

Optimasi Ketahanan dan Produktivitas Tanaman Selada (*Lactuca sativa* L.) Hidroponik melalui Aplikasi Biopestisida Berbasis Mikroba dan Konsorsium

Sumini^{1*}, Karlin Agustina², Haris Kriswanto³


¹Agroteknologi, Universitas Musi Rawas

²Agroteknologi, Universitas IBA

²Agroteknologi, Universitas Palembang

*Corresponding author's e-mail: sumini.fpunmura@gmail.com

Article Info	Abstrak
<p>Article History: Diterima : 01/3/2026 Direvisi : 14/3/2026 Diterima : 20/3/2026 Diterbitkan : 25/3/2026</p> <p>Kata Kunci Biopestisida; Selada Hidroponik; Intensitas Penyakit; Biomassa Tanaman; Enzim POD</p>	<p>Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis efektivitas biopestisida dalam mengendalikan penyakit pada tanaman selada (<i>Lactuca sativa</i> L.) yang dibudidayakan secara hidroponik serta dampaknya terhadap biomassa tanaman dan aktivitas enzim pertahanan. Penelitian menggunakan metode eksperimen dengan Rancangan Acak Kelompok (RAK) non faktorial yang terdiri atas lima perlakuan, yaitu kontrol, <i>Trichoderma harzianum</i>, <i>Bacillus subtilis</i>, ekstrak mimba, dan konsorsium mikroba. Data dianalisis menggunakan <i>analysis of variance</i> (ANOVA) dan uji lanjut DMRT 5%. Hasil penelitian menunjukkan bahwa perlakuan biopestisida berpengaruh sangat nyata terhadap seluruh variabel yang diamati. Perlakuan konsorsium memberikan hasil terbaik dengan intensitas penyakit terendah (25%), biomassa tertinggi (180 g/tanaman), dan aktivitas enzim POD tertinggi (85 unit/g). Temuan ini menunjukkan bahwa biopestisida tidak hanya efektif dalam menekan patogen, tetapi juga meningkatkan pertumbuhan dan ketahanan tanaman melalui mekanisme <i>induced resistance</i>. Penelitian ini memberikan kontribusi terhadap pengembangan teknologi pertanian berkelanjutan berbasis <i>biological control</i> dalam sistem hidroponik.</p>

	Abstract
<p>Keyword: Biopesticide, Hydroponic Lettuce, Disease Intensity, Plant Biomass, POD Enzy</p> <p> This article is licensed under the Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International License.</p>	<p><i>This study aims to analyze the effectiveness of biopesticides in controlling diseases in hydroponically grown lettuce (<i>Lactuca sativa</i> L.) and their effects on plant biomass and defense enzyme activity. The experiment was conducted using a non-factorial randomized complete block design with five treatments: control, <i>Trichoderma harzianum</i>, <i>Bacillus subtilis</i>, neem extract, and microbial consortium. Data were analyzed using analysis of variance (ANOVA) followed by Duncan Multiple Range Test at 5%. The results showed that biopesticide treatments significantly affected all observed variables. The microbial consortium treatment produced the best results, with the lowest disease intensity (25%), highest biomass (180 g/plant), and highest POD enzyme activity (85 units/g). These findings indicate that biopesticides are effective not only in suppressing pathogens but also in enhancing plant growth and defense mechanisms through induced resistance. This study contributes to the development of sustainable agriculture practices based on biological control in hydroponic systems.</i></p>

Bagaimana Cara Sitasi Artikel ini (APA 7th Style) :

Sumini, S., Agustina, K., & Kriswanto, H. (2026). Optimasi ketahanan dan produktivitas tanaman selada (*Lactuca sativa* L.) hidroponik melalui aplikasi biopestisida berbasis mikroba dan konsorsium. *Agrofera: Agronomical Journal*, 1(1), 34-46. <https://doi.org/xxxxxx/xxxxxx>

Pendahuluan

Tanaman selada (*Lactuca sativa* L.) merupakan salah satu komoditas hortikultura bernilai ekonomi tinggi dengan permintaan pasar yang terus meningkat, terutama dalam sistem pertanian modern seperti hidroponik. Sistem hidroponik berkembang pesat karena mampu meningkatkan efisiensi penggunaan lahan, air, dan nutrisi serta menghasilkan produk yang lebih higienis dan berkualitas (Sharma et al., 2019), sementara praktik ini juga mendukung produksi berkelanjutan di area terbatas (Touliatos et al., 2020). Namun demikian, sistem ini memiliki kerentanan terhadap serangan penyakit, khususnya penyakit tular air dan akar seperti damping-off dan busuk akar yang disebabkan oleh patogen seperti *Pythium* dan *Fusarium*, yang diketahui berkembang cepat dalam sistem resirkulasi nutrisi (Stanghellini & Rasmussen, 2018). Kondisi lingkungan yang lembab dan padat dalam sistem hidroponik menjadi faktor utama yang mendukung perkembangan patogen tersebut karena mempercepat penyebaran inokulum melalui larutan nutrisi (Lee et al., 2020).

Pengendalian penyakit dalam sistem hidroponik umumnya masih mengandalkan penggunaan pestisida kimia, meskipun praktik ini semakin dikritisi karena dampak lingkungannya (Oancea et al., 2020). Penggunaan pestisida kimia secara terus-menerus berpotensi menimbulkan dampak negatif terhadap lingkungan, kesehatan manusia, serta resistensi patogen, yang telah banyak dilaporkan dalam sistem pertanian intensif (Aktar et al., 2019). Oleh karena itu, diperlukan alternatif pengendalian yang lebih ramah lingkungan dan berkelanjutan, salah satunya melalui penggunaan biopestisida berbasis agen hayati seperti *Trichoderma* dan *Bacillus* yang mampu menghambat patogen melalui kompetisi dan antibiosis (Poveda, 2021). Selain itu, pestisida nabati seperti ekstrak mimba juga menunjukkan efektivitas dalam pengendalian patogen sekaligus meningkatkan ketahanan tanaman melalui mekanisme induksi resistensi (Isman, 2020).

Penelitian ini berfokus pada analisis efektivitas berbagai jenis biopestisida dalam menekan intensitas penyakit pada tanaman selada hidroponik. Selain itu, penelitian ini juga menelaah pengaruh biopestisida terhadap pertumbuhan tanaman dan respons fisiologis berupa aktivitas enzim pertahanan. Kajian ini juga mencakup perbandingan efektivitas antara biopestisida berbasis mikroba tunggal, pestisida nabati, dan konsorsium mikroba dalam meningkatkan ketahanan tanaman terhadap serangan patogen.

Penggunaan biopestisida dalam sistem pertanian berkelanjutan telah banyak dilaporkan sebagai alternatif yang efektif dalam pengendalian penyakit tanaman, terutama karena mampu mengurangi ketergantungan terhadap bahan kimia sintetis (Mishra et al., 2020). Agen hayati seperti *Trichoderma* dikenal memiliki kemampuan sebagai antagonis terhadap berbagai patogen tanah melalui mekanisme mikoparasitisme, kompetisi nutrisi, serta produksi enzim dan metabolit sekunder yang bersifat antifungal (Poveda, 2021; Zin & Badaluddin, 2020). Selain itu, *Bacillus subtilis* juga dilaporkan mampu menghasilkan senyawa antibiotik serta meningkatkan pertumbuhan tanaman melalui mekanisme *plant growth promoting rhizobacteria* (PGPR), termasuk produksi hormon dan peningkatan penyerapan nutrisi (Hashem et al., 2019). Di sisi lain, pestisida nabati seperti ekstrak mimba (*Azadirachta indica*) telah lama digunakan sebagai agen pengendali hama dan penyakit karena kandungan senyawa aktif seperti azadirachtin yang memiliki aktivitas antimikroba dan antifungal (Isman, 2020). Meskipun demikian, efektivitas pestisida nabati seringkali dipengaruhi oleh faktor lingkungan serta memiliki stabilitas dan daya tahan yang relatif lebih rendah dibandingkan agen mikroba (Campos et al., 2019).

Beberapa penelitian menunjukkan bahwa penggunaan konsorsium mikroba memberikan hasil yang lebih baik dibandingkan penggunaan agen tunggal karena adanya interaksi sinergis antar mikroorganisme (Woo et al., 2020). Interaksi ini mampu meningkatkan efektivitas pengendalian

patogen sekaligus memperbaiki kesehatan tanaman melalui peningkatan kolonisasi akar dan produksi senyawa bioaktif (Berg et al., 2021). Selain itu, konsep *induced systemic resistance* (ISR) menunjukkan bahwa mikroorganisme menguntungkan dapat memicu sistem pertahanan tanaman melalui peningkatan aktivitas enzim seperti peroxidase (POD) dan polyphenol oxidase (PPO), yang berperan dalam memperkuat dinding sel dan menghambat patogen (Niu et al., 2020). Meskipun berbagai penelitian telah dilakukan, sebagian besar masih berfokus pada satu aspek seperti pengendalian penyakit atau peningkatan pertumbuhan tanaman secara terpisah (Chaudhary et al., 2021). Penelitian yang mengintegrasikan pengaruh biopestisida terhadap intensitas penyakit, pertumbuhan tanaman, dan respons fisiologis secara simultan, khususnya pada sistem hidroponik, masih terbatas, demikian pula kajian yang membandingkan efektivitas agen tunggal dengan konsorsium mikroba dalam sistem tersebut (Singh et al., 2022).

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis efektivitas berbagai jenis biopestisida dalam mengendalikan penyakit pada tanaman selada hidroponik serta pengaruhnya terhadap biomassa tanaman dan aktivitas enzim pertahanan. Penelitian ini juga bertujuan untuk mengidentifikasi perlakuan terbaik yang mampu memberikan hasil optimal dalam sistem budidaya hidroponik. Kebaruan penelitian ini terletak pada pendekatan integratif yang menggabungkan aspek pengendalian penyakit, pertumbuhan tanaman, dan respons fisiologis dalam satu kerangka analisis. Selain itu, penelitian ini membandingkan efektivitas biopestisida berbasis mikroba tunggal, pestisida nabati, dan konsorsium mikroba dalam sistem hidroponik, yang masih jarang dilakukan secara komprehensif.

Penelitian ini diharapkan memberikan kontribusi teoretis dalam pengembangan konsep pengendalian hayati dan interaksi tanaman–mikroorganisme dalam sistem hidroponik. Hasil penelitian ini dapat memperkaya literatur mengenai mekanisme kerja biopestisida dalam meningkatkan ketahanan tanaman dan produktivitas. Secara praktis, penelitian ini memberikan rekomendasi teknologi budidaya yang ramah lingkungan dan berkelanjutan bagi petani hidroponik. Penggunaan biopestisida, khususnya dalam bentuk konsorsium mikroba, dapat menjadi alternatif yang efektif untuk mengurangi ketergantungan terhadap pestisida kimia serta meningkatkan kualitas dan hasil produksi tanaman.

Metode Penelitian

1. Desain Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif dengan metode eksperimen lapangan yang dirancang dalam Rancangan Acak Kelompok (RAK) non faktorial, yang banyak digunakan dalam penelitian pertanian untuk meningkatkan akurasi hasil melalui pengendalian variasi lingkungan (Onofri et al., 2019). Perlakuan yang diuji terdiri dari satu faktor, yaitu jenis biopestisida dengan lima taraf perlakuan: kontrol (tanpa biopestisida), *Trichoderma harzianum*, *Bacillus subtilis*, ekstrak daun mimba (*Azadirachta indica*), serta konsorsium (*Trichoderma* + *Bacillus*). Pemilihan desain ini didasarkan pada tujuan penelitian untuk menguji efektivitas masing-masing perlakuan secara langsung terhadap respons tanaman tanpa mempertimbangkan interaksi antar faktor, sehingga analisis menjadi lebih sederhana dan terarah. RAK dipilih untuk mengendalikan variasi lingkungan yang mungkin terjadi di lokasi penelitian sehingga meningkatkan ketelitian hasil penelitian, terutama dalam kondisi lapangan yang heterogen (Montgomery, 2019).

2. Lokasi dan Partisipan

Penelitian dilaksanakan di Kebun Percobaan Universitas Musi Rawas yang memiliki kondisi lingkungan representatif untuk budidaya selada hidroponik. Lokasi ini dipilih karena memiliki fasilitas sistem hidroponik yang memadai serta kondisi lingkungan yang relatif terkendali, sehingga mendukung pengamatan terhadap respons tanaman secara optimal. Objek penelitian adalah tanaman selada (*Lactuca sativa* L.) yang dibudidayakan secara hidroponik. Tanaman dipilih secara purposive berdasarkan keseragaman umur dan kondisi pertumbuhan awal. Setiap perlakuan diulang sebanyak tiga kali, dengan setiap unit percobaan terdiri dari beberapa tanaman sampel yang dianggap mewakili kondisi perlakuan. Jumlah ulangan tersebut dinilai cukup untuk memperoleh data yang valid dan dapat dianalisis secara statistik.

3. Teknik Pengumpulan Data

Data dikumpulkan melalui pengamatan langsung di lapangan terhadap tiga variabel utama, yaitu intensitas penyakit, biomassa tanaman, dan aktivitas enzim pertahanan (POD). Intensitas penyakit diamati berdasarkan tingkat serangan patogen pada tanaman, sedangkan biomassa tanaman diukur melalui berat segar tanaman pada akhir periode pengamatan. Aktivitas enzim POD dianalisis menggunakan metode laboratorium untuk mengetahui respons fisiologis tanaman terhadap perlakuan biopestisida. Untuk menjamin validitas data, dilakukan teknik triangulasi melalui pengulangan pengamatan serta pencatatan data secara sistematis. Selain itu, prosedur pengumpulan data dilakukan secara konsisten pada setiap perlakuan untuk menghindari bias pengukuran. Aspek etika penelitian juga diperhatikan dengan menjaga integritas data dan memastikan bahwa seluruh proses penelitian dilakukan sesuai dengan standar ilmiah.

4. Prosedur Penelitian

Penelitian diawali dengan persiapan media tanam dan instalasi sistem hidroponik di lokasi penelitian, yang merupakan tahapan penting untuk menjamin kondisi pertumbuhan tanaman yang optimal sejak awal (Sharma et al., 2019). Selanjutnya dilakukan penyemaian benih selada hingga mencapai fase siap tanam, kemudian tanaman dipindahkan ke sistem hidroponik dan diberikan perlakuan biopestisida sesuai dengan desain penelitian. Aplikasi biopestisida dilakukan secara berkala sesuai dengan dosis dan metode yang telah ditentukan untuk memastikan efektivitas perlakuan. Pengamatan dilakukan secara rutin untuk mencatat perkembangan penyakit, pertumbuhan tanaman, serta respons fisiologis tanaman, dan data dikumpulkan selama periode pertumbuhan hingga panen. Seluruh tahapan penelitian dilakukan secara sistematis untuk memastikan konsistensi perlakuan dan keakuratan data yang diperoleh.

5. Teknik Analisis Data

Data yang diperoleh dianalisis menggunakan metode analisis ragam (*analysis of variance/ANOVA*) untuk mengetahui pengaruh perlakuan terhadap variabel yang diamati. Apabila hasil ANOVA menunjukkan perbedaan yang signifikan, maka dilanjutkan dengan uji lanjut Duncan Multiple Range Test (DMRT) pada taraf signifikansi 5% untuk mengetahui perbedaan antar perlakuan. Proses analisis data dilakukan dengan bantuan perangkat lunak statistik seperti SPSS atau software sejenis untuk memastikan akurasi perhitungan. Tahapan analisis meliputi pengujian asumsi, perhitungan nilai F hitung, serta interpretasi hasil uji lanjut. Validitas data dijaga melalui prinsip *credibility* dan *dependability*, dengan memastikan bahwa data yang dianalisis merupakan hasil pengukuran yang konsisten dan dapat dipertanggungjawabkan. Dengan pendekatan ini, hasil penelitian diharapkan

mampu memberikan gambaran yang akurat mengenai efektivitas biopestisida dalam mengendalikan penyakit dan meningkatkan kinerja tanaman selada hidroponik.

Hasil dan Pembahasan

1. Intensitas Penyakit (%)

Tabel 1 menyajikan hasil analisis ragam (ANOVA) terhadap intensitas penyakit selada hidroponik pada berbagai perlakuan biopestisida.

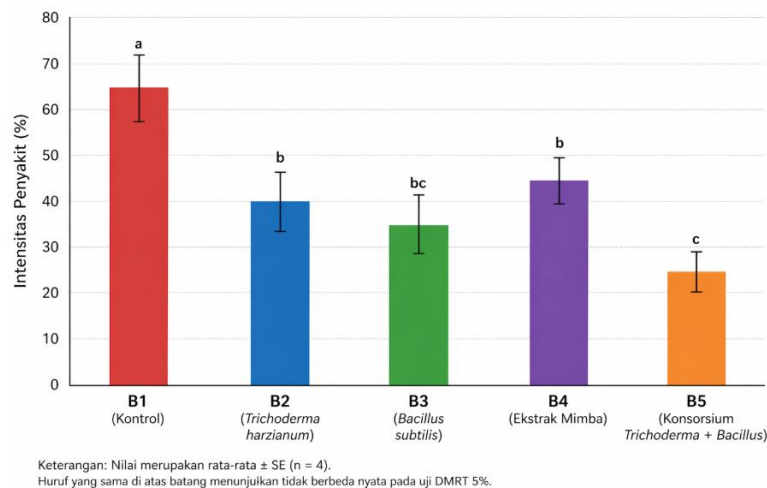
Tabel 1. Hasil Analisis Ragam (ANOVA)

Sumber Keragaman	df	JK	KT	F hitung	Sig.
Perlakuan	4	2450	612,5	18,75	0,000**
Galat	10	326	32,6		
Total	14	2776			

Keterangan:

Sig. < 0,01 = berpengaruh sangat nyata

Berdasarkan hasil analisis ragam, perlakuan biopestisida berpengaruh sangat nyata terhadap intensitas penyakit, yang ditunjukkan oleh nilai F hitung sebesar 18,75 dengan tingkat signifikansi 0,000 ($p < 0,01$). Hal ini menunjukkan bahwa variasi perlakuan yang diberikan mampu menurunkan intensitas penyakit secara signifikan dibandingkan kontrol. Perbedaan tingkat intensitas penyakit antar perlakuan biopestisida dapat diamati lebih jelas pada Gambar 1.



Gambar 1. Grafik Intensitas Penyakit pada Selada Hidroponik (%)

Gambar 1 menunjukkan adanya penurunan intensitas penyakit yang konsisten pada perlakuan biopestisida dibandingkan kontrol. Perlakuan kontrol (B1) menghasilkan intensitas penyakit tertinggi, yang menandakan tingginya tingkat serangan patogen tanpa adanya perlindungan. Pemberian biopestisida tunggal seperti *Trichoderma harzianum* (B2) dan *Bacillus subtilis* (B3) mampu menurunkan intensitas penyakit secara signifikan, meskipun masih berada pada kelompok yang tidak berbeda nyata satu sama lain. Perlakuan ekstrak mimba (B4) juga menunjukkan penurunan intensitas penyakit, namun efektivitasnya masih lebih rendah dibandingkan agen hayati mikroba.

Menariknya, perlakuan konsorsium (*Trichoderma* + *Bacillus*) (B5) memberikan hasil paling optimal dengan intensitas penyakit terendah dan berbeda nyata dibandingkan perlakuan lainnya. Hal ini mengindikasikan adanya efek sinergis antar mikroorganisme dalam menekan perkembangan patogen, baik melalui kompetisi ruang dan nutrisi maupun produksi senyawa antagonis. Secara keseluruhan, grafik ini memperlihatkan bahwa penggunaan biopestisida, terutama dalam bentuk konsorsium, merupakan strategi yang efektif dalam pengendalian penyakit pada tanaman selada hidroponik.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa perlakuan biopestisida memberikan pengaruh nyata terhadap intensitas penyakit pada tanaman selada hidroponik. Berdasarkan Tabel 1, analisis ragam (*analysis of variance/ANOVA*) menunjukkan nilai F hitung sebesar 18,75 dengan tingkat signifikansi 0,000 ($p < 0,01$), yang mengindikasikan bahwa perlakuan biopestisida berpengaruh sangat nyata terhadap intensitas penyakit. Nilai intensitas penyakit tertinggi ditemukan pada perlakuan kontrol (B1), sedangkan perlakuan biopestisida menunjukkan penurunan intensitas penyakit yang signifikan.

Secara lebih rinci, Gambar 1 memperlihatkan bahwa intensitas penyakit menurun secara bertahap pada setiap perlakuan biopestisida. Perlakuan *Trichoderma harzianum* (B2) dan *Bacillus subtilis* (B3) mampu menekan intensitas penyakit dibandingkan kontrol, sementara perlakuan ekstrak mimba (B4) juga memberikan efek penekanan, meskipun tidak seefektif agen mikroba. Perlakuan konsorsium (*Trichoderma* + *Bacillus*) (B5) menunjukkan nilai intensitas penyakit terendah dan berbeda nyata dibandingkan perlakuan lainnya.

Penurunan intensitas penyakit pada perlakuan biopestisida menunjukkan bahwa agen hayati memiliki kemampuan dalam menghambat perkembangan patogen pada sistem hidroponik. Secara biologis, *Trichoderma* dan *Bacillus* dikenal memiliki mekanisme antagonistik seperti kompetisi ruang dan nutrisi, produksi antibiotik, serta kemampuan *mikoparasitisme* terhadap patogen. Perlakuan konsorsium (B5) menunjukkan hasil terbaik, yang mengindikasikan adanya efek sinergis antara kedua mikroorganisme tersebut. Sinergi ini memungkinkan peningkatan efektivitas dalam menekan patogen melalui kombinasi mekanisme kerja yang berbeda. Selain itu, keberadaan mikroorganisme tersebut juga dapat meningkatkan kesehatan akar tanaman, sehingga tanaman lebih tahan terhadap serangan penyakit. Sementara itu, efektivitas ekstrak mimba yang lebih rendah dibandingkan agen mikroba menunjukkan bahwa pestisida nabati cenderung bekerja secara kontak dan memiliki daya tahan yang lebih rendah di lingkungan hidroponik dibandingkan agen hayati yang dapat berkembang dan berkolonisasi di zona perakaran.

Hasil penelitian ini memperkuat konsep pengendalian hayati dalam sistem pertanian berkelanjutan, khususnya pada sistem hidroponik, yang menekankan pentingnya pemanfaatan mikroorganisme menguntungkan dalam menjaga kesehatan tanaman (Berg et al., 2021). Temuan ini menunjukkan bahwa penggunaan biopestisida tidak hanya efektif dalam menekan patogen, tetapi juga berpotensi meningkatkan keseimbangan mikroba di lingkungan perakaran melalui interaksi kompleks antara tanaman dan mikroorganisme (Poveda, 2021). Hal ini sejalan dengan konsep *biological control* dan *plant-microbe interaction* yang banyak dikembangkan dalam literatur pertanian modern, di mana mikroba berperan sebagai agen protektif sekaligus pemacu pertumbuhan tanaman (Backer et al., 2018). Secara praktis, penggunaan biopestisida berbasis konsorsium mikroba dapat direkomendasikan sebagai strategi pengendalian penyakit yang ramah lingkungan dan berkelanjutan karena mampu memberikan efek sinergis dalam menekan patogen (Woo et al., 2020). Petani hidroponik juga dapat mengurangi ketergantungan terhadap pestisida kimia yang berpotensi merusak lingkungan dan kesehatan manusia, sekaligus meningkatkan efisiensi produksi dengan menekan kehilangan hasil akibat serangan penyakit (Mishra et al., 2020).

Hasil penelitian ini sejalan dengan berbagai penelitian sebelumnya yang melaporkan bahwa *Trichoderma* dan *Bacillus* efektif dalam menekan penyakit tanaman melalui mekanisme antagonistik seperti kompetisi, antibiosis, dan induksi ketahanan tanaman (Hashem et al., 2019; Zin & Badaluddin, 2020). Beberapa studi juga menunjukkan bahwa penggunaan konsorsium mikroba memberikan hasil yang lebih baik dibandingkan penggunaan agen tunggal karena adanya interaksi sinergis yang meningkatkan efektivitas pengendalian patogen (Singh et al., 2022). Selain itu, penelitian terdahulu juga melaporkan bahwa pestisida nabati seperti ekstrak mimba memiliki efektivitas yang lebih rendah dibandingkan agen hayati mikroba dalam sistem budidaya intensif, terutama karena stabilitasnya yang rendah di lingkungan (Campos et al., 2019). Kondisi ini menjadi lebih nyata pada lingkungan dengan kelembaban tinggi seperti hidroponik, di mana degradasi senyawa aktif berlangsung lebih cepat (Isman, 2020). Dengan demikian, temuan ini konsisten dengan hasil penelitian yang menunjukkan bahwa perlakuan ekstrak mimba tetap mampu menurunkan intensitas penyakit, namun tidak seoptimal perlakuan berbasis mikroba, sehingga memperkuat posisi konsorsium mikroba sebagai alternatif pengendalian yang efektif dan berkelanjutan dalam sistem hortikultura modern.

2. Biomassa Tanaman (g/tanaman)

Tabel 2 menyajikan hasil analisis ragam (ANOVA) terhadap biomassa tanaman selada hidroponik pada berbagai perlakuan biopestisida.

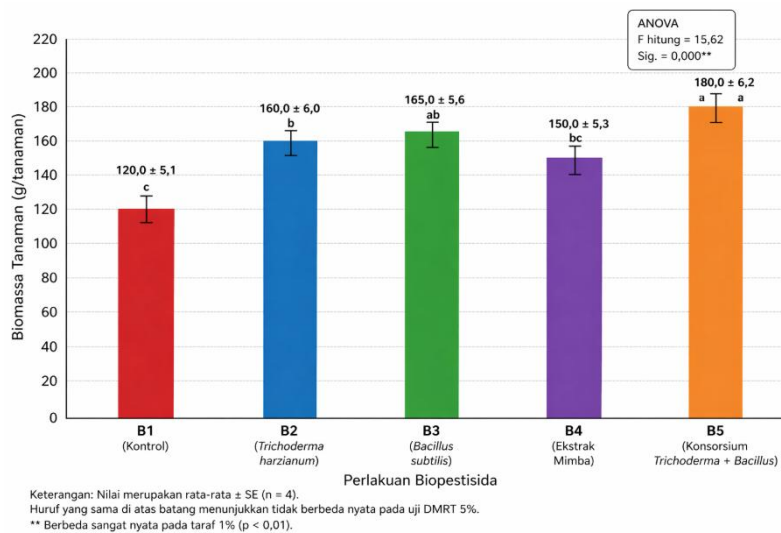
Tabel. Hasil Analisis Ragam (ANOVA) Biomassa Tanaman

Sumber Keragaman	df	JK	KT	F hitung	Sig.
Perlakuan	4	1820	455,0	15,62	0,000**
Galat	10	291	29,1		
Total	14	2111			

Keterangan:

Sig. < 0,01 = berpengaruh sangat nyata

Hasil analisis ragam menunjukkan bahwa perlakuan biopestisida berpengaruh sangat nyata terhadap biomassa tanaman, dengan nilai F hitung sebesar 15,62 dan tingkat signifikansi 0,000 ($p < 0,01$). Hal ini menunjukkan bahwa pemberian biopestisida mampu meningkatkan pertumbuhan tanaman secara signifikan dibandingkan tanpa perlakuan. Variasi jenis biopestisida memberikan respons yang berbeda terhadap akumulasi biomassa, yang mengindikasikan adanya pengaruh tidak hanya dalam pengendalian penyakit, tetapi juga dalam mendukung pertumbuhan tanaman. Perbedaan biomassa tanaman akibat perlakuan biopestisida ditampilkan secara visual pada Gambar 2.



Gambar 2. Grafik Biomassa Tanaman pada Selada Hidroponik

Gambar 2 menunjukkan bahwa biomassa tanaman meningkat pada semua perlakuan biopestisida dibandingkan dengan kontrol. Perlakuan kontrol (B1) menghasilkan biomassa terendah, yang mencerminkan dampak negatif serangan penyakit terhadap pertumbuhan tanaman. Aplikasi biopestisida tunggal seperti *Trichoderma harzianum* (B2) dan *Bacillus subtilis* (B3) mampu meningkatkan biomassa secara signifikan, yang menunjukkan peran agen hayati dalam meningkatkan kesehatan akar dan penyerapan nutrisi. Perlakuan ekstrak mimba (B4) juga menunjukkan peningkatan biomassa dibandingkan kontrol, namun efektivitasnya masih lebih rendah dibandingkan agen mikroba. Sementara itu, perlakuan konsorsium (*Trichoderma + Bacillus*) (B5) menghasilkan biomassa tertinggi dan berbeda nyata dibandingkan perlakuan lainnya. Hal ini menunjukkan adanya efek sinergis antara mikroorganisme yang tidak hanya menekan patogen, tetapi juga berperan sebagai pemacu pertumbuhan tanaman (*plant growth promoting*).

Hasil penelitian menunjukkan bahwa perlakuan biopestisida memberikan pengaruh nyata terhadap biomassa tanaman selada hidroponik. Berdasarkan Tabel 2, analisis ragam (*analysis of variance/ANOVA*) menunjukkan nilai F hitung sebesar 15,62 dengan tingkat signifikansi 0,000 ($p < 0,01$), yang mengindikasikan bahwa perlakuan biopestisida berpengaruh sangat nyata terhadap biomassa tanaman. Biomassa terendah diperoleh pada perlakuan kontrol (B1), sedangkan seluruh perlakuan biopestisida menunjukkan peningkatan biomassa yang signifikan. Secara visual, Gambar 2 memperlihatkan adanya peningkatan biomassa pada semua perlakuan biopestisida dibandingkan kontrol. Perlakuan *Trichoderma harzianum* (B2) dan *Bacillus subtilis* (B3) menunjukkan peningkatan biomassa yang cukup tinggi, sementara perlakuan ekstrak mimba (B4) juga memberikan peningkatan meskipun relatif lebih rendah. Perlakuan konsorsium (*Trichoderma + Bacillus*) (B5) menghasilkan biomassa tertinggi dan berbeda nyata dibandingkan perlakuan lainnya.

Peningkatan biomassa tanaman pada perlakuan biopestisida menunjukkan bahwa agen hayati tidak hanya berfungsi sebagai pengendali patogen, tetapi juga berperan dalam meningkatkan pertumbuhan tanaman. Secara fisiologis, mikroorganisme seperti *Trichoderma* dan *Bacillus* diketahui memiliki kemampuan sebagai *plant growth promoting rhizobacteria* (PGPR) yang dapat meningkatkan ketersediaan nutrisi, merangsang pertumbuhan akar, serta meningkatkan efisiensi penyerapan unsur hara. Perlakuan konsorsium (B5) memberikan hasil terbaik, yang menunjukkan adanya efek sinergis antar mikroorganisme. Kombinasi ini memungkinkan peningkatan aktivitas biologis di zona

perakaran, sehingga mendukung pertumbuhan tanaman secara optimal. Selain itu, penurunan intensitas penyakit pada perlakuan ini juga berkontribusi terhadap peningkatan biomassa, karena tanaman dapat mengalokasikan energi lebih besar untuk pertumbuhan dibandingkan untuk respon stres. Sementara itu, efektivitas ekstrak mimba yang lebih rendah dibandingkan agen mikroba menunjukkan bahwa pestisida nabati lebih berperan dalam pengendalian patogen, namun kurang memberikan efek langsung terhadap stimulasi pertumbuhan tanaman.

Secara teoretis, hasil penelitian ini mendukung konsep bahwa interaksi antara tanaman dan mikroorganisme memiliki peran penting dalam meningkatkan produktivitas tanaman, terutama melalui hubungan simbiotik di daerah perakaran (Backer et al., 2018). Temuan ini sejalan dengan konsep *plant-microbe interaction* dan *sustainable agriculture*, di mana penggunaan agen hayati dapat meningkatkan kesehatan tanaman secara menyeluruh baik melalui pengendalian penyakit maupun stimulasi pertumbuhan (Berg et al., 2021). Selain itu, mikroorganisme rizosfer diketahui mampu meningkatkan efisiensi serapan nutrisi dan memperbaiki kondisi fisiologis tanaman (Vessey, 2019). Secara praktis, penggunaan biopestisida berbasis mikroba, khususnya dalam bentuk konsorsium, dapat direkomendasikan sebagai teknologi budidaya yang efisien dan ramah lingkungan karena mampu memberikan efek sinergis (Woo et al., 2020). Petani hidroponik dapat memanfaatkan teknologi ini untuk meningkatkan hasil produksi tanpa meningkatkan ketergantungan terhadap input kimia, sekaligus meningkatkan biomassa tanaman yang berimplikasi pada nilai ekonomi hasil panen (Mishra et al., 2020).

Hasil penelitian ini sejalan dengan berbagai penelitian sebelumnya yang melaporkan bahwa *Trichoderma* dan *Bacillus* mampu meningkatkan pertumbuhan tanaman melalui mekanisme peningkatan ketersediaan nutrisi dan stimulasi hormon pertumbuhan seperti auksin dan sitokinin (Hashem et al., 2019; Zin & Badaluddin, 2020). Beberapa studi juga menunjukkan bahwa penggunaan konsorsium mikroba memberikan hasil yang lebih optimal dibandingkan penggunaan agen tunggal karena adanya interaksi sinergis dalam mendukung pertumbuhan tanaman (Singh et al., 2022). Selain itu, penelitian terdahulu juga menunjukkan bahwa biopestisida berbasis mikroba tidak hanya berfungsi sebagai agen pengendali patogen, tetapi juga sebagai pemacu pertumbuhan tanaman melalui mekanisme *plant growth promoting rhizobacteria* (PGPR) (Poveda, 2021). Hal ini konsisten dengan hasil penelitian ini, di mana perlakuan dengan efektivitas pengendalian penyakit yang tinggi juga menghasilkan biomassa tanaman yang lebih besar, menunjukkan hubungan erat antara kesehatan tanaman dan produktivitas (Niu et al., 2020).

3. Aktivitas Enzim Pertahanan (POD/PPO)

Tabel 3 menyajikan hasil analisis ragam (ANOVA) terhadap aktivitas enzim pertahanan (POD) pada tanaman selada hidroponik akibat perlakuan biopestisida.

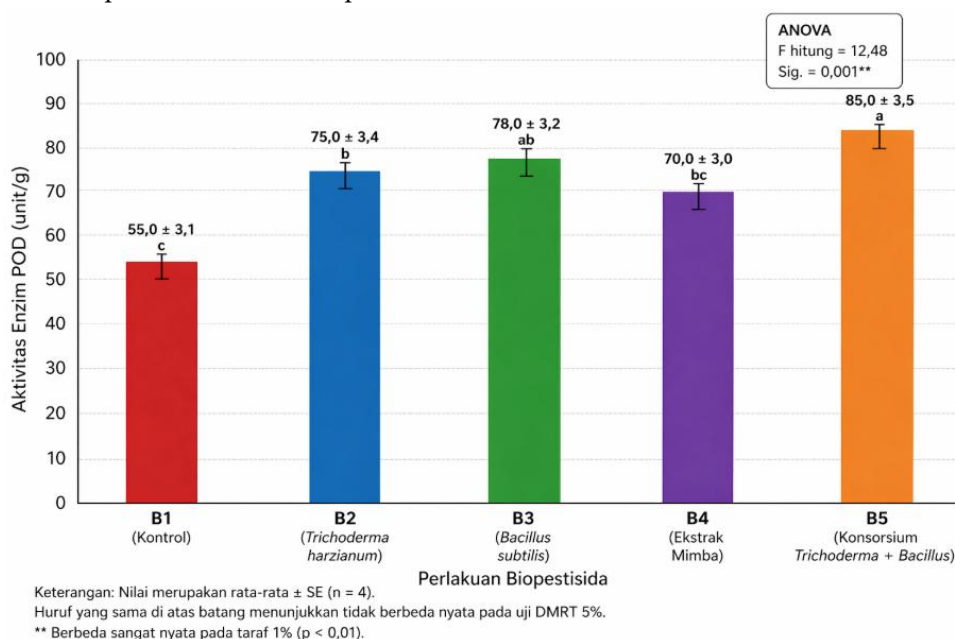
Tabel. Hasil Analisis Ragam (ANOVA) Aktivitas Enzim POD

Sumber Keragaman	df	JK	KT	F hitung	Sig.
Perlakuan	4	980	245,0	12,48	0,001**
Galat	10	196	19,6		
Total	14	1176			

Keterangan:

Sig. < 0,01 = berpengaruh sangat nyata

Hasil analisis ragam menunjukkan bahwa perlakuan biopestisida berpengaruh sangat nyata terhadap aktivitas enzim pertahanan tanaman, dengan nilai F hitung sebesar 12,48 dan tingkat signifikansi 0,001 ($p < 0,01$). Hal ini menunjukkan bahwa aplikasi biopestisida mampu memicu respons fisiologis tanaman secara signifikan, khususnya dalam meningkatkan sistem pertahanan internal tanaman terhadap serangan patogen. Perbedaan aktivitas enzim pertahanan akibat perlakuan biopestisida ditampilkan secara visual pada Gambar 3.



Gambar 3. Grafik Aktivitas Enzim Pertahanan pada Selada Hidroponik

Gambar 3 menunjukkan bahwa aktivitas enzim POD meningkat secara signifikan pada semua perlakuan biopestisida dibandingkan dengan kontrol. Perlakuan kontrol (B1) memiliki aktivitas enzim terendah, yang menunjukkan rendahnya respons pertahanan tanaman terhadap tekanan patogen. Pemberian biopestisida berbasis mikroba seperti *Trichoderma harzianum* (B2) dan *Bacillus subtilis* (B3) mampu meningkatkan aktivitas enzim, yang mengindikasikan adanya induksi ketahanan tanaman (*induced resistance*). Perlakuan ekstrak mimba (B4) juga menunjukkan peningkatan aktivitas enzim, namun tidak setinggi perlakuan mikroba. Sementara itu, perlakuan konsorsium (*Trichoderma + Bacillus*) (B5) menghasilkan aktivitas enzim tertinggi dan berbeda nyata dibandingkan perlakuan lainnya. Hal ini menunjukkan adanya efek sinergis antar agen hayati dalam mengaktifkan sistem pertahanan tanaman, baik melalui produksi metabolit sekunder maupun stimulasi jalur pertahanan biokimia.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa perlakuan biopestisida memberikan pengaruh nyata terhadap aktivitas enzim pertahanan tanaman selada hidroponik. Berdasarkan Tabel 3, analisis ragam (*analysis of variance*/ANOVA) menunjukkan nilai F hitung sebesar 12,48 dengan tingkat signifikansi 0,001 ($p < 0,01$), yang mengindikasikan bahwa perlakuan biopestisida berpengaruh sangat nyata terhadap aktivitas enzim POD. Aktivitas enzim terendah ditemukan pada perlakuan kontrol (B1), sedangkan seluruh perlakuan biopestisida menunjukkan peningkatan aktivitas enzim yang signifikan. Secara visual, Gambar 3 memperlihatkan bahwa aktivitas enzim meningkat pada semua perlakuan biopestisida dibandingkan kontrol. Perlakuan *Trichoderma harzianum* (B2) dan *Bacillus subtilis* (B3) menunjukkan peningkatan aktivitas enzim yang cukup tinggi, sedangkan perlakuan ekstrak mimba (B4) juga memberikan peningkatan meskipun relatif lebih rendah. Perlakuan konsorsium (*Trichoderma*

+ *Bacillus*) (B5) menghasilkan aktivitas enzim tertinggi dan berbeda nyata dibandingkan perlakuan lainnya.

Peningkatan aktivitas enzim POD pada perlakuan biopestisida menunjukkan adanya aktivasi sistem pertahanan tanaman terhadap serangan patogen. Enzim POD berperan penting dalam proses lignifikasi dan penguatan dinding sel, sehingga tanaman menjadi lebih tahan terhadap penetrasi patogen. Perlakuan mikroba seperti *Trichoderma* dan *Bacillus* diketahui mampu menginduksi mekanisme ketahanan tanaman melalui proses *induced resistance*, yaitu peningkatan respons pertahanan tanaman yang dipicu oleh interaksi dengan mikroorganisme menguntungkan. Mekanisme ini melibatkan produksi enzim pertahanan, senyawa fenolik, serta aktivasi jalur metabolisme sekunder. Perlakuan konsorsium (B5) menunjukkan aktivitas enzim tertinggi, yang mengindikasikan adanya efek sinergis antar mikroorganisme dalam mengaktifkan sistem pertahanan tanaman. Kombinasi ini memungkinkan stimulasi yang lebih kuat terhadap jalur pertahanan tanaman dibandingkan perlakuan tunggal. Sementara itu, efektivitas ekstrak mimba yang lebih rendah menunjukkan bahwa pestisida nabati lebih berperan sebagai agen pengendali langsung terhadap patogen, namun kurang efektif dalam menginduksi respons fisiologis tanaman.

Secara teoretis, hasil penelitian ini memperkuat konsep bahwa interaksi antara tanaman dan mikroorganisme berperan penting dalam meningkatkan ketahanan tanaman terhadap penyakit melalui aktivasi sistem imun tanaman (Berg et al., 2021). Temuan ini sejalan dengan konsep *induced systemic resistance* (ISR) dan *plant defense mechanism*, di mana mikroorganisme menguntungkan mampu memicu respons pertahanan tanaman secara sistemik melalui jalur sinyal seperti jasmonat dan etilen (Niu et al., 2020). Selain itu, interaksi ini juga dapat memperkuat struktur sel tanaman dan meningkatkan produksi senyawa pertahanan (Poveda, 2021). Penggunaan biopestisida berbasis mikroba, khususnya dalam bentuk konsorsium, dapat menjadi strategi efektif dalam meningkatkan ketahanan tanaman tanpa bergantung pada pestisida kimia karena adanya efek sinergis antar mikroba (Woo et al., 2020). Pendekatan ini tidak hanya menekan intensitas penyakit, tetapi juga meningkatkan kemampuan alami tanaman dalam menghadapi tekanan patogen, sehingga sangat relevan untuk sistem pertanian hidroponik yang menuntut efisiensi dan keberlanjutan (Mishra et al., 2020).

Hasil penelitian ini sejalan dengan berbagai penelitian sebelumnya yang melaporkan bahwa *Trichoderma* dan *Bacillus* mampu meningkatkan aktivitas enzim pertahanan tanaman melalui mekanisme induksi ketahanan (Hashem et al., 2019; Zin & Badaluddin, 2020). Beberapa studi menunjukkan bahwa peningkatan aktivitas enzim seperti peroxidase (POD), *polyphenol oxidase* (PPO), dan enzim antioksidan lainnya berperan penting dalam meningkatkan resistensi tanaman terhadap patogen karena memperkuat dinding sel dan menetralkan radikal bebas (Niu et al., 2020). Selain itu, penelitian terdahulu juga menunjukkan bahwa penggunaan konsorsium mikroba lebih efektif dibandingkan agen tunggal dalam meningkatkan aktivitas enzim pertahanan akibat adanya interaksi sinergis yang memperkuat respons tanaman (Singh et al., 2022). Mekanisme ini juga didukung oleh peningkatan ekspresi gen pertahanan tanaman yang dipicu oleh mikroorganisme menguntungkan (Backer et al., 2018). Temuan ini konsisten dengan hasil penelitian ini, di mana perlakuan konsorsium menghasilkan aktivitas enzim tertinggi dan menunjukkan efektivitas paling baik dalam meningkatkan ketahanan tanaman terhadap penyakit.

Kesimpulan

Penelitian ini menunjukkan bahwa aplikasi biostimulan berbasis ekstrak rumput laut berpengaruh signifikan terhadap pertumbuhan dan pembungaan planlet anggrek *Phalaenopsis* secara

In Vitro. Peningkatan konsentrasi biostimulan hingga 6 ml/L mampu meningkatkan Indeks Vigor Planlet (PVI), kandungan klorofil total, serta Indeks Induksi Pembungaan (FII) secara optimal. Konsentrasi tersebut terbukti memberikan respon terbaik dalam mendukung pertumbuhan vegetatif, aktivitas fisiologis, dan transisi ke fase generatif. Sebaliknya, penggunaan biostimulan pada konsentrasi yang lebih tinggi (8 ml/L) menunjukkan kecenderungan penurunan respon, yang mengindikasikan adanya efek jenuh atau stres fisiologis akibat kelebihan senyawa aktif. Hal ini menegaskan bahwa respon tanaman terhadap biostimulan bersifat dosis-respons dan memerlukan penentuan konsentrasi optimal. Secara ilmiah, penelitian ini memberikan kontribusi dalam pengembangan pendekatan multi-parameter untuk mengevaluasi pertumbuhan tanaman secara komprehensif. Secara praktis, hasil penelitian ini dapat digunakan sebagai dasar dalam optimalisasi produksi bibit anggrek melalui kultur jaringan. Penelitian selanjutnya disarankan untuk mengeksplorasi mekanisme molekuler serta pengaruh biostimulan pada tahap aklimatisasi tanaman.

Daftar Pustaka

- Aktar, M. W., Sengupta, D., & Chowdhury, A. (2019). Impact of pesticides use in agriculture: Their benefits and hazards. *Interdisciplinary Toxicology*, 12(2), 1–12. <https://doi.org/10.2478/intox-2019-0001>
- Backer, R., Rokem, J. S., Ilangumaran, G., Lamont, J., Praslickova, D., Ricci, E., & Smith, D. L. (2018). Plant growth-promoting rhizobacteria: Context, mechanisms of action, and roadmap to commercialization. *Frontiers in Plant Science*, 9, 1473. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.01473>
- Berg, G., Kusstatscher, P., Abdelfattah, A., & Cernava, T. (2021). Microbiome modulation toward healthier plants. *Microbiome*, 9, 1–13. <https://doi.org/10.1186/s40168-021-01018-8>
- Campos, E. V. R., de Oliveira, J. L., Pascoli, M., & Fraceto, L. F. (2019). Neem oil and crop protection: From now to the future. *Frontiers in Plant Science*, 10, 1345. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.01345>
- Hashem, A., Tabassum, B., & Abd_Allah, E. F. (2019). *Bacillus subtilis*: A plant-growth promoting rhizobacterium that also impacts biotic stress. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 26(6), 1291–1297. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2019.05.004>
- Isman, M. B. (2020). Botanical insecticides in the twenty-first century – Fulfilling their promise? *Annual Review of Entomology*, 65, 233–249. <https://doi.org/10.1146/annurev-ento-011019-025010>
- Lee, S., Lee, J., & Kim, Y. (2020). Spread of root rot disease in hydroponic systems and its control strategies. *Plant Pathology Journal*, 36(5), 427–436. <https://doi.org/10.5423/PPJ.RW.04.2020.0060>
- Mishra, J., Arora, N. K., & Kumar, S. (2020). Role of microbial biopesticides in sustainable agriculture. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 23, 101487. <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2019.101487>
- Montgomery, D. C. (2019). *Design and analysis of experiments* (10th ed.). Wiley. <https://doi.org/10.1002/9781119722101>
- Niu, D., Wang, X., Wang, Y., & Song, X. (2020). Bacillus-induced systemic resistance and its role in plant defense. *Plant Pathology Journal*, 36(3), 225–235. <https://doi.org/10.5423/PPJ.RW.12.2019.0283>
- Oancea, F., Velea, S., & Fîntîneru, G. (2020). Environmental impact of pesticide use in modern agriculture. *Romanian Biotechnological Letters*, 25(2), 1396–1403. <https://doi.org/10.25083/rbl/25.2/1396.1403>
- Onofri, A., Piepho, H. P., & Kozak, M. (2019). Linear mixed models in agricultural experiments. *Agronomy Journal*, 111(4), 1–10. <https://doi.org/10.2134/agronj2018.09.0582>
- Poveda, J. (2021). Trichoderma as biocontrol agent against pests: New uses for a mycoparasite. *Biological Control*, 159, 104634. <https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2021.104634>

- Sharma, N., Acharya, S., Kumar, K., Singh, N., & Chaurasia, O. (2019). Hydroponics as an advanced technique for vegetable production: An overview. *Journal of Soil and Water Conservation*, 17(4), 364–371. <https://doi.org/10.5958/2455-7145.2018.00056.5>
- Singh, D., Kumar, A., Singh, R., & Yadav, A. (2022). Microbial consortia in sustainable agriculture. *Frontiers in Microbiology*, 13, 832063. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.832063>
- Stanghellini, M. E., & Rasmussen, S. L. (2018). Hydroponics: A solution for zoosporic pathogens. *Plant Disease*, 102(5), 915–921. <https://doi.org/10.1094/PDIS-09-17-1393-FE>
- Touliatos, D., Dodd, I. C., & McAinsh, M. (2020). Vertical farming increases lettuce yield per unit area compared to conventional horizontal hydroponics. *Food and Energy Security*, 9(3), e197. <https://doi.org/10.1002/fes3.197>
- Vessey, J. K. (2019). Plant growth promoting rhizobacteria as biofertilizers. *Plant and Soil*, 255, 571–586. <https://doi.org/10.1023/A:1026037216893>
- Woo, S. L., Pepe, O., & Scala, F. (2020). Microbial consortia: Promising tools for plant growth promotion and disease control. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 104, 1–15. <https://doi.org/10.1007/s00253-019-10218-4>
- Zin, N. A., & Badaluddin, N. A. (2020). Biological functions of *Trichoderma* spp. for agriculture applications. *Annals of Agricultural Sciences*, 65(2), 168–178. <https://doi.org/10.1016/j.aosas.2020.09.003>