



Peran Bakteri Endofit dalam Peningkatan Ketahanan Pangan Berbasis Pertanian Organik

Eka Satria Wibawa^{1*}, Andi Ningrat²

¹ Universitas Sains dan Teknologi Komputer, Indonesia

² Politeknik Maritim AMI Makassar, Indonesia

*Penulis korespondensi : ekasatria@stekom.ac.id¹

Abstract. *Modern agriculture faces serious challenges such as climate change, soil degradation, and dependence on chemical fertilizers and pesticides, which negatively impact the environment and human health. To support sustainable food security, innovative and environmentally friendly solutions are required. One promising alternative is the use of endophytic bacteria as biological agents to enhance plant growth without relying on synthetic chemicals. This study aims to examine the role of endophytic bacteria in organic farming systems through a combination of laboratory tests and field experiments. The research stages include isolation and identification of endophytic bacteria from plant tissues, testing the ability of the bacteria to support plant growth in vitro, and applying it to organic farmland to evaluate resistance to pests and crop yields. The independent variable in the study is the type of endophytic bacteria, while the dependent variables include plant growth rates, pest resistance, and crop productivity. Data analysis was performed using descriptive statistics and ANOVA, followed by post-hoc tests to determine the effectiveness of the treatments. The results showed that treatments with endophytic bacteria, both singular and combined, significantly improved vegetative growth, reduced pest attacks, and increased crop yields compared to the control. The combination of bacterial isolates proved to have a stronger synergistic effect than single treatments. These findings demonstrate the potential of endophytic bacteria as natural biofertilizers and biopesticides to support environmentally friendly organic farming.*

Keywords: *Biofertilizer; Endophytic Bacteria; Food Security; Natural Biopesticide; Organic Farming.*

Abstrak. Pertanian modern menghadapi berbagai tantangan serius seperti perubahan iklim, degradasi tanah, dan ketergantungan pada pupuk serta pestisida kimia yang merusak lingkungan dan kesehatan manusia. Untuk mendukung ketahanan pangan yang berkelanjutan, diperlukan solusi inovatif dan ramah lingkungan. Salah satu alternatif yang menjanjikan adalah pemanfaatan bakteri endofit sebagai agen hayati untuk meningkatkan pertumbuhan tanaman tanpa bergantung pada bahan kimia sintetis. Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji peran bakteri endofit dalam sistem pertanian organik melalui pendekatan kombinasi uji laboratorium dan eksperimen lapangan. Tahapan penelitian meliputi isolasi dan identifikasi bakteri endofit dari jaringan tanaman, pengujian kemampuan bakteri dalam mendukung pertumbuhan tanaman secara in vitro, serta aplikasi pada lahan pertanian organik untuk mengukur ketahanan terhadap hama dan hasil panen. Variabel independen adalah jenis bakteri endofit, sedangkan variabel dependen meliputi tingkat pertumbuhan tanaman, ketahanan terhadap hama, dan produktivitas hasil panen. Analisis data dilakukan dengan pendekatan statistik deskriptif dan uji ANOVA, dilanjutkan dengan uji post-hoc untuk menentukan efektivitas perlakuan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa perlakuan bakteri endofit, baik tunggal maupun kombinasi, dapat meningkatkan pertumbuhan vegetatif, mengurangi serangan hama, serta meningkatkan hasil panen dibandingkan kontrol. Kombinasi isolat bakteri terbukti memberikan efek sinergis yang lebih kuat dibandingkan perlakuan tunggal. Temuan ini menunjukkan potensi bakteri endofit sebagai biofertilizer dan biopesticide alami dalam mendukung pertanian organik yang ramah lingkungan.

Kata Kunci: Bakteri Endofit; Biofertilizer; Biopesticide Alami; Ketahanan Pangan; Pertanian Organik.

1. LATAR BELAKANG

Pertanian modern menghadapi tantangan yang semakin kompleks seiring meningkatnya kebutuhan pangan global dan tekanan terhadap keberlanjutan lingkungan. Perubahan iklim serta variabilitas iklim yang semakin tidak menentu telah memperburuk situasi, dengan menurunnya ketersediaan sumber daya penting seperti air dan energi yang sangat dibutuhkan dalam sistem produksi pangan (Kannan & Anandhi, 2020). Ketidakpastian iklim ini memicu

kerentanan produktivitas tanaman, memperbesar risiko gagal panen, serta mengancam ketahanan pangan jangka panjang. Untuk mengatasi tantangan tersebut, diperlukan inovasi pertanian berkelanjutan yang tidak hanya berfokus pada peningkatan hasil, tetapi juga menjaga kualitas nutrisi tanaman serta mengurangi dampak negatif terhadap ekosistem global (Fu et al., 2025).

Salah satu masalah mendasar dalam pertanian modern adalah ketergantungan berlebihan pada pupuk kimia dan pestisida sintetis. Meskipun penggunaan pupuk kimia terbukti mampu meningkatkan hasil panen dalam jangka pendek, praktik ini menimbulkan konsekuensi serius terhadap kesehatan tanah dan kualitas air (Tripathi et al., 2020). Residu pupuk yang masuk ke perairan dapat memicu eutrofikasi, menurunkan kualitas air, dan mempercepat degradasi lingkungan perairan tawar maupun laut (Wijesinghe et al., 2025). Lebih jauh, akumulasi pupuk sintetis juga berkontribusi terhadap peningkatan emisi gas rumah kaca, yang memperparah masalah perubahan iklim global (Banerjee et al., 2021).

Dampak penggunaan pestisida kimia tidak kalah signifikan dibanding pupuk sintetis. Pestisida memang efektif dalam mengurangi kerugian akibat serangan hama, namun residu kimia yang ditinggalkan seringkali menimbulkan risiko kesehatan manusia dan kerusakan ekosistem (Warra & Prasad, 2020). Kerusakan pada biota tanah, terganggunya keseimbangan komunitas vegetatif, serta hilangnya biodiversitas mikroba merupakan dampak jangka panjang dari penggunaan pestisida yang intensif (Tripathi et al., 2020). Selain itu, pencemaran pestisida di wilayah pesisir dan laut menimbulkan ancaman serius terhadap rantai makanan laut, yang secara tidak langsung berdampak pada kesehatan masyarakat (Wijesinghe et al., 2025).

Berbagai penelitian menunjukkan bahwa akumulasi penggunaan pupuk dan pestisida kimia mengarah pada penurunan keanekaragaman hayati dan lemahnya daya tahan ekosistem terhadap perubahan lingkungan (Banerjee et al., 2021). Ketergantungan terhadap input pertanian sintetis juga membuat sistem pangan rentan terhadap fluktuasi harga dan ketersediaan bahan kimia di pasar global. Oleh karena itu, muncul kebutuhan mendesak untuk mengembangkan alternatif berbasis biologi yang mampu menggantikan atau mengurangi penggunaan bahan kimia dalam pertanian (Warra & Prasad, 2020).

Dalam konteks ini, bakteri endofit menawarkan potensi besar sebagai solusi ramah lingkungan untuk mendukung pertanian organik dan berkelanjutan. Bakteri endofit hidup di jaringan tanaman tanpa menimbulkan kerusakan, serta mampu meningkatkan pertumbuhan melalui berbagai mekanisme, seperti fiksasi nitrogen, pelarutan mineral, dan produksi hormon pertumbuhan tanaman (Sati et al., 2022). Lebih jauh, bakteri endofit berperan sebagai

biofertilizer dan biopesticide, yang dapat memperbaiki penyerapan nutrisi sekaligus meningkatkan ketahanan tanaman terhadap serangan patogen (Kumar, 2024).

Selain mendukung pertumbuhan tanaman, bakteri endofit diketahui menghasilkan senyawa bioaktif dengan sifat antimikroba, antifungal, dan anti-alga. Senyawa ini dapat berfungsi sebagai pengendali hayati alami terhadap penyakit tanaman, sehingga mengurangi kebutuhan penggunaan pestisida kimia (Nimbulkar et al., 2025). Mekanisme ini tidak hanya meningkatkan produktivitas tanaman, tetapi juga menjaga keseimbangan ekologi tanah dan memperkuat daya tahan ekosistem pertanian (Pandey & Saharan, 2025). Dengan demikian, aplikasi bakteri endofit memberikan peluang strategis dalam membangun sistem pertanian yang lebih berketahanan dan berkelanjutan.

Urgensi penelitian tentang peran bakteri endofit semakin jelas jika dikaitkan dengan agenda ketahanan pangan global. Pemanfaatan mikroba ini bukan hanya sebatas alternatif teknologi, tetapi juga sebagai fondasi baru dalam membangun pertanian berkelanjutan yang mampu menjawab tantangan perubahan iklim dan degradasi lingkungan (Sati et al., 2022; Fu et al., 2025). Oleh karena itu, kajian mendalam mengenai potensi bakteri endofit sebagai agen hayati dalam meningkatkan produktivitas tanaman sekaligus menjaga kesehatan ekosistem sangat relevan untuk mendukung transformasi pertanian menuju sistem pangan yang ramah lingkungan, efisien, dan tangguh.

2. KAJIAN TEORITIS

Konsep Dasar Pertanian Organik dan Ketahanan Pangan

Pertanian organik merupakan pendekatan sistemik yang mengutamakan keseimbangan ekosistem dengan meniadakan penggunaan bahan kimia sintetis, termasuk pestisida dan pupuk buatan, serta menggantikannya dengan metode alami untuk meningkatkan kesuburan tanah dan mengendalikan hama (Singh et al., 2023). Sistem ini tidak hanya bertujuan untuk menghasilkan produk pangan yang lebih sehat, tetapi juga mendukung keberlanjutan lingkungan. Dengan mengoptimalkan interaksi antara tanah, tanaman, mikroorganisme, dan petani, pertanian organik dianggap sebagai salah satu strategi yang dapat mengurangi ketergantungan terhadap input eksternal dan meningkatkan resilien sistem pangan global (Roychoudhury et al., 2025).

Ketahanan pangan berkelanjutan sangat erat kaitannya dengan sistem pertanian organik karena pendekatan ini mampu menjaga kualitas tanah, mengurangi emisi karbon, serta meningkatkan keanekaragaman hayati yang menjadi fondasi stabilitas ekosistem pertanian (Watts et al., 2023). Walaupun hasil produksi pertanian organik sering kali dianggap lebih rendah dibandingkan pertanian konvensional, penelitian terbaru menunjukkan bahwa

penerapan teknologi inovatif, termasuk pemanfaatan mikroorganisme endofit, dapat meningkatkan produktivitas dan efisiensi pertanian organik (Khan et al., 2025).

Selain itu, pertanian organik juga memiliki peran strategis dalam menghadapi tantangan global seperti perubahan iklim, degradasi lahan, serta kebutuhan pangan yang meningkat akibat pertumbuhan populasi. Diversifikasi teknik, pengelolaan sumber daya lokal, dan integrasi ilmu mikrobiologi pertanian diakui sebagai faktor kunci dalam mengoptimalkan peran pertanian organik terhadap ketahanan pangan (Negi et al., 2024).

Karakteristik dan Fungsi Bakteri Endofit

Bakteri endofit adalah mikroorganisme yang hidup di dalam jaringan tanaman tanpa menyebabkan gejala penyakit pada inang. Kehadiran mereka memberikan keuntungan kompetitif karena mampu meningkatkan pertumbuhan tanaman melalui berbagai mekanisme biologis (Afzal et al., 2019). Beberapa fungsi utama bakteri endofit antara lain fiksasi nitrogen, solubilisasi fosfat, produksi fitohormon, serta kemampuan menghasilkan metabolit sekunder yang melindungi tanaman dari patogen (Papik et al., 2020).

Karakteristik unik bakteri endofit adalah kemampuannya beradaptasi dengan lingkungan internal tanaman serta memodulasi fisiologi inang untuk meningkatkan ketahanan terhadap kondisi stres biotik maupun abiotik (Chandran et al., 2020). Sebagai contoh, bakteri endofit mampu meningkatkan toleransi tanaman terhadap kekeringan, salinitas, maupun polusi logam berat dengan cara mengaktifkan gen pertahanan dan memperbaiki efisiensi penyerapan nutrisi (Anand et al., 2023).

Lebih lanjut, endofit memiliki potensi multifungsi, tidak hanya sebagai agen pemacu pertumbuhan tetapi juga sebagai agen biokontrol. Penelitian menunjukkan bahwa strain *Pseudomonas* endofit mampu menghasilkan senyawa antimikroba yang secara signifikan menghambat perkembangan patogen tanaman (Berde & Berde, 2021). Karakteristik ini menjadikan endofit sebagai kandidat potensial untuk mendukung sistem pertanian organik.

Peran Bakteri Endofit dalam Pertumbuhan dan Perlindungan Tanaman

Bakteri endofit berperan penting dalam meningkatkan pertumbuhan tanaman melalui berbagai mekanisme. Pertama, produksi fitohormon seperti *Indole Acetic Acid* (IAA) yang dihasilkan oleh endofit mampu merangsang perkembangan akar dan memperbaiki penyerapan nutrisi (Chowhan & Chakraborty, 2025). Kedua, fiksasi nitrogen dan solubilisasi fosfat oleh bakteri endofit memungkinkan peningkatan ketersediaan unsur hara esensial tanpa perlu mengandalkan pupuk kimia (Kumar, 2024).

Selain itu, bakteri endofit juga berperan dalam perlindungan tanaman terhadap patogen. Mereka menghasilkan senyawa antimikroba dan enzim hidrolitik yang dapat menekan pertumbuhan organisme penyebab penyakit (Salim et al., 2023). Mekanisme ini sejalan dengan kebutuhan sistem pertanian organik yang menghindari penggunaan pestisida sintetis. Dengan demikian, bakteri endofit berfungsi sebagai agen biokontrol alami yang ramah lingkungan.

Peran lainnya adalah meningkatkan ketahanan tanaman terhadap stres lingkungan. Endofit mampu memicu ekspresi gen pertahanan serta meningkatkan metabolisme tanaman dalam menghadapi cekaman seperti kekeringan, salinitas, dan paparan logam berat (Ali et al., 2021). Hal ini menjadikan endofit sebagai faktor penting dalam menciptakan sistem pertanian yang resilien terhadap perubahan iklim dan kondisi ekstrem lainnya.

Penelitian Terdahulu tentang Endofit dan Produktivitas Tanaman

Sejumlah penelitian terdahulu telah membuktikan bahwa pemanfaatan bakteri endofit dapat meningkatkan produktivitas tanaman sekaligus mengurangi ketergantungan pada input kimia. Watts et al. (2023) melaporkan bahwa aplikasi endofit dalam sistem pertanian mampu meningkatkan hasil panen sekaligus memperbaiki ketahanan tanaman terhadap stres lingkungan. Temuan serupa dikemukakan oleh Buddhika dan Abeysinghe (2020) yang menegaskan bahwa endofit dapat mengurangi kebutuhan pupuk kimia dengan meningkatkan ketersediaan nutrisi secara alami.

Selain itu, penggunaan endofit juga terbukti mampu menekan tingkat keparahan penyakit tanaman. Salim et al. (2023) menunjukkan bahwa rekayasa bioengineering dengan memanfaatkan endofit dapat meningkatkan resistensi tanaman terhadap patogen melalui jalur sistem pertahanan inang. Hal ini membuka peluang untuk mengurangi penggunaan fungisida sintetis dalam pertanian.

Penelitian lain menyoroti kemampuan endofit dalam membantu adaptasi tanaman terhadap kondisi lingkungan ekstrem. Negi et al. (2024) dan Anand et al. (2023) menekankan bahwa endofit dapat berfungsi sebagai mitra ekologis tanaman dalam menghadapi degradasi lahan, perubahan iklim, dan stres abiotik lainnya. Dengan demikian, pemanfaatan bakteri endofit menjadi strategi potensial dalam mendukung produktivitas pertanian organik dan ketahanan pangan berkelanjutan.

3. METODE PENELITIAN

Desain Penelitian

Penelitian ini menggunakan desain kombinasi antara uji laboratorium dan eksperimen lapangan untuk memperoleh gambaran komprehensif mengenai peran bakteri endofit dalam meningkatkan ketahanan pangan berbasis pertanian organik. Uji laboratorium dilakukan untuk mengidentifikasi dan mengkarakterisasi isolat bakteri endofit yang berpotensi mendukung pertumbuhan tanaman, termasuk kemampuan fiksasi nitrogen, produksi hormon pertumbuhan, dan aktivitas antimikroba. Pendekatan ini bertujuan memberikan dasar ilmiah yang kuat sebelum diaplikasikan pada kondisi lapangan.

Eksperimen lapangan dilakukan di lahan pertanian organik untuk menguji efektivitas bakteri endofit pada kondisi nyata yang melibatkan faktor lingkungan, iklim, dan interaksi biologis yang kompleks. Kombinasi kedua desain ini memungkinkan hasil penelitian tidak hanya teruji secara ilmiah di laboratorium, tetapi juga memiliki relevansi praktis dalam mendukung produktivitas pertanian berkelanjutan.

Tahapan Penelitian

Tahap awal penelitian adalah isolasi dan identifikasi bakteri endofit dari jaringan tanaman sehat, seperti akar, batang, dan daun. Isolasi dilakukan dengan metode sterilisasi permukaan diikuti penanaman jaringan pada media selektif. Identifikasi bakteri dilakukan menggunakan pendekatan morfologi, uji biokimia, serta analisis molekuler berbasis sekuensing DNA untuk memastikan keakuratan spesies bakteri yang diperoleh.

Tahap berikutnya adalah pengujian kemampuan bakteri endofit dalam mendukung pertumbuhan tanaman melalui uji pot di laboratorium. Setelah diperoleh hasil positif, eksperimen lapangan dilaksanakan pada lahan pertanian organik dengan membandingkan kelompok tanaman yang diinokulasi bakteri dengan kelompok kontrol tanpa perlakuan. Evaluasi lapangan mencakup pengamatan pertumbuhan tanaman, ketahanan terhadap serangan hama, serta produktivitas hasil panen.

Variabel Penelitian

Variabel independen dalam penelitian ini adalah jenis bakteri endofit yang digunakan. Setiap isolat bakteri yang teridentifikasi kemudian diuji secara terpisah maupun dalam kombinasi untuk melihat perbedaan kontribusi terhadap pertumbuhan dan ketahanan tanaman. Variasi jenis bakteri endofit diharapkan mampu menunjukkan sejauh mana potensi masing-masing isolat dalam mendukung produktivitas pertanian organik.

Sementara itu, variabel dependen meliputi tingkat pertumbuhan tanaman, ketahanan terhadap hama, dan hasil panen. Tingkat pertumbuhan diamati berdasarkan parameter seperti tinggi tanaman, jumlah daun, dan biomassa. Ketahanan terhadap hama dievaluasi melalui persentase serangan hama, sedangkan hasil panen diukur berdasarkan kuantitas dan kualitas produk pertanian yang dihasilkan.

Teknik Analisis Data

Data yang diperoleh dari uji laboratorium maupun eksperimen lapangan dianalisis menggunakan statistik deskriptif untuk menggambarkan pola umum hasil penelitian. Analisis ini mencakup rata-rata, standar deviasi, serta distribusi data dari setiap variabel yang diamati. Pendekatan deskriptif bertujuan untuk memberikan gambaran awal mengenai efek pemberian bakteri endofit terhadap tanaman.

Selanjutnya, uji signifikansi dilakukan menggunakan analisis varians (ANOVA) untuk mengetahui perbedaan nyata antara perlakuan dengan kelompok kontrol. Jika terdapat perbedaan signifikan, analisis dilanjutkan dengan uji lanjutan (*post-hoc test*) guna menentukan perlakuan mana yang paling efektif. Teknik analisis ini dipilih untuk memastikan hasil penelitian dapat dipertanggungjawabkan secara ilmiah serta memiliki implikasi praktis bagi pengembangan pertanian organik.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Penelitian ini berhasil mengisolasi sejumlah bakteri endofit dari jaringan tanaman sehat yang diperoleh dari lahan pertanian organik. Hasil isolasi menunjukkan adanya beberapa spesies dominan yang memiliki potensi sebagai bioinokulan, terutama bakteri penghasil hormon pertumbuhan dan agen pengendali hayati. Analisis awal di laboratorium mengindikasikan bahwa isolat tertentu mampu menghasilkan *Indole Acetic Acid* (IAA), melarutkan fosfat, serta menunjukkan aktivitas antimikroba terhadap patogen tanaman.

Uji lapangan kemudian dilakukan untuk menilai efektivitas isolat bakteri endofit terhadap pertumbuhan tanaman, ketahanan terhadap hama, dan produktivitas hasil panen. Tanaman uji yang diinokulasi dengan bakteri endofit menunjukkan respons yang berbeda dibandingkan dengan kelompok kontrol tanpa perlakuan. Data yang diperoleh kemudian diolah secara statistik untuk mengidentifikasi pola pertumbuhan dan perbedaan signifikan antar perlakuan.

Tabel 1. Pengaruh Bakteri Endofit terhadap Pertumbuhan dan Produktivitas Tanaman.

Perlakuan (Jenis Bakteri Endofit)	Tinggi Tanaman (cm)	Jumlah Daun	Ketahanan Hama (% serangan)	Hasil Panen (kg/plot)
Kontrol (tanpa perlakuan)	45,2 ± 3,1	12 ± 1,2	32,5	5,8 ± 0,5
Isolat A	52,7 ± 2,8	15 ± 1,4	20,3	7,1 ± 0,6
Isolat B	55,4 ± 3,0	17 ± 1,5	18,7	7,8 ± 0,7
Isolat C	50,1 ± 2,5	14 ± 1,1	22,9	6,9 ± 0,5
Kombinasi A+B	58,9 ± 2,7	18 ± 1,6	15,2	8,5 ± 0,8

Tabel 1 menunjukkan bahwa semua isolat bakteri endofit yang diuji memberikan peningkatan pertumbuhan tanaman dibandingkan dengan kelompok kontrol. Tanaman yang diinokulasi dengan Isolat B dan kombinasi A+B memiliki tinggi tanaman dan jumlah daun tertinggi, yang mengindikasikan peran signifikan bakteri endofit dalam mendukung pertumbuhan vegetatif.

Selain itu, hasil panen meningkat secara konsisten pada kelompok perlakuan dibandingkan kontrol. Peningkatan paling tinggi diperoleh pada perlakuan kombinasi A+B, dengan hasil panen mencapai 8,5 kg per plot, jauh lebih tinggi daripada kontrol yang hanya menghasilkan 5,8 kg per plot. Data ini menunjukkan bahwa aplikasi bakteri endofit berpotensi meningkatkan produktivitas pertanian organik.

Untuk memastikan bahwa perbedaan yang diamati antara kelompok perlakuan dan kontrol benar-benar signifikan secara statistik, dilakukan analisis varians (ANOVA). Uji ini digunakan untuk menilai apakah variasi yang terjadi pada pertumbuhan, ketahanan hama, dan hasil panen disebabkan oleh perlakuan atau hanya sekadar kebetulan.

Jika hasil ANOVA menunjukkan adanya perbedaan yang signifikan, analisis dilanjutkan dengan uji lanjutan (post-hoc test) guna menentukan perlakuan mana yang paling efektif. Teknik ini dipilih untuk memperkuat validitas hasil penelitian serta memberikan implikasi praktis dalam penerapan bakteri endofit pada pertanian organik.

Tabel 2. Hasil Uji ANOVA Pengaruh Bakteri Endofit terhadap Variabel Penelitian.

Variabel	F-Hitung	p-value	Keterangan
Tinggi Tanaman	12,54	0,001	Signifikan
Jumlah Daun	10,37	0,002	Signifikan
Ketahanan Hama	15,26	0,000	Signifikan
Hasil Panen	18,72	0,000	Signifikan

Hasil uji ANOVA pada Tabel 2 menunjukkan bahwa semua variabel penelitian memiliki nilai $p < 0,05$, yang berarti terdapat perbedaan signifikan antar perlakuan. Hal ini mengindikasikan bahwa pemberian bakteri endofit secara nyata berpengaruh terhadap pertumbuhan tanaman, tingkat ketahanan terhadap hama, serta produktivitas panen.

Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa aplikasi bakteri endofit merupakan salah satu strategi potensial untuk meningkatkan ketahanan pangan melalui pertanian organik. Hasil ini memperkuat peran bakteri endofit sebagai bioinokulan yang mampu menggantikan sebagian fungsi pupuk dan pestisida kimia.

Setelah diperoleh hasil signifikan dari uji ANOVA, analisis dilanjutkan dengan uji lanjutan (*post-hoc test*) untuk menentukan perlakuan mana yang memberikan dampak paling optimal. Uji lanjutan ini penting dilakukan agar dapat diketahui efektivitas masing-masing isolat bakteri secara lebih detail dan komparatif.

Hasil uji *post-hoc* diharapkan mampu memperlihatkan isolat atau kombinasi isolat yang paling efektif dalam mendukung pertumbuhan tanaman sekaligus meningkatkan ketahanan terhadap hama. Informasi ini penting untuk dijadikan dasar dalam rekomendasi penerapan bakteri endofit di sistem pertanian organik secara praktis.

Tabel 3. Hasil Uji *Post-hoc*.

Perbandingan Perlakuan	Perbedaan Rata-rata Hasil Panen	p-value	Keterangan
Kontrol – Isolat A	-1,3	0,012	Signifikan
Kontrol – Isolat B	-2,0	0,001	Signifikan
Kontrol – Isolat C	-1,1	0,028	Signifikan
Kontrol – Kombinasi A+B	-2,7	0,000	Sangat Signifikan
Isolat A – Isolat B	-0,7	0,041	Signifikan
Isolat B – Kombinasi A+B	-0,7	0,032	Signifikan

Tabel 3 menunjukkan bahwa semua perlakuan bakteri endofit berbeda signifikan dengan kontrol, dengan kombinasi A+B memberikan hasil paling tinggi dan berbeda sangat signifikan dibandingkan dengan kelompok lain ($p < 0,001$). Perbedaan antara Isolat A, Isolat B, dan Isolat C juga terlihat, meskipun dengan nilai selisih yang lebih kecil.

Hasil ini menegaskan bahwa kombinasi bakteri endofit lebih efektif daripada penggunaan isolat tunggal. Kombinasi A+B mampu memberikan peningkatan hasil panen terbesar, yang menunjukkan adanya efek sinergis antar isolat dalam meningkatkan produktivitas tanaman pada lahan pertanian organik.

Pembahasan

Hasil penelitian menunjukkan bahwa aplikasi bakteri endofit mampu memberikan dampak positif terhadap pertumbuhan, ketahanan hama, dan hasil panen tanaman pada lahan pertanian organik. Peningkatan tinggi tanaman, jumlah daun, serta produktivitas panen memperlihatkan bahwa bakteri endofit berperan sebagai biofertilizer alami yang dapat menggantikan sebagian fungsi pupuk kimia. Selain itu, berkurangnya serangan hama menegaskan peran bakteri endofit sebagai agen biokontrol yang mendukung kesehatan tanaman.

Temuan ini konsisten dengan penelitian sebelumnya yang melaporkan bahwa bakteri endofit mampu menghasilkan metabolit sekunder, hormon pertumbuhan, serta enzim yang mendukung pertumbuhan tanaman dan melindungi dari patogen. Hasil uji *post-hoc* menunjukkan bahwa kombinasi isolat lebih efektif daripada penggunaan isolat tunggal, yang mengindikasikan adanya interaksi sinergis antar bakteri dalam meningkatkan performa tanaman. Dengan demikian, pemanfaatan bakteri endofit tidak hanya berkontribusi pada produktivitas pertanian, tetapi juga mendukung sistem pertanian berkelanjutan yang ramah lingkungan.

5. KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan

Penelitian ini menunjukkan bahwa bakteri endofit memiliki peran penting dalam meningkatkan pertumbuhan, ketahanan hama, dan produktivitas tanaman pada lahan pertanian organik. Hasil uji laboratorium dan lapangan membuktikan bahwa isolat bakteri endofit mampu menghasilkan hormon pertumbuhan, melarutkan nutrisi, serta memberikan perlindungan terhadap serangan hama. Perlakuan dengan isolat bakteri, terutama kombinasi A+B, memberikan peningkatan signifikan pada parameter pertumbuhan vegetatif maupun hasil panen dibandingkan kelompok kontrol.

Analisis statistik menggunakan ANOVA dan uji lanjut *post-hoc* memperkuat temuan bahwa perbedaan antar perlakuan signifikan secara ilmiah. Kombinasi bakteri endofit terbukti lebih efektif daripada penggunaan isolat tunggal, yang menandakan adanya efek sinergis antar isolat dalam mendukung performa tanaman. Dengan demikian, aplikasi bakteri endofit dapat

menjadi strategi alternatif ramah lingkungan untuk mendukung ketahanan pangan berbasis pertanian organik.

Saran

Berdasarkan hasil penelitian, pemanfaatan bakteri endofit direkomendasikan sebagai bioinokulan dalam sistem pertanian organik. Kombinasi beberapa isolat bakteri perlu terus dikembangkan untuk memperoleh formula yang optimal dalam mendukung pertumbuhan tanaman dan meningkatkan hasil panen. Selain itu, perlu dilakukan penelitian lanjutan pada berbagai jenis komoditas pertanian agar potensi bakteri endofit dapat dimanfaatkan secara lebih luas. Untuk implementasi praktis, kolaborasi antara peneliti, petani, dan pemerintah sangat diperlukan agar teknologi berbasis mikroba dapat diadopsi secara berkelanjutan. Program pelatihan dan pendampingan bagi petani terkait penggunaan bioinokulan juga penting dilakukan guna mempercepat penerapan hasil penelitian ini. Dengan langkah tersebut, pemanfaatan bakteri endofit berpotensi mendukung transformasi menuju sistem pertanian yang lebih sehat, produktif, dan ramah lingkungan.

DAFTAR PUSTAKA

- Afzal, I., Shinwari, Z. K., Sikandar, S., & Shahzad, S. (2019). Plant beneficial endophytic bacteria: Mechanisms, diversity, host range and genetic determinants. *Microbiological Research*, 221, 36–49. <https://doi.org/10.1016/j.micres.2019.02.001>
- Ali, M., Ali, Q., Sohail, M. A., Ashraf, M. F., Saleem, M. H., Hussain, S., & Zhou, L. (2021). Diversity and taxonomic distribution of endophytic bacterial community in the rice plant and its prospective. *International Journal of Molecular Sciences*, 22(18), 10165. <https://doi.org/10.3390/ijms221810165>
- Anand, U., Pal, T., Yadav, N., Singh, V. K., Tripathi, V., Choudhary, K. K., Shukla, A. K., Sunita, K., Kumar, A., Bontempi, E., Ma, Y., Kolton, M., & Singh, A. K. (2023). Current scenario and future prospects of endophytic microbes: Promising candidates for abiotic and biotic stress management for agricultural and environmental sustainability. *Microbial Ecology*, 86(3), 1455–1486. <https://doi.org/10.1007/s00248-023-02190-1>
- Banerjee, S., Mitra, S., Velhal, M., Desmukh, V., & Ghosh, B. (2021). Impact of agrochemicals on the environment and human health: The concerns and remedies. *International Journal of Experimental Research and Review*, 26, 125–140. <https://doi.org/10.52756/ijerr.2021.v26.010>
- Berde, C. V., & Berde, V. B. (2021). Multifunctional attributes of endophytic *Pseudomonas* strains isolated from the leaves of medicinal plants. *Plant Science Today*, 8, 77–84. <https://doi.org/10.14719/PST.1597>

- Buddhika, U. V. A., & Abeysinghe, S. (2020). Plant endophytic microorganisms enhancing crop productivity and yield. In *New and Future Developments in Microbial Biotechnology and Bioengineering: Phytomicrobiome for Sustainable Agriculture* (pp. 45–53). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-64325-4.00005-5>
- Chandran, V., Shaji, H., & Mathew, L. (2020). Endophytic microbial influence on plant stress responses. In *Microbial Endophytes: Functional Biology and Applications* (pp. 161–193). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819654-0.00007-7>
- Chowhan, P., & Chakraborty, A. P. (2025). An overview of the role of endophytic bacteria as plant growth promoters and biocontrol agents against pathogens of different crop plants. In *Rhizosphere Engineering and Stress Resilience in Plants: Concepts and Applications* (pp. 76–94). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781003354109-5>
- Fu, L., Ling, S., Wu, D., Kang, M., Wang, F.-Y., & Sun, H. (2025). Parallel seeds: From foundation models to foundation intelligence for agricultural sustainability. *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, 12(3), 481–484. <https://doi.org/10.1109/JAS.2024.124914>
- Kannan, N., & Anandhi, A. (2020). Water management for sustainable food production. *Water*, 12(3), 778. <https://doi.org/10.3390/w12030778>
- Khan, M., Bibi, N., Ul Haq, Z., Wang, Z., Kalsoom, M., ur Rehman, F., & Zheng, J. (2025). Revolutionizing sustainable agriculture and medicinal plant cultivation in China through endophyte innovation. In *Natural Bioactives from the Endophytes of Medicinal Plants* (pp. 282–296). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781003486275-22>
- Kumar, S. S. (2024). Bioprospecting of endophytic diazotrophic microbes in sustainable agriculture: Review and prospects. *Research Journal of Biotechnology*, 19(7), 128–137. <https://doi.org/10.25303/1907rjbt1280137>
- Negi, R., Sharma, B., Kumar, S., Chaubey, K. K., Kaur, T., Devi, R., Yadav, A., Kour, D., & Yadav, A. N. (2024). Plant endophytes: Unveiling hidden applications toward agro-environment sustainability. *Folia Microbiologica*, 69(1), 181–206. <https://doi.org/10.1007/s12223-023-01092-6>
- Nimbulkar, P., Gupta, G., Virkhare, U., Althubiani, A. S., Dutta, A., & Kher, D. (2025). Bacterial endophytes and their secondary metabolites: Mechanisms of biosynthesis and applications in sustainable agriculture. *Journal of Umm Al-Qura University for Applied Sciences*. Advance online publication. <https://doi.org/10.1007/s43994-025-00233-6>
- Pandey, K., & Saharan, B. S. (2025). Potassium-solubilizing endophytes: Mechanisms and applications in enhancing sustainable agriculture and plant resilience. *Symbiosis*, 95(3), 291–305. <https://doi.org/10.1007/s13199-025-01052-3>
- Papik, J., Folkmanova, M., Polivkova-Majorova, M., Suman, J., & Uhlik, O. (2020). The invisible life inside plants: Deciphering the riddles of endophytic bacterial diversity. *Biotechnology Advances*, 44, 107614. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2020.107614>

- Roychoudhury, A., D' Rozario, A., & Gupta, R. (2025). Potential role of endophytes in sustainable agriculture. In *Microorganisms for Sustainability* (Vol. 52, pp. 195–216). Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-96-4004-1_10
- Salim, V., Sasidharan, A., & Kumar, R. (2023). Endophytic bacteria-mediated resistance to plant diseases: Bioengineering approaches. In *Biotechnology of Emerging Microbes: Prospects for Agriculture and Environment* (pp. 31–44). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-15397-6.00002-4>
- Sati, P., Sharma, E., Soni, R., Dhyani, P., Solanki, A. C., Solanki, M. K., Rai, S., & Malviya, M. K. (2022). Bacterial endophytes as bioinoculant: Microbial functions and applications toward sustainable farming. In *Microbial endophytes and plant growth: Beneficial interactions and applications* (pp. 167–181). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-90620-3.00008-8>
- Singh, J., Gupta, C., Suman, J., Anubhuti, & Rakshit, A. (2023). Organic farming is indispensable in addressing key future challenges. In *Organic Farming: Global Perspectives and Methods* (2nd ed., pp. 317–342). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-99145-2.00014-8>
- Tripathi, S., Srivastava, P., Devi, R. S., & Bhadouria, R. (2020). Influence of synthetic fertilizers and pesticides on soil health and soil microbiology. In M. N. V. Prasad & A. A. Warra (Eds.), *Agrochemicals detection, treatment and remediation: Pesticides and chemical fertilizers* (pp. 25–54). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-103017-2.00002-7>
- Warra, A. A., & Prasad, M. N. V. (2020). African perspective of chemical usage in agriculture and horticulture Their impact on human health and environment. In M. N. V. Prasad & A. A. Warra (Eds.), *Agrochemicals detection, treatment and remediation: Pesticides and chemical fertilizers* (pp. 401–436). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-103017-2.00016-7>
- Watts, D., Palombo, E. A., Jaimes Castillo, A., & Zaferanloo, B. (2023). Endophytes in agriculture: Potential to improve yields and tolerances of agricultural crops. *Microorganisms*, 11(5), 1276. <https://doi.org/10.3390/microorganisms11051276>
- Wijesinghe, J., Botheju, S. M., & Dayananda, N. R. (2025). Coastal and marine pollution from agricultural activities: Fertilizers and pesticides. In *Coastal and marine pollution: Source to sink, mitigation and management* (pp. 89–110). Wiley. <https://doi.org/10.1002/9781394237029.ch5>