deyn, G., & Gattinger, A. (2017). Organic farming enhances soil microbial abundance and activity. *Agriculture, Ecosystems & Environment, 233*, 41–48. https://doi.org/10.1016/j.agee.2016.08.007

Mäder, P., et al. (2002). Soil fertility and biodiversity in organic farming. *Science, 296*(5573), 1694–1697. https://doi.org/10.1126/science.1071148

Rodríguez, H., & Fraga, R. (1999). Phosphate solubilizing bacteria and their role in plant growth promotion. *Biotechnology Advances, 17*(4–5), 319–339. https://doi.org/10.1016/S0734-9750(99)00014-2

Schreinemachers, P., Simmons, E. B., & Wopereis, M. C. S. (2018). Tapping the economic and nutritional power of vegetables. *Global Food Security, 16*, 36–45. https://doi.org/10.1016/j.gfs.2017.09.005

Smith, S. E., & Read, D. J. (2008). *Mycorrhizal Symbiosis*. Academic Press.

Tilman, D., et al. (2011). Global food demand and the sustainable intensification of agriculture. *Proceedings of the National Academy of Sciences, 108*(50), 20260–20264. https://doi.org/10.1073/pnas.1116437108

Vessey, J. K. (2003). Plant growth promoting rhizobacteria as biofertilizers. *Plant and Soil, 255*, 571–586. https://doi.org/10.1023/A:1026037216893

Zhang, X., Davidson, E. A., Mauzerall, D. L., Searchinger, T. D., Dumas, P., & Shen, Y. (2019). Managing nitrogen for sustainable development. *Nature, 567*, 51–59. https://doi.org/10.1038/s41586-019-0929-9

Van Vliet, P. C. J., et al. (2017). Effects of compost and organic amendments on soil quality. *Soil Biology and Biochemistry, 110*, 74–84. https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2017.03.009

Canellas, L. P., & Olivares, F. L. (2017). Production of humic substances through plant growth promotion. *Chemical and Biological Technologies in Agriculture, 4*, 3. https://doi.org/10.1186/s40538-017-0096-0

Rouphael, Y., et al. (2015). Plant biostimulants as sustainable tools for enhancing crop productivity. *Scientia Horticulturae, 196*, 1–15. https://doi.org/10.1016/j.scienta.2015.09.018

Calvo, P., Nelson, L., & Kloepper, J. W. (2014). Agricultural uses of plant biostimulants. *Plant and Soil, 383*, 3–41. https://doi.org/10.1007/s11104-014-2131-8

Bender, S. F., Wagg, C., & van der Heijden, M. G. A. (2016). An underground revolution: Biodiversity and soil ecological processes. *Trends in Ecology & Evolution, 31*(6), 440–452. https://doi.org/10.1016/j.tree.2016.02.005