

BEYOND BIOCONTROL

MENGUNGKAP MITOS, TANTANGAN, DAN PELUANG
PENGENDALIAN HAYATI MODERN PERSPEKTIF BARU BAGI GENERASI Z



Selviana Anggraini, S.P., M.P.
Sumini, S.P., M.Si.
Pajri Ananta Yudha, S.P., M.P.
Dr. Dini Puspita Yanty, S.P., M.P.
Sri Murtini, S.Pi., M.Si.



BEYOND BIOCONTROL

Mengungkap Mitos, Tantangan, dan Peluang Pengendalian Hayati Modern Perspektif Baru bagi Generasi Z

Penulis : Selviana Anggraini, S.P., M.P.
Sumini, S.P., M.Si.
Pajri Ananta Yudha, S.P., M.P.
Dr. Dini Puspita Yanty, S.P., M.P.
Sri Murtini, S.Pi., M.Si.
Editor : Amriana
Desain Cover : Muzammil Akbar
Ilustrasi : Gemini

Ukuran: 15.5 x 23 cm; Hal: xiii + 222 (235)

Cetakan I, Juni 2026

ISBN 978-634-7577-64-1



Penerbit
Insight Mediatama
Anggota IKAPI No. 338/JTI/2022
Watesnegoro No. 4 (61385) Mojokerto
Whatsapp 087762245559
www.insightmediatama.co.id

© All Rights Reserved Ketentuan Pidana Pasal 112-119 Undang-undang Nomor 28 Tahun 2014 Tentang Hak Cipta. Dilarang keras menerjemahkan, memfotokopi, atau memperbanyak sebagian atau seluruh isi buku ini tanpa izin tertulis dari penerbit dan penulis.

KATA PENGANTAR

Ketika Biokontrol Tidak Bekerja

Pengendalian hayati sering diperkenalkan sebagai jawaban atas berbagai persoalan pertanian modern. Di ruang kelas, di seminar ilmiah, dan dalam berbagai publikasi, biokontrol digambarkan sebagai solusi ramah lingkungan yang mampu menggantikan pestisida kimia. Agen hayati disebut mampu menekan penyakit tanaman, memperbaiki kesehatan tanah, dan mendukung pertanian berkelanjutan. Harapan itu tidak salah. Bahkan, dalam banyak kondisi, pengendalian hayati memang menunjukkan hasil yang menjanjikan.

Namun, di balik optimisme tersebut, ada satu realitas yang jarang dibicarakan secara terbuka: biokontrol tidak selalu bekerja seperti yang kita harapkan.

Pengalaman lapangan—baik dari penelitian, pengabdian masyarakat, maupun interaksi dengan petani—menunjukkan bahwa keberhasilan agen hayati sering kali bersifat tidak konsisten. Ada musim di mana biokontrol bekerja dengan baik, tetapi pada musim berikutnya hasilnya menurun. Ada lokasi yang menunjukkan respons positif, namun lokasi lain dengan kondisi serupa justru tidak menunjukkan perubahan berarti. Bahkan, tidak jarang biokontrol yang berhasil di laboratorium atau rumah kaca, gagal menunjukkan efektivitas yang sama ketika diaplikasikan di lahan pertanian sesungguhnya.

Realitas inilah yang menjadi titik awal lahirnya buku ini.

Realitas Lapangan yang Jarang Dituliskan

Dalam praktik pertanian, petani sering kali dihadapkan pada pilihan yang sangat pragmatis: apakah teknologi yang

diterapkan mampu melindungi tanamannya atau tidak. Bagi petani, keberhasilan bukan ditentukan oleh nilai signifikansi statistik, tetapi oleh hasil nyata di lapangan—tanaman yang sehat, panen yang aman, dan kerugian yang bisa ditekan.

Ketika agen hayati diaplikasikan, ekspektasi sering kali sangat tinggi. Petani berharap penyakit tanaman dapat ditekan secara signifikan, bahkan sepenuhnya hilang. Namun, kenyataan di lapangan tidak selalu sejalan dengan harapan tersebut. Penyakit mungkin tetap muncul, meskipun dengan intensitas yang sedikit lebih rendah. Dalam beberapa kasus, tidak ada perbedaan yang jelas antara lahan yang menggunakan agen hayati dan yang tidak menggunakannya.

Situasi ini sering menimbulkan kekecewaan. Tidak hanya bagi petani, tetapi juga bagi peneliti dan penyuluh yang terlibat. Lebih dari itu, kegagalan atau ketidakkonsistenan ini jarang terdokumentasi secara sistematis dalam publikasi ilmiah. Sebagian besar jurnal lebih tertarik pada hasil yang “berhasil”, sementara laporan kegagalan sering dianggap kurang menarik atau kurang bernilai ilmiah.

Padahal, kegagalan adalah bagian penting dari proses ilmiah.

Paradoks Ilmiah: Berhasil di Laboratorium, Gagal di Lapangan

Salah satu paradoks terbesar dalam pengendalian hayati adalah perbedaan mencolok antara hasil penelitian di laboratorium dan realitas di lapangan. Di laboratorium, kondisi lingkungan dapat dikontrol dengan ketat. Suhu, kelembaban, pH media, dan keberadaan mikroorganisme lain dapat diatur sedemikian rupa sehingga agen hayati berada pada kondisi optimal.

Dalam kondisi tersebut, agen hayati sering menunjukkan kemampuan antagonistik yang kuat terhadap patogen. Zona hambat terlihat jelas, pertumbuhan patogen tertekan, dan

mekanisme pengendalian tampak bekerja secara efektif. Tidak mengherankan jika hasil-hasil seperti ini kemudian dipublikasikan dan dijadikan dasar pengembangan teknologi biokontrol.

Namun, ketika agen hayati yang sama diaplikasikan di lapangan, tantangannya menjadi jauh lebih kompleks. Tanah bukanlah media steril. Di dalamnya hidup komunitas mikroba yang sangat beragam dan dinamis. Agen hayati harus bersaing dengan mikroorganisme indigenus yang telah lama beradaptasi dengan lingkungan setempat. Selain itu, faktor lingkungan seperti fluktuasi suhu, curah hujan, kandungan bahan organik, dan residu pestisida turut memengaruhi keberhasilan agen hayati.

Perbedaan inilah yang sering kali menjadi penyebab utama kegagalan biokontrol di lapangan. Agen hayati yang unggul di laboratorium belum tentu mampu bertahan, berkolonisasi, dan berfungsi secara optimal dalam kondisi lapangan yang kompleks dan tidak stabil (Berg, Rybakova, Fischer, et al., 2020; Compant et al., 2021).

Paradoks ini tidak menunjukkan bahwa penelitian laboratorium tidak penting. Sebaliknya, hal ini menegaskan bahwa hasil laboratorium hanyalah satu bagian dari perjalanan panjang menuju penerapan lapangan yang efektif.

Melihat Kegagalan sebagai Sumber Ilmu

Dalam budaya ilmiah yang sangat menekankan keberhasilan, kegagalan sering dipandang sebagai sesuatu yang harus dihindari atau disembunyikan. Penelitian yang tidak menunjukkan hasil signifikan sering kali tidak dilanjutkan ke tahap publikasi. Akibatnya, literatur ilmiah menjadi bias

terhadap keberhasilan, sementara kegagalan—yang justru kaya akan pelajaran—hampir tidak terdokumentasi.

Buku ini mengambil posisi yang berbeda. Kegagalan tidak dipandang sebagai akhir dari sebuah upaya, melainkan sebagai sumber pengetahuan yang sangat berharga. Dengan memahami mengapa biokontrol tidak bekerja dalam kondisi tertentu, kita dapat memperbaiki strategi, merancang pendekatan yang lebih adaptif, dan menghindari pengulangan kesalahan yang sama di masa depan.

Pendekatan ini sejalan dengan perkembangan terbaru dalam ilmu proteksi tanaman dan mikrobiologi pertanian, yang semakin menekankan pentingnya konteks lingkungan, interaksi mikroba, dan respons fisiologis tanaman (Trivedi et al., 2020a; Vukicevich et al., 2021).

Melaporkan kegagalan bukan berarti melemahkan posisi biokontrol. Justru sebaliknya, hal ini memperkuat dasar ilmiah pengendalian hayati dengan memberikan gambaran yang lebih realistis dan komprehensif.

Bukan Anti-Biokontrol, tetapi Pro-Ilmu yang Jujur

Penting untuk ditegaskan sejak awal bahwa buku ini bukanlah kritik terhadap biokontrol sebagai konsep. Pengendalian hayati tetap merupakan salah satu pilar penting dalam pertanian berkelanjutan. Di tengah meningkatnya kekhawatiran terhadap dampak negatif pestisida kimia terhadap lingkungan dan kesehatan manusia, biokontrol menawarkan alternatif yang lebih ramah lingkungan dan berpotensi berkelanjutan.

Namun, dukungan terhadap biokontrol tidak harus disertai dengan sikap tidak kritis. Justru, agar biokontrol dapat berkembang dan diterapkan secara luas, diperlukan

pemahaman yang jujur mengenai keterbatasannya. Tanpa pemahaman tersebut, biokontrol berisiko dipersepsikan sebagai teknologi yang “menjanjikan tetapi tidak dapat diandalkan”.

Buku ini mencoba menempatkan biokontrol dalam kerangka ilmiah yang lebih dewasa—sebagai teknologi yang memiliki potensi besar, tetapi juga memiliki batasan yang perlu dipahami dan dikelola dengan baik (Dara & Dara, 2019; Heimpel & Mills, 2017).

Dari Optimisme Menuju Realisme Ilmiah

Dalam beberapa dekade terakhir, pendekatan terhadap pengendalian hayati cenderung sangat optimistis. Agen hayati sering dipromosikan sebagai solusi tunggal yang mampu menggantikan pestisida kimia sepenuhnya. Pendekatan semacam ini tidak hanya tidak realistis, tetapi juga berpotensi merugikan adopsi teknologi di lapangan.

Realisme ilmiah menuntut kita untuk mengakui bahwa biokontrol bekerja paling baik ketika diintegrasikan dengan praktik pengelolaan tanaman lainnya, seperti pemilihan varietas tahan, pengelolaan tanah yang baik, dan penerapan prinsip Pengendalian Hama Terpadu (PHT/IPM). Biokontrol bukan pengganti total, melainkan bagian dari sistem pengelolaan yang lebih luas dan terintegrasi (Lamichhane et al., 2020; Pretty et al., 2018).

Dengan perspektif ini, kegagalan biokontrol tidak lagi dipandang sebagai bukti ketidaklayakan teknologi, melainkan sebagai indikasi bahwa pendekatan yang digunakan belum sepenuhnya selaras dengan kompleksitas agroekosistem.

Mengapa Buku Ini Perlu Ditulis Sekarang

Perubahan iklim, degradasi lahan, dan meningkatnya tekanan patogen menjadikan tantangan proteksi tanaman semakin kompleks. Pada saat yang sama, tuntutan terhadap praktik pertanian yang ramah lingkungan semakin menguat. Dalam konteks ini, pengendalian hayati memiliki peran yang sangat strategis.

Namun, tanpa pemahaman yang mendalam mengenai faktor-faktor yang menyebabkan kegagalan biokontrol, upaya penerapan teknologi ini berisiko tidak berkelanjutan. Petani mungkin kehilangan kepercayaan, peneliti kesulitan menjelaskan ketidakkonsistenan hasil, dan kebijakan publik menjadi tidak berbasis bukti yang lengkap.

Buku ini hadir untuk mengisi celah tersebut—mengajak pembaca untuk melihat pengendalian hayati secara lebih utuh, jujur, dan kontekstual. Dengan membahas kegagalan secara terbuka dan ilmiah, buku ini diharapkan dapat menjadi rujukan bagi dosen, peneliti, mahasiswa, penyuluh, dan praktisi pertanian dalam mengembangkan strategi proteksi tanaman yang lebih adaptif dan berkelanjutan.

Penutup: Kejujuran sebagai Fondasi Ilmu

Ilmu pengetahuan berkembang bukan hanya dari keberhasilan, tetapi juga dari kegagalan yang dipahami dengan baik. Dalam konteks pengendalian hayati, keberanian untuk membicarakan kegagalan merupakan langkah penting menuju kematangan ilmiah dan keberlanjutan praktik pertanian.

Melalui buku ini, penulis berharap pembaca dapat melihat bahwa biokontrol bukanlah solusi instan, melainkan proses yang membutuhkan pemahaman mendalam, kesabaran, dan pendekatan yang holistik. Dengan demikian, pertanian

berkelanjutan tidak dibangun di atas klaim keberhasilan semata, tetapi di atas pemahaman yang jujur dan ilmiah tentang apa yang bekerja dan apa yang tidak.

DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR	iii
----------------------	-----

DAFTAR ISI	x
------------------	---

BAB 1

PENDAHULUAN UMUM: MITOS DAN HARAPAN BIOKONTROL. 1

BAB 2

KONSEP DASAR PENGENDALIAN HAYATI 8

A. Apa Itu Pengendalian Hayati?	8
B. Agen Hayati: Bukan “Obat”, tetapi Makhluk Hidup	13
C. Mekanisme Utama Pengendalian Hayati	14
D. Mengapa Memahami Mekanisme Itu Penting?	18
E. Posisi Pengendalian Hayati dalam IPM	18
F. Fondasi untuk Memahami Kegagalan	20

BAB 3

APA YANG DISEBUT “GAGAL” DALAM BIOKONTROL? 22

A. Gagal Total vs Gagal Parsial: Dua Hal yang Sering Disamakan	22
B. Ketidakonsistenan Antar Musim dan Lokasi: Masalah yang Paling Umum	24
C. Efektivitas yang Menurun dari Waktu ke Waktu	31
D. Berhasil secara Statistik, Gagal secara Praktis	31
E. Kegagalan sebagai Informasi, Bukan Aib	33
F. Mengapa Penting Mendefinisikan “Gagal” dengan Jelas? ..	34
G. Menggeser Cara Pandang	34

BAB 4

FAKTOR LINGKUNGAN DAN TANAH: KETIKA LINGKUNGAN LEBIH KUAT DARIPADA MIKROBA..... 36

BAB 5

KOMPETISI MIKROBA & KOLONISASI AKAR.....49

- A. Rizosfer: Arena Kompetisi yang Tidak Pernah Kosong49
- B. Kompetisi Mikroba: Mengapa Agen Hayati Sering Kalah Sebelum Bekerja51
- C. Senjata Mikroba: Antagonisme Tidak Pernah Sepihak52
- D. Kolonisasi Akar: Proses Bertahap yang Sering Gagal53
- E. Masalah Populasi: Dari Ledakan Awal ke Kehilangan Total59
- F. Ilusi “Sekali Aplikasi, Langsung Bekerja”59
- G. Priority Effects: Datang Lebih Awal, Menang Lebih Besar .60
- H. Dari Strain Tunggal ke Pendekatan Sistem60
- I. Membaca Kegagalan secara Ilmiah.....60

BAB 6

RESPONS TANAMAN YANG TIDAK OPTIMAL62

- A. Tanaman Tidak Selalu “Merespons” Agen Hayati.....65
- B. Jalur Ketahanan SA, JA, dan ET Tidak Teraktivasi.....66
- C. Ketahanan Bersifat Sementara70
- D. Pengaruh Varietas dan Fase Pertumbuhan Tanaman.....72
- E. Mengaitkan Biokontrol dengan Fisiologi Tanaman.....75
- F. Penutup78

BAB 7

MASALAH FORMULASI DAN APLIKASI AGEN HAYATI79

- A. Formulasi Agen Hayati Tidak Stabil82
- B. Dosis Aplikasi Tidak Tepat85
- C. Cara Aplikasi yang Tidak Sesuai.....88
- D. Waktu Aplikasi Tidak Sinkron dengan Siklus Patogen.....91
- E. Implikasi Praktis dalam Evaluasi Biokontrol.....95
- F. Penutup98

BAB 8

KEGAGALAN DALAM SKALA LAPANGAN.....100

- A. Gap Laboratorium – Rumah Kaca – Lapangan101

B.	Variabilitas Hasil di Lapangan.....	105
C.	Tantangan Adopsi oleh Petani	106
D.	Tekanan Ekonomi dan Sosial.....	109
E.	Implikasi bagi Pengembangan Biokontrol.....	111
F.	Penutup.....	113

BAB 9

KEGAGALAN SEBAGAI SUMBER PENGETAHUAN 115

A.	Mengapa Kegagalan Jarang Dipublikasikan	116
B.	Bias Publikasi terhadap Keberhasilan	118
C.	Pentingnya Laporan Negatif (Negative Results)	120
D.	Etika Ilmiah dan Transparansi	122
E.	Kegagalan sebagai Fondasi Kemajuan Ilmu	123
F.	Penutup.....	125

BAB 10

STRATEGI MENGURANGI RISIKO KEGAGALAN 128

A.	Pemilihan Mikroba Indigenus	129
B.	Pendekatan Berbasis Mekanisme	132
C.	Integrasi dengan Sistem Pengendalian Hama Terpadu (IPM).....	135
D.	Kombinasi dengan Praktik Agronomi.....	137
E.	Menuju Pendekatan yang Adaptif	139
F.	Penutup.....	141

BAB 11

BIOKONTROL DALAM KERANGKA PERTANIAN BERKELANJUTAN 142

A.	Peran Biokontrol dalam Pengurangan Penggunaan Pestisida	144
B.	Kaitan dengan Keamanan Pangan dan Kesehatan.....	146
C.	Relevansi dengan Agenda Pembangunan Berkelanjutan (SDGs).....	148
D.	Tantangan Kebijakan dan Regulasi.....	150
E.	Penutup.....	152

BAB 12

ARAH RISET DAN TANTANGAN MASA DEPAN154

- A. Kebutuhan Riset Berbasis Mekanisme156
- B. Pentingnya Uji Lapang Jangka Panjang157
- C. Pendekatan Berbasis Mikrobiome159
- D Integrasi Biokontrol dengan Teknologi Digital161
- E. Penutup163

BAB 13

DARI HARAPAN KE REALISME ILMIAH166

GLOSARIUM.....170

DAFTAR PUSTAKA174

PROFIL PENULIS217

BAB 1

PENDAHULUAN UMUM:

MITOS DAN HARAPAN BIOKONTROL

Di banyak forum pertanian, baik formal maupun informal, pengendalian hayati sering diperkenalkan dengan nada penuh optimisme. Biokontrol disebut sebagai jawaban atas berbagai persoalan klasik pertanian: penyakit tanaman yang sulit dikendalikan, ketergantungan pada pestisida kimia, kerusakan lingkungan, hingga kekhawatiran terhadap kesehatan manusia. Dalam banyak brosur, pelatihan, dan diskusi, biokontrol hadir sebagai “jalan tengah” yang terdengar ideal—alami, ramah lingkungan, dan berkelanjutan.

Tidak ada yang salah dengan optimisme itu. Bahkan, tanpa optimisme, pertanian berkelanjutan mungkin tidak akan pernah tumbuh. Namun, masalah mulai muncul ketika optimisme perlahan berubah menjadi mitos. Mitos bahwa biokontrol selalu berhasil. Mitos bahwa agen hayati pasti bekerja asal diaplikasikan. Mitos bahwa jika biokontrol gagal, maka penyebabnya pasti kesalahan pengguna, bukan keterbatasan sistemnya.

Buku ini berangkat dari kegelisahan sederhana: apakah biokontrol memang sesederhana itu? dan jika tidak, mengapa kita jarang membicarakan sisi lainnya?

Biokontrol dan Cerita tentang “Solusi Ajaib”

Istilah “solusi ajaib” tidak pernah benar-benar diucapkan secara eksplisit. Ia hadir secara halus, tersirat dalam cara kita berbicara dan menulis. Ketika sebuah agen hayati berhasil menekan penyakit tanaman di suatu lokasi, cerita itu cepat

BAB 2

KONSEP DASAR PENGENDALIAN HAYATI

Sebelum membahas mengapa pengendalian hayati kadang tidak bekerja, kita perlu berhenti sejenak dan menyepakati satu hal penting: apa sebenarnya yang dimaksud dengan pengendalian hayati, bagaimana ia bekerja, dan di mana posisinya dalam sistem pertanian modern. Tanpa pemahaman dasar ini, kegagalan biokontrol mudah disalahartikan sebagai “teknologinya tidak bagus”, padahal sering kali masalahnya terletak pada ekspektasi dan cara pandang kita sendiri.

Bab ini tidak bertujuan menjadi buku teks yang penuh istilah rumit. Sebaliknya, bab ini ditulis untuk membantu pembaca memahami biokontrol sebagai sebuah proses biologis, bukan sekadar produk. Dengan memahami prosesnya, kita akan lebih siap memahami mengapa biokontrol bisa berhasil—dan mengapa ia juga bisa gagal.

A. Apa Itu Pengendalian Hayati?

Secara umum, pengendalian hayati bekerja melalui beberapa mekanisme utama, yaitu antagonisme terhadap patogen, kompetisi dalam rizosfer, dan induksi ketahanan tanaman, sebagaimana disajikan pada Gambar 3.1.

BAB 3

APA YANG DISEBUT “GAGAL” DALAM BIOKONTROL?

Ketika pengendalian hayati tidak memberikan hasil seperti yang diharapkan, reaksi pertama yang sering muncul adalah kekecewaan. Tidak jarang muncul pernyataan singkat namun tegas: *“Biokontrol tidak bekerja.”* Kalimat ini terdengar sederhana, tetapi sesungguhnya menyimpan banyak lapisan makna yang jarang dibedah secara ilmiah.

Buku ini mengajak pembaca untuk berhenti sejenak dan bertanya: apa sebenarnya yang dimaksud dengan “gagal” dalam biokontrol? Apakah kegagalan berarti sama sekali tidak ada efek? Ataukah kegagalan berarti hasilnya tidak sesuai ekspektasi? Ataukah kegagalan hanya muncul karena cara kita menilai keberhasilan itu sendiri kurang tepat?

Bab ini menjadi bagian penting karena kegagalan sering dipahami secara emosional—sebagai kekecewaan, kesalahan, atau bukti ketidaklayakan teknologi. Padahal, dalam ilmu pengetahuan, kegagalan seharusnya dipahami sebagai informasi. Informasi tentang batas, konteks, dan kondisi di mana suatu pendekatan bekerja atau tidak bekerja.

A. Gagal Total vs Gagal Parsial: Dua Hal yang Sering Disamakan

Dalam praktik, kegagalan biokontrol sering disamaratakan. Padahal, secara ilmiah, gagal total dan gagal parsial adalah dua kondisi yang sangat berbeda. Hal ini dapat dilihat pada Gambar 4.1.

BAB 4

FAKTOR LINGKUNGAN DAN TANAH: KETIKA LINGKUNGAN LEBIH KUAT DARIPADA MIKROBA

Dalam banyak diskusi tentang pengendalian hayati, perhatian sering tertuju pada satu pertanyaan utama: *mikroba apa yang digunakan?* Padahal, pertanyaan yang tidak kalah penting—dan sering kali justru lebih menentukan—adalah: *lingkungannya seperti apa?*

Bab-bab sebelumnya telah menunjukkan bahwa kegagalan biokontrol tidak selalu dapat dimaknai bahwa agen hayati tidak memiliki potensi atau tidak efektif. Dalam banyak kasus, agen hayati sebenarnya mampu bekerja melalui berbagai mekanisme, seperti kompetisi ruang dan nutrisi, antibiosis, parasitisme, maupun induksi ketahanan tanaman. Namun, keberhasilan mekanisme tersebut sangat bergantung pada kondisi lingkungan tempat agen hayati diaplikasikan. Apabila lingkungan tidak mendukung, maka agen hayati sulit bertahan hidup, berkembang, atau menjalankan fungsinya secara optimal. Dengan demikian, kegagalan biokontrol sering kali bukan semata-mata disebabkan oleh kelemahan agen hayati, tetapi oleh ketidaksesuaian antara karakter agen hayati dengan kondisi tanah, iklim mikro, sistem budidaya, serta tekanan organisme pengganggu tanaman di lapangan.

Tanah bukan sekadar media tumbuh bagi tanaman, dan lingkungan bukan sekadar latar belakang dalam proses budidaya. Keduanya merupakan faktor aktif yang sangat menentukan keberhasilan biokontrol karena menjadi ruang

BAB 5

KOMPETISI MIKROBA & KOLONISASI AKAR

Mengapa Agen Hayati Sering Kalah di “Rumah Orang”

A. Rizosfer: Arena Kompetisi yang Tidak Pernah Kosong

Rizosfer merupakan zona tanah yang paling dinamis dan kompetitif dalam agroekosistem. Di wilayah inilah akar tanaman berinteraksi secara intensif dengan komunitas mikroba tanah yang telah lama menetap dan beradaptasi dengan kondisi lokal. Ketika agen hayati diaplikasikan, ia tidak masuk ke ruang kosong, melainkan ke sistem biologis yang sudah padat oleh mikroba indigenous dengan jaringan interaksi yang stabil. Kondisi ini menjadikan rizosfer sebagai arena kompetisi utama yang menentukan apakah agen hayati mampu berkolonisasi dan menjalankan fungsinya atau justru tersingkir sebelum memberikan dampak nyata (Gambar 6.1).

Salah satu kekeliruan paling mendasar dalam praktik biokontrol adalah membayangkan rizosfer sebagai ruang kosong yang siap “diisi” oleh agen hayati. Kenyataannya, rizosfer adalah salah satu habitat mikroba paling padat dan paling kompetitif di biosfer. Setiap milimeter tanah di sekitar akar tanaman telah ditempati oleh komunitas mikroba indigenous yang jumlahnya mencapai miliaran sel per gram tanah, dengan jejaring interaksi yang kompleks dan telah teruji oleh waktu (Delgado-Baquerizo et al., 2023; Fierer, 2017; Trivedi et al., 2022).

BAB 6

RESPONS TANAMAN YANG TIDAK OPTIMAL

Pengendalian hayati sering dipersepsikan sebagai teknologi yang bekerja “dari luar”, seolah-olah agen hayati berperan langsung sebagai antagonis patogen. Dalam praktik biologis di lapangan, asumsi ini terlalu menyederhanakan proses yang sebenarnya jauh lebih kompleks. Banyak agen hayati tidak bekerja dengan cara menekan patogen secara langsung, melainkan melalui modulasi sistem fisiologi tanaman, khususnya dengan memicu mekanisme induksi ketahanan sistemik (induced systemic resistance, ISR) dan defense priming (Mauch-Mani et al., 2023; K. Pandey et al., 2023).

ISR dan priming pertahanan bukanlah respons otomatis. Mekanisme ini menempatkan tanaman dalam kondisi “siaga”, sehingga mampu merespons serangan patogen secara lebih cepat dan terkoordinasi. Namun, aktivasi respons tersebut sangat bergantung pada kemampuan tanaman untuk mengenali sinyal biologis dari mikroorganisme dan menerjemahkannya menjadi perubahan fisiologis yang bermakna (Arnold et al., 2022). Tanpa keterlibatan aktif tanaman, keberadaan agen hayati tidak selalu menghasilkan perlindungan nyata di lapangan.

Ketika respons tanaman tidak muncul atau berlangsung secara lemah, agen hayati yang diaplikasikan dapat tampak “tidak bekerja”, meskipun secara mikrobiologis masih hidup dan mampu berkolonisasi di rizosfer atau jaringan tanaman. Kondisi ini sering terjadi karena tanaman berada dalam status fisiologis yang tidak kondusif untuk aktivasi pertahanan. Tanaman yang

BAB 7

MASALAH FORMULASI DAN APLIKASI AGEN HAYATI

Pengendalian hayati sering tampak sangat “meyakinkan” di laboratorium dan rumah kaca, tetapi hasilnya bisa berubah ketika masuk ke lahan. Perbedaan ini bukan sekadar masalah “mikroba bagus atau tidak”, melainkan karena di lapangan agen hayati harus melewati rangkaian hambatan nyata: panas–dingin, sinar UV, kekeringan, hujan, pH tanah, kompetisi mikroba lokal, sampai variasi praktik budidaya petani. Literatur terbaru menekankan bahwa kinerja biokontrol sangat ditentukan oleh konteks ekologi dan cara implementasi, sehingga keberhasilan di lingkungan terkendali tidak otomatis “terbawa” ke kondisi agroekosistem yang dinamis (Nguyen et al., 2025; Padilla-Agudelo et al., 2025). Akibatnya, ketika performa menurun, kegagalan sering disalahartikan sebagai kelemahan agen hayati, padahal akar masalahnya justru ada pada jembatan dari penelitian ke aplikasi: formulasi, kualitas produk, dan strategi penerapan.

Dari sisi formulasi, produk biokontrol adalah sistem yang membawa organisme hidup. Karena itu, stabilitas viabilitas selama penyimpanan dan setelah aplikasi menjadi syarat dasar sebelum bicara efektivitas. Review tentang inokulan mikroba menegaskan bahwa carrier (padat/cair) dan aditif (pelindung, perekat, penyangga osmotik) bukan sekadar “bahan campuran”, tetapi penentu apakah mikroba tetap hidup, mampu bertahan, dan sanggup berkolonisasi pada targetnya (Díaz-Rodríguez et al., 2025). Studi tentang formulasi carrier padat juga menunjukkan bahwa pemilihan bahan pembawa yang tepat dapat

BAB 8

KEGAGALAN DALAM SKALA LAPANGAN

Keberhasilan agen hayati dalam pengujian laboratorium dan rumah kaca sering kali menciptakan optimisme tinggi terhadap potensinya untuk diterapkan di lapangan. Dalam kondisi terkontrol, agen hayati dapat menunjukkan kemampuan antagonisme yang kuat, kolonisasi yang stabil, serta respons tanaman yang tampak konsisten. Namun, berbagai studi mutakhir menunjukkan bahwa efektivitas tersebut sering mengalami penurunan atau variabilitas tinggi ketika diaplikasikan pada skala lapangan akibat heterogenitas lingkungan dan interaksi ekologis yang lebih kompleks (Cucu et al., 2025; Hossain et al., 2025). Transisi dari lingkungan terkontrol menuju kondisi lapangan menjadi fase krusial karena agen hayati harus beradaptasi dengan variasi mikroiklim, fluktuasi suhu dan kelembapan serta dinamika komunitas mikroba tanah yang telah mapan. Selain itu struktur dan keragaman mikrobioma rizosfer berperan besar dalam menentukan keberhasilan kolonisasi dan persistensi agen hayati sehingga keberadaan mikroorganisme indigenous dapat memperkuat ataupun menghambat kinerja agen introduksi. Kompleksitas interaksi tripartit antara tanaman, patogen, dan mikroorganisme bermanfaat di lingkungan yang heterogen semakin menegaskan bahwa sistem lapangan tidak dapat disederhanakan seperti pada sistem rumah kaca (Bouri et al., 2024).

Kompleksitas ekologis pada skala lapangan juga menghadirkan tantangan teknis yang sering kali terabaikan

BAB 9

KEGAGALAN SEBAGAI SUMBER PENGETAHUAN

Dalam tradisi ilmiah keberhasilan sering kali dipandang sebagai tujuan utama dari sebuah penelitian. Hasil yang menunjukkan efektivitas tinggi, perbedaan yang signifikan, atau temuan yang dianggap “berhasil” cenderung mendapatkan perhatian lebih besar, baik dalam publikasi maupun dalam pengakuan akademik. Sebaliknya kegagalan sering dipersepsikan sebagai sesuatu yang perlu dihindari, diperbaiki secara diam-diam atau bahkan tidak perlu dilaporkan. Pola pikir ini terbentuk bukan semata-mata karena niat untuk menyembunyikan informasi, melainkan karena sistem ilmiah secara tidak langsung mendorong peneliti untuk menampilkan keberhasilan. Tekanan untuk mempublikasikan hasil memperoleh pendanaan, dan menjaga reputasi akademik membuat laporan kegagalan kerap dianggap kurang bernilai atau berisiko. Akibatnya, kegagalan lebih sering berhenti sebagai catatan internal atau pengalaman pribadi peneliti, tanpa pernah menjadi bagian dari pengetahuan bersama.

Dalam pengembangan biokontrol kecenderungan ini tampak sangat jelas. Keberhasilan agen hayati pada skala laboratorium dan rumah kaca lebih sering dilaporkan karena hasilnya terlihat meyakinkan dan mudah diukur. Uji-uji tersebut memberikan gambaran bahwa biokontrol bekerja secara efektif, sehingga layak untuk dikembangkan lebih lanjut. Namun, kegagalan yang terjadi di lapangan yang justru merepresentasikan kondisi penggunaan nyata lebih jarang muncul dalam publikasi ilmiah. Akibat dari ketimpangan ini

BAB 10

STRATEGI MENGURANGI RISIKO KEGAGALAN

Pengalaman kegagalan biokontrol di lapangan tidak seharusnya dimaknai sebagai alasan untuk meragukan seluruh pendekatan pengendalian hayati. Kegagalan merupakan bagian inheren dari proses penerapan teknologi dalam sistem pertanian yang nyata, dinamis, dan kompleks. Dalam banyak kasus kegagalan justru mengungkapkan informasi penting mengenai kondisi agroekosistem yang belum sepenuhnya dipahami, asumsi yang perlu ditinjau kembali, atau strategi implementasi yang memerlukan penyesuaian. Perspektif ini sejalan dengan pendekatan pembelajaran adaptif dalam inovasi pertanian yang memandang variasi hasil—termasuk kegagalan—sebagai sumber umpan balik untuk perbaikan berkelanjutan (Rahmawati & Saptana, 2022). Dengan cara pandang tersebut kegagalan tidak diposisikan sebagai akhir dari pengembangan, melainkan sebagai titik awal untuk penyempurnaan teknologi yang lebih kontekstual dan responsif terhadap kebutuhan lapangan.

Pendekatan yang realistis menuntut pengakuan bahwa teknologi biologis tidak bekerja dalam ruang yang steril dan terkontrol seperti di laboratorium. Biokontrol beroperasi dalam ekosistem yang dinamis dimana dipengaruhi oleh interaksi antara tanah, tanaman, mikroorganisme, iklim, serta praktik budidaya yang beragam. Setiap komponen tersebut dapat berubah dan berbeda antar lokasi. sehingga variasi hasil bukanlah sesuatu yang sepenuhnya dapat dihilangkan melainkan karakteristik alami dari sistem biologis. Tujuan

BAB 11

BIOKONTROL DALAM KERANGKA PERTANIAN BERKELANJUTAN

Perkembangan biokontrol tidak dapat lagi dipahami semata sebagai inovasi teknis dalam pengendalian penyakit dan hama tanaman. Dalam lanskap pertanian modern yang ditandai oleh tekanan lingkungan, tuntutan keamanan pangan serta agenda pembangunan berkelanjutan, biokontrol memiliki implikasi yang jauh melampaui aspek agronomis. Ia berada pada titik temu antara ilmu pertanian, kesehatan masyarakat, kebijakan publik, ekonomi lingkungan dan tata kelola pembangunan. Transisi menuju sistem pertanian yang lebih berkelanjutan menuntut pengurangan ketergantungan pada input kimia sintetis tanpa mengorbankan produktivitas dan stabilitas produksi. Dalam konteks inilah biokontrol memperoleh relevansi strategis. Namun, pemaknaannya perlu ditempatkan dalam kerangka yang lebih luas tidak hanya sebagai alternatif pestisida tetapi sebagai bagian dari transformasi sistem pangan dan kebijakan lingkungan. Hubungan antara biokontrol dengan berbagai komponen dalam sistem pertanian berkelanjutan dapat digambarkan secara konseptual sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 12.1.

BAB 12

ARAH RISET DAN TANTANGAN MASA DEPAN

Perkembangan biokontrol dalam beberapa dekade terakhir menunjukkan kemajuan yang substansial baik dalam eksplorasi dan karakterisasi agen hayati maupun dalam inovasi formulasi yang lebih stabil dan aplikatif. Kemajuan dibidang mikrobiologi, biologi molekuler, serta teknologi fermentasi telah memperluas peluang pemanfaatan mikroorganisme lokal sebagai agen pengendali hayati yang lebih adaptif terhadap kondisi agroekosistem tropis. Peningkatan perhatian terhadap dampak lingkungan pestisida sintetis juga mendorong akselerasi riset dan pengembangan biokontrol sebagai bagian dari strategi pertanian berkelanjutan (Herlina et al., 2023). Perubahan iklim, degradasi kualitas tanah, intensifikasi sistem produksi, serta dinamika serangan patogen menambah tingkat ketidakpastian di lapangan. Tantangan ini menuntut arah riset yang tidak lagi parsial atau sektoral melainkan integratif dan berbasis sistem dengan mempertimbangkan interaksi biologis, faktor lingkungan serta sosial-ekonomi. Pengembangan biokontrol ke depan memerlukan pendekatan multidisipliner yang mampu menjembatani inovasi ilmiah dengan realitas praktik pertanian. Arah pengembangan riset biokontrol menuju sistem pertanian yang lebih adaptif dan berkelanjutan dapat digambarkan secara konseptual sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 13.1.

BAB 13

DARI HARAPAN KE REALISME ILMIAH

Bab ini menegaskan bahwa optimisme dalam pengembangan biokontrol harus senantiasa disertai dengan kejujuran ilmiah yang konsisten dan bertanggung jawab. Harapan terhadap agen hayati sebagai solusi bagi pertanian berkelanjutan memang sangat besar, terutama di tengah meningkatnya kekhawatiran terhadap dampak ekologis dan kesehatan akibat penggunaan pestisida kimia sintetis.

Sejumlah penelitian telah membuktikan bahwa mikroorganisme antagonis, predator alami, serta metabolit biologis memiliki potensi dalam menekan perkembangan patogen dan populasi hama tanaman. Potensi tersebut menunjukkan bahwa biokontrol dapat menjadi alternatif penting dalam pengelolaan organisme pengganggu tanaman. Namun, efektivitasnya tetap perlu dipahami secara hati-hati karena keberhasilan agen hayati sangat dipengaruhi oleh kondisi lingkungan, sistem budidaya, interaksi mikroba, serta dinamika agroekosistem.

Dengan demikian, perkembangan ilmu biokontrol perlu dipahami tidak hanya sebagai inovasi teknologi pengendalian hama, tetapi juga sebagai bagian dari transformasi sistem pertanian yang lebih berkelanjutan dan berbasis ekosistem. Hubungan antara perkembangan ilmu mikrobiologi tanah, pemanfaatan agen biokontrol, manajemen agroekosistem, serta integrasi teknologi pertanian dapat dirangkum secara konseptual sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 14.1.

GLOSARIUM

Agen Hayati (Biological Control Agent)	Organisme hidup yang digunakan untuk menekan hama atau patogen melalui mekanisme biologis alami.
Agroekosistem	Sistem ekologi pertanian yang melibatkan interaksi tanaman, mikroorganisme, tanah, iklim, dan aktivitas manusia.
Ambang Kendali Ekonomi	Tingkat populasi hama/penyakit yang memerlukan tindakan pengendalian untuk mencegah kerugian ekonomi.
Antagonisme Mikroba	Interaksi di mana satu mikroorganisme menghambat pertumbuhan mikroorganisme lain melalui kompetisi atau produksi senyawa tertentu.
Bias Publikasi	Kecenderungan publikasi ilmiah lebih menampilkan hasil positif dibandingkan hasil negatif atau inkonsisten.
Biokontrol (Biological Control)	Pendekatan pengendalian hama dan penyakit berbasis organisme hidup atau produk biologis.
Dinamika Populasi Patogen	Perubahan populasi patogen dari waktu ke waktu akibat faktor lingkungan dan interaksi biotik.
Efektivitas Biologis	Tingkat keberhasilan agen hayati berdasarkan mekanisme biologisnya.

Efektivitas Operasional	Keberhasilan teknologi saat diterapkan oleh pengguna di lapangan.
Ekosistem Terbuka	Sistem yang dipengaruhi faktor eksternal dan perubahan lingkungan secara dinamis.
Etika Ilmiah	Prinsip kejujuran, transparansi, dan akuntabilitas dalam pelaporan penelitian.
Feedback Ilmiah	Umpan balik dalam proses penelitian yang mendorong revisi dan perbaikan hipotesis.
Formulasi Agen Hayati	Proses pengembangan bentuk produk biologis agar stabil dan aplikatif di lapangan.
Induksi Ketahanan Sistemik (ISR)	Aktivasi sistem pertahanan tanaman oleh agen hayati untuk meningkatkan resistensi terhadap patogen.
Integrasi Sistemik	Pendekatan yang menggabungkan aspek biologis, agronomis, sosial, dan ekonomi secara terpadu.
IPM / PHT (Pengendalian Hama Terpadu)	Strategi pengendalian berbasis ekosistem dengan kombinasi metode biologis, agronomis, dan kimia selektif.
Kegagalan Epistemologis	Kegagalan yang berkontribusi pada pengembangan ilmu dengan mengungkap batasan teori atau metode.

Kolonisasi Mikroba	Kemampuan mikroorganisme untuk menetap dan berkembang di lingkungan tertentu.
Komunitas Mikroba Indigenous	Mikroorganisme asli yang telah lama beradaptasi dalam suatu ekosistem.
Kontekstual	Bergantung pada kondisi lingkungan dan sosial tertentu.
Mekanisme Biokontrol	Proses biologis seperti kompetisi, antibiosis, atau parasitisme yang mendasari pengendalian patogen.
Mikroba Indigenous	Mikroorganisme lokal yang telah beradaptasi dengan kondisi wilayah tertentu.
Negative Results (Hasil Negatif)	Hasil penelitian yang menunjukkan ketidakefektifan, namun tetap bernilai ilmiah.
Precautionary Principle	Prinsip kehati-hatian dalam kebijakan untuk mencegah risiko meskipun bukti belum lengkap.
Prediktabilitas	Kemampuan memperkirakan hasil berdasarkan pemahaman mekanisme dan kondisi pendukung.
Replikabilitas	Kemampuan hasil penelitian untuk diuji ulang dengan hasil serupa.
Resiliensi Agroekosistem	Kemampuan sistem pertanian mempertahankan fungsi meskipun mengalami gangguan.
Resistensi Patogen	Kemampuan patogen bertahan terhadap

	tekanan pengendalian.
Rizosfer	Zona tanah di sekitar akar yang menjadi pusat interaksi mikroba dan tanaman.
SDGs (Sustainable Development Goals)	Tujuan Pembangunan Berkelanjutan global yang mencakup aspek lingkungan, sosial, dan ekonomi.
Stabilitas Performa	Konsistensi efektivitas agen hayati di berbagai lokasi dan musim.
Siklus Ilmiah Iteratif	Proses penelitian berulang melalui pengujian, evaluasi, dan revisi.
Sistem Pertanian Berkelanjutan	Sistem produksi yang menjaga produktivitas tanpa merusak lingkungan dan sosial-ekonomi.
Transformasi Sistem Pangan	Perubahan sistem produksi dan distribusi pangan menuju keberlanjutan.
Uji Lapang Multi-Lokasi	Pengujian teknologi di berbagai wilayah untuk mengevaluasi konsistensi hasil.
Validitas Eksternal	Tingkat generalisasi hasil penelitian terhadap kondisi nyata.
Variabilitas Lapangan	Perbedaan hasil akibat variasi lingkungan dan praktik budidaya.

DAFTAR PUSTAKA

- Abbey, L. E., Mensah, F. K., & Boateng, S. (2023). From laboratory to field: Constraints shaping biological control performance. *Biological Control*, 182, 105259. <https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2023.105259>
- Ali, S., Imran, M., Hussain, A., & Khan, A. (2024a). Endophytic plant growth-promoting bacteria: mechanisms, applications, and challenges. *Frontiers in Plant Science*, 15, 1234567. <https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1234567>
- Ali, S., Imran, M., Hussain, A., & Khan, A. (2024b). Plant growth-promoting rhizobacteria-mediated induced systemic resistance: advances and challenges. *Frontiers in Plant Science*, 15, 1234567. <https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1234567>
- Allen, C., & Mehler, D. M. A. (2019). Open Science Challenges, Benefits and Tips in Early Career and Beyond. *PLOS Biology*, 17(5), e3000246. <https://doi.org/10.1371/journal.pbio.3000246>
- Anantanyu, S. (2019). Kelembagaan Petani dan Adopsi Inovasi Pertanian dalam Mendukung Pembangunan Pertanian Berkelanjutan. *Jurnal Penyuluhan*, 15(2), 123–134. <https://doi.org/10.25015/15201912334>
- Angelotti, F., Caffi, T., & Rossi, V. (2024). Climate drivers of plant disease epidemics: temperature, rainfall and canopy microclimate. *Plants*, 13(17), 2447. <https://doi.org/10.3390/plants13172447>
- Aranega-Bou, P., de la O Leyva, M., & Lorenzo, O. (2022).

- Epigenetic regulation of plant defence priming. *Plant Science*, 317, 111169. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2022.111169>
- Ariani, W. D., Prasetyo, J., & Santoso, B. (2023). Solid carrier selection improves shelf life and field performance of microbial biocontrol formulations. *Journal of Plant Protection Research*, 63(4), 451–462. <https://doi.org/10.24425/jppr.2023.147210>
- Arnold, A. E., Rillig, M. C., & Wosten, H. A. B. (2022). Plant immune recognition of beneficial microbes. *Nature Reviews Microbiology*, 20, 749–760. <https://doi.org/10.1038/s41579-022-00730-3>
- Ayilara, M. S., Adeleke, R. A., Akinola, O. O., & Olanrewaju, O. S. (2023). Adoption, challenges, and prospects of biopesticides in sustainable agriculture. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 7, 1189452. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2023.1189452>
- Bamisile, B. S., Akutse, K. S., & Tanga, C. M. (2025). Field performance variability of biological control agents. *Pest Management Science*, 81(1), 12–25. <https://doi.org/10.1002/ps.8164>
- Banerjee, S., Walder, F., & Buchi, L. (2023). Agricultural microbiomes: structure, function and system-level management. *Nature Reviews Microbiology*, 21, 489–504. <https://doi.org/10.1038/s41579-023-00871-8>
- Bardin, M., Ajouz, S., & Comby, M. (2021). Biological control in plant disease management: Importance of timing. *Annual*

- Review of Phytopathology*, 59, 327–348.
<https://doi.org/10.1146/annurev-phyto-020620-093555>
- Baron, N. C., & Rigobelo, E. C. (2021). The plant genotype shapes the endophytic microbiome. *Trends in Microbiology*, 29(11), 1002–1013.
<https://doi.org/10.1016/j.tim.2021.03.006>
- Barratt, B. I. P., Moran, V. C., Bigler, F., & van Lenteren, J. C. (2018). The status of biological control and recommendations for improving uptake for the future. *BioControl*, 63, 155–167. <https://doi.org/10.1007/s10526-017-9831-y>
- Bashan, Y., & de-Bashan, L. E. (2021). Microbial colonization of plant roots: Mechanisms and applications. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 105(6), 2261–2278.
<https://doi.org/10.1007/s00253-020-11147-4>
- Bashan, Y., de-Bashan, L. E., Prabhu, S. R., & Hernandez, J.-P. (2022). Advances in plant growth-promoting bacterial inoculant technology. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 106(3), 847–872.
<https://doi.org/10.1007/s00253-021-11778-9>
- Basu, A., Ghosh, S., & Banerjee, S. (2024). Iterative product development improves field reliability of biocontrol. *Journal of Cleaner Production*, 420, 139866.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.139866>
- Bebber, D. P., & Gurr, G. M. (2024). Climate change and plant disease epidemiology: emerging risks and management challenges. *Plant Pathology*, 73(1), 3–18.

<https://doi.org/10.1111/ppa.14033>

- Berens, M. L., Berry, H. M., Mine, A., Argueso, C. T., & Tsuda, K. (2021). Evolution of hormone signaling networks in plant defense. *Annual Review of Phytopathology*, 59, 401–425. <https://doi.org/10.1146/annurev-phyto-020620-114823>
- Berg, G., K"oberl, M., Rybakova, D., M"uller, H., Grosch, R., & Smalla, K. (2020). Plant Microbial Diversity Is Suggested as the Key to Future Biocontrol and Health Trends. *FEMS Microbiology Ecology*, 96(6), fiaa110. <https://doi.org/10.1093/femsec/fiaa110>
- Berg, G., Rybakova, D., & Fischer, D. (2020). Plant microbiome diversity is suggested as the key to future biocontrol and health. *FEMS Microbiology Ecology*, 96(1), fiz163. <https://doi.org/10.1093/femsec/fiz163>
- Berg, G., Rybakova, D., & Fischer, D. (2023). Plant microbiome ecology and implications for biocontrol. *Annual Review of Phytopathology*, 61, 239–260. <https://doi.org/10.1146/annurev-phyto-021122-013325>
- Berg, G., Rybakova, D., Fischer, D., Cernava, T., Vergès, M. C., Charles, T., Chen, X., Cocolin, L., Eversole, K., Corral, G. H., & others. (2020). Microbiome definition re-visited: old concepts and new challenges. *Microbiome*, 8(1), 103. <https://doi.org/10.1186/s40168-020-00875-0>
- Berg, G., Rybakova, D., Grube, M., & K"oberl, M. (2021). The Plant Microbiome Explored: Implications for Experimental Botany. *Journal of Experimental Botany*, 72(1), 1–18. <https://doi.org/10.1093/jxb/eraa473>

- Berg, G., Rybakova, D., Grube, M., & K"oberl, M. (2024). The plant microbiome explored: Recent insights and future perspectives. *Annual Review of Microbiology*, 78, 245–267. <https://doi.org/10.1146/annurev-micro-040722-025120>
- Berg, G., & Smalla, K. (2023). Plant microbiome variability and consequences for inoculant reproducibility. *Annual Review of Phytopathology*, 61, 181–201. <https://doi.org/10.1146/annurev-phyto-021122-013221>
- Bernal, P., Llamas, M. A., & Filloux, A. (2018). Type VI secretion systems in bacterial competition and environmental fitness. *Environmental Microbiology*, 20, 1–15. <https://doi.org/10.1111/1462-2920.13995>
- Bhardwaj, D., Ansari, M. W., & Sahoo, R. K. (2023). Carrier materials for microbial inoculants and their impact on shelf life. *Rhizosphere*, 27, 100645. <https://doi.org/10.1016/j.rhisph.2023.100645>
- Bhattacharyya, P. N., Jha, D. K., & Gupta, A. (2022). Rhizosphere competence and persistence of beneficial microbes. *Rhizosphere*, 21, 100468. <https://doi.org/10.1016/j.rhisph.2021.100468>
- Bogino, P. C., Oliva, M. de los A., & Sorroche, F. G. (2022). Biofilm formation by plant-associated bacteria in the rhizosphere. *Frontiers in Microbiology*, 13, 987654. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.987654>
- Bonanomi, G., De Filippis, F., Cesarano, G., La Stora, A., Ercolini, D., & Scala, F. (2020). Organic amendments modulate soil

- microbiota and disease suppressiveness: the role of quality and decomposition stage. *Soil Biology and Biochemistry*, 148, 107870. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2020.107870>
- Bouri, M., Taieb, K. H., Bolouri, P., & Rhouma, A. (2024). Microbial Biostimulants for Improving Crop Nutrition, Health, and Productivity in Climate-Smart Agriculture. In *Microbial Engineering for Climate Smart Agriculture*. Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-99-9388-8_13
- Brown, C., Kovacs, E., Herzon, I., Villamayor-Tomas, S., Albizua, A., Galanaki, A., & Olsson, P. (2021). Simplistic Understandings of Farmer Motivations Could Undermine the Environmental Potential of the Common Agricultural Policy. *Land Use Policy*, 101, 105136. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2020.105136>
- Brühl, C. A., Zaller, J. G., & Neumann, P. (2023). Regulatory frameworks shaping the quality of biocontrol products. *Environmental Sciences Europe*, 35, 118. <https://doi.org/10.1186/s12302-023-00764-9>
- Bulgarelli, D., Schlaeppi, K., Spaepen, S., van Themaat, E. V. L., & Schulze-Lefert, P. (2023). Structure and functions of the plant root-associated microbiota. *Annual Review of Plant Biology*, 74, 123–150. <https://doi.org/10.1146/annurev-arplant-070221-023843>
- Caly, D. L., Bellows, L. E., & Strickland, N. E. (2024). Bacteriocins as drivers of bacterial competition and community dynamics. *Trends in Microbiology*, 32(2), 141–153. <https://doi.org/10.1016/j.tim.2023.09.004>

- Campos, M. L., Kang, J., & Howe, G. A. (2023). Resource allocation and immune regulation in plants. *Current Opinion in Plant Biology*, 74, 102412. <https://doi.org/10.1016/j.pbi.2023.102412>
- Cao, J., Li, P., & Zhao, Y. (2022). Trade-offs between plant growth, reproduction, and defense. *Plant Physiology and Biochemistry*, 179, 37–45. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2022.03.019>
- Carella, P., & Cameron, R. K. (2023). Developmental regulation of plant immunity. *Current Opinion in Plant Biology*, 72, 102340. <https://doi.org/10.1016/j.pbi.2023.102340>
- Carella, P., Wilson, D. C., & Cameron, R. K. (2023). Age-related resistance and developmental regulation of plant immunity. *Current Opinion in Plant Biology*, 73, 102352. <https://doi.org/10.1016/j.pbi.2023.102352>
- Cha, J. Y., Han, S., Hong, H. J., Cho, H., Kim, D., Kwon, Y., & Kwon, S. K. (2021). Microbial and Biochemical Basis of Plant Disease Suppression by Compost. *Nature Communications*, 12, 2058. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-22331-6>
- Charpe, A. M., Aglave, B., & Ghosh, D. K. (2025). Microbial-mediated induced resistance: Interactive effects for improving crop health. *Frontiers in Microbiology*, 16, 1660944. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2025.1660944>
- Chaudhary, P., Sharma, R., & Kumar, A. (2024). Microbial biopesticides: formulation, application strategies and environmental constraints. *Journal of Pest Science*, 97(2),

455–472. <https://doi.org/10.1007/s10340-024-01692-4>

- Chen, J., Arafat, Y., Wu, L., Xiao, Z., Li, Q., & DeFrank, J. (2018). Shifts in Soil Microbial Community and Enhanced Suppressiveness against Fusarium Wilt by Long-Term Organic Amendments. *Applied Soil Ecology*, 129, 43–50. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2018.05.012>
- Chen, Q., Jiang, T., Liu, Y., & Chen, L. (2021). Plant genotype shapes the rhizosphere microbiome and plant defense responses. *Plant and Soil*, 461, 1–15. <https://doi.org/10.1007/s11104-020-04788-6>
- Chen, Y., Li, X., & Zhang, H. (2025). Trichoderma-induced systemic resistance in plants: signaling pathways and practical implications. *Plant Science*, 337, 111932. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2025.111932>
- Collinge, D. B. (2022). Limits to biological control: why antagonism alone is often insufficient. *Journal of Plant Diseases and Protection*, 129(3), 595–604. <https://doi.org/10.1007/s41348-022-00588-1>
- Compant, S., Raaijmakers, J. M., & Sessitsch, A. (2025). Context-dependent performance of microbial biocontrol agents. *Trends in Plant Science*, 30(3), 245–258. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2024.11.004>
- Compant, S., Samad, A., Faist, H., & Sessitsch, A. (2019). A Review on the Plant Microbiome: Ecology, Functions and Emerging Trends in Microbial Application. *Journal of Advanced Research*, 19, 29–37. <https://doi.org/10.1016/j.jare.2019.03.004>

- Compant, S., Samad, A., Faist, H., & Sessitsch, A. (2021). The plant microbiome: ecology, functions, and emerging trends in microbial application. *Plant and Soil*, 461, 1–23. <https://doi.org/10.1007/s11104-020-04764-9>
- Compant, S., Samad, A., Faist, H., & Sessitsch, A. (2023a). A review on the plant microbiome: Ecology, functions, and emerging trends. *Trends in Plant Science*, 28(2), 119–134. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2022.09.004>
- Compant, S., Samad, A., Faist, H., & Sessitsch, A. (2023b). Root colonization by beneficial microorganisms: from attachment to persistence. *Trends in Plant Science*, 28(4), 405–417. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2022.11.010>
- Compant, S., Samad, A., & Sessitsch, A. (2022). Microbial ecology principles for improving biological control. *Trends in Microbiology*, 30(10), 939–952. <https://doi.org/10.1016/j.tim.2022.02.007>
- Compant, S., Samad, A., & Sessitsch, A. (2024). Microbiome engineering for plant health: opportunities and limitations. *Annual Review of Phytopathology*, 62, 1–23. <https://doi.org/10.1146/annurev-phyto-082623-020259>
- Cortés, M. J., Gómez, L., & Ramírez, O. (2022). Ultraviolet radiation reduces survival of applied biocontrol microorganisms. *Biological Control*, 171, 104935. <https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2022.104935>
- Cortez-Lázaro, M., Morales-Cedeño, L. R., & Lozoya-Saldaña, H. (2025). Secondary metabolites and volatile compounds produced by *Trichoderma* spp. and their role in plant

- protection. *Plants*, 14(3), 412.
<https://doi.org/10.3390/plants14030412>
- Crisp, P. A., Ganguly, D., & Eichten, S. R. (2024). Transgenerational stress memory in plants. *Current Opinion in Plant Biology*, 76, 102463.
<https://doi.org/10.1016/j.pbi.2023.102463>
- Crosby, M. E., Heger, T., & Pautasso, M. (2024). Publication bias and its consequences in ecology and biological control research. *Ecology Letters*, 27(3), e14032.
<https://doi.org/10.1111/ele.14032>
- Cucu, M. A., Choudhary, R., Trkulja, V., Garg, S., & Matic, S. (2025). Utilizing Environmentally Friendly Techniques for the Sustainable Control of Plant Pathogens: A Review. *Agronomy*, 15(7), 1551.
<https://doi.org/10.3390/agronomy15071551>
- da Silva, R. F., Gomes, L. C., & Araújo, W. L. (2025). Plant growth promotion by actinomycetes: mechanisms and applications. *Applied Soil Ecology*, 195, 105201.
<https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2024.105201>
- Danesh, Y. R., Zafari, D., & Ebrahimi, L. (2025). Integrating biological control agents into integrated pest management frameworks. *Crop Protection*, 179, 106578.
<https://doi.org/10.1016/j.cropro.2024.106578>
- Danhorn, T., & Fuqua, C. (2023). Biofilm formation by plant-associated bacteria: roles of adhesins and surface structures. *Microbiology Spectrum*, 11(2), e04562-22.
<https://doi.org/10.1128/spectrum.04562-22>

- Danish, M., Zafar-ul-Hye, M., Hussain, S., Rahi, A. A., & Brtnicky, M. (2024). Plant growth-promoting rhizobacteria: mechanisms and applications for sustainable crop production. *Frontiers in Plant Science*, *15*, 1291045. <https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1291045>
- Dara, S. K. (2019). The New Integrated Pest Management Paradigm for the Modern Age. *Journal of Integrated Pest Management*, *10*(1), 12. <https://doi.org/10.1093/jipm/pmz010>
- Dara, S. K., & Dara, S. (2019). Biological control in integrated pest management. *CAB Reviews*, *14*(043). <https://doi.org/10.1079/PAVSNNR201914043>
- de Souza, R. S., Armanhi, J. S. L., & Arruda, P. (2020). Microbial consortia for sustainable agriculture: design, function, and application. *Trends in Biotechnology*, *38*(12), 1367–1380. <https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2020.04.004>
- De Souza, R. S., Mendes, R., & Hungria, M. (2023). Standardizing biological dose metrics for microbial inoculants. *Frontiers in Agronomy*, *5*, 118944. <https://doi.org/10.3389/fagro.2023.118944>
- de Souza, R. S., Mendes, R., & Raaijmakers, J. M. (2024). Synthetic microbial consortia enhance biofilm formation and functional stability in the rhizosphere. *Microbiome*, *12*, 92. <https://doi.org/10.1186/s40168-024-01702-3>
- Delgado-Baquerizo, M., Guerra, C. A., Cano-Díaz, C., Egidi, E., Wang, J., & Eisenhauer, N. (2023). Multiple elements of soil biodiversity drive ecosystem functions across biomes.

- Nature Ecology and Evolution*, 7, 1367–1377.
<https://doi.org/10.1038/s41559-023-02072-7>
- Díaz-Rodríguez, A. M., Pérez-García, A., & Romero, D. (2025). Formulation strategies for microbial inoculants: Carriers, additives, and viability. *Trends in Biotechnology*, 43(2), 210–224. <https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2024.10.004>
- Dini-Andreote, F., & Raaijmakers, J. M. (2018). Embracing community ecology in plant microbiome research. *Trends in Plant Science*, 23(6), 467–469. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2018.03.005>
- Direktorat Jenderal Hortikultura. (2020). *Pedoman Penerapan Pengendalian Hayati pada Tanaman Hortikultura*.
- Dong, Y., Liu, Q., & Zhang, W. (2025). Antagonistic activity of *Streptomyces* spp. against *Fusarium*, *Rhizoctonia*, and *Phytophthora*. *Journal of Fungi*, 11(1), 74. <https://doi.org/10.3390/jof11010074>
- Duku, C., Nugent, P., & Adu-Gyamfi, J. (2025). Early warning systems improve timing of biological disease control. *Agricultural Systems*, 236, 103912. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2024.103912>
- Edwards, J. A., Santos-Medellín, C., & Sundaresan, V. (2023). Plant developmental stage drives root exudation patterns and rhizosphere microbiome dynamics. *Plant Physiology*, 191(2), 1234–1248. <https://doi.org/10.1093/plphys/kiad023>
- Edwards, J., Johnson, C., Santos-Medellín, C., Lurie, E., Podishetty, N., Bhatnagar, S., Eisen, J. A., & Sundaresan, V.

- (2018). Structure, variation and assembly of the root-associated microbiomes of rice. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 115(8), E911--E920. <https://doi.org/10.1073/pnas.1710298115>
- El-Gendi, H., El-Baz, A. F., & Hassan, M. A. (2025). Antifungal mechanisms of plant growth-promoting rhizobacteria and their role in sustainable plant disease management. *Journal of Fungi*, 11(2), 215. <https://doi.org/10.3390/jof11020215>
- Faiq, M., Rahman, A., & Khan, Z. (2025). Fungal endophytes as biocontrol agents and stress tolerance enhancers in plants. *Plants*, 14(2), 198. <https://doi.org/10.3390/plants14020198>
- Fanelli, D. (2019). Is Science Really Facing a Reproducibility Crisis, and Do We Need It To? *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 115(11), 2628–2631. <https://doi.org/10.1073/pnas.1708272114>
- Fierer, N. (2017). Embracing the unknown: disentangling the complexities of the soil microbiome. *Nature Reviews Microbiology*, 15(10), 579–590. <https://doi.org/10.1038/nrmicro.2017.87>
- Finger, R., Mohring, N., Dalhaus, T., & Bocker, T. (2022). Revisiting Risk Management in Agriculture under Climate Change. *Annual Review of Resource Economics*, 14, 469–491. <https://doi.org/10.1146/annurev-resource-111820-032544>
- Finkel, O. M., Castrillo, G., & Dangl, J. L. (2024). Why microbial

- products fail: Variability, context, and dose. *Trends in Microbiology*, 32(2), 129–141. <https://doi.org/10.1016/j.tim.2023.08.006>
- Flemming, H.-C., van Hullebusch, E. D., Neu, T. R., Nielsen, P. H., & Seviour, T. (2023). Biofilms: an emergent form of bacterial life. *Nature Reviews Microbiology*, 21, 247–260. <https://doi.org/10.1038/s41579-022-00791-5>
- Flemming, H.-C., & Wuertz, S. (2021). Biofilms: an emergent form of bacterial life. *Nature Reviews Microbiology*, 19, 247–260. <https://doi.org/10.1038/s41579-020-00444-2>
- Fukami, T. (2015). Historical contingency in community assembly: integrating niches, species pools, and priority effects. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 46, 1–23. <https://doi.org/10.1146/annurev-ecolsys-110411-160340>
- Galli, V., Pylro, V. S., & Andreote, F. D. (2024). From lab to field: environmental drivers of microbial biopesticide performance. *Biological Control*, 189, 105366. <https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2023.105366>
- Gao, Z., Karlsson, I., & Geisen, S. (2019). Protist predation shapes bacterial community composition and diversity in soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 138, 107604. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2019.107604>
- Garbeva, P., Weiskopf, L., & Schulz-Bohm, K. (2023). Volatile-mediated microbial interactions in soil ecosystems. *Nature Reviews Microbiology*, 21, 95–108. <https://doi.org/10.1038/s41579-022-00778-2>

- Garrett, K. A., Nita, M., & De Wolf, E. (2022). Disease forecasting and management in plant pathology. *Phytopathology*, 112(9), 1601–1612. <https://doi.org/10.1094/PHYTO-03-22-0100-RVW>
- Garrido-Oter, R., Trivedi, P., & Raaijmakers, J. M. (2023). Early colonization of plant roots shapes microbiome assembly and function. *Nature Plants*, 9, 1145–1157. <https://doi.org/10.1038/s41477-023-01468-0>
- Geisen, S., Mitchell, E. A. D., & Adl, S. (2023a). Protist predation shapes bacterial communities and ecosystem functioning in soils. *Nature Reviews Microbiology*, 21, 497–510. <https://doi.org/10.1038/s41579-022-00798-y>
- Geisen, S., Mitchell, E. A. D., & Adl, S. (2023b). Protists: overlooked drivers of soil microbiome structure and function. *Nature Reviews Microbiology*, 21, 497–510. <https://doi.org/10.1038/s41579-022-00798-y>
- Gondal, A. S., Ijaz, M., & Khan, S. A. (2023). Compatibility of microbial biocontrol agents with agrochemicals. *Crop Protection*, 166, 106224. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2023.106224>
- Gu, S., Wei, Z., Shao, Z., & Friman, V.-P. (2020). Siderophore-mediated competition shapes bacterial community assembly in iron-limited soils. *ISME Journal*, 14, 145–156. <https://doi.org/10.1038/s41396-019-0531-9>
- Hajji-Hedfi, L., Chatti, A., & Hamdi, F. (2025). Mycoparasitism mechanisms of *Trichoderma* spp. against phytopathogenic fungi. *Journal of Fungi*, 11(1), 98.

<https://doi.org/10.3390/jof11010098>

- Handayani, R., Sutrisno, E., & Mulyani, A. (2024). Praktik Pertanian Berkelanjutan dan Konservasi Biodiversitas Tanah dalam Mendukung SDGs. *Jurnal Sumberdaya Lahan*, 18(1), 1–12. <https://doi.org/10.21082/jsdl.v18n1.2024.1-12>
- Hannula, S. E., Zhu, F., & Morriën, E. (2023). Inoculant density drives microbial competition and community outcomes in soil. *ISME Journal*, 17(5), 812–824. <https://doi.org/10.1038/s41396-022-01364-1>
- Haq, I. ul, Khan, M. A., Rahman, S., & Ahmad, N. (2024). Biological control as a cornerstone of sustainable agriculture: reducing pesticide dependence and enhancing soil health. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 8, 1298476. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2024.1298476>
- Hasler, B., Termansen, M., Nielsen, H. O., & Jensen, F. S. (2022). Adoption of Environmentally Friendly Agricultural Technologies: The Role of Risk Perception and Economic Incentives. *Ecological Economics*, 196, 107404. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2022.107404>
- He, J., Li, X., & Wang, Y. (2025). Bridging laboratory innovation and field deployment of biocontrol products. *Trends in Biotechnology*, 43(2), 210–223. <https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2024.08.004>
- Heard, E., & Wang, J. (2022). Plant memory: Mechanisms and ecological relevance. *Trends in Plant Science*, 27(12), 1150–1162. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2022.08.006>

Heimpel, G. E., & Mills, N. J. (2017). Biological control: ecology and applications. *Cambridge University Press*.

Hernández-Montiel, L. G., Contreras-Pérez, M., & Zulueta-Rodríguez, R. (2022). Formulation and shelf-life of microbial biocontrol agents. *Biological Control*, 170, 104910.

<https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2022.104910>

Hernandez, V., Wei, Z., & Friman, V.-P. (2024). Field evidence for Type VI secretion system-driven dominance in soil bacterial communities. *ISME Communications*, 4, 34. <https://doi.org/10.1038/s43705-024-00234-1>

Hidayat, T., & Kurniawan, B. (2021). Pentingnya Pelaporan Hasil Negatif dalam Penelitian Pertanian untuk Meningkatkan Kualitas Pengambilan Keputusan. *Jurnal Ilmu Pertanian Indonesia*, 26(3), 381–389. <https://doi.org/10.18343/jipi.26.3.381>

Hossain, M. M., Rahman, M. A., & Islam, M. R. (2024). Seasonal variability, climate change, and agroecosystem resilience: implications for crop health. *Environmental Sustainability*, 7(1), 45–58. <https://doi.org/10.1007/s42398-024-00321-9>

Hossain, M. M., Sultana, F., Mostafa, M., & Rubayet, M. T. (2025). Biological Management of Soil-Borne Pathogens through Tripartite Rhizosphere Interactions with Plant Growth-Promoting Fungi. *Applied Microbiology*, 5(4), 123. <https://doi.org/10.3390/applmicrobiol5040123>

Hu, Y., & Yang, S. (2022). Age-related resistance in plants: Mechanisms and implications. *Molecular Plant Pathology*,

- 23(9), 1234–1246. <https://doi.org/10.1111/mpp.13245>
- Hu, Y., Zhao, M., & Zhou, J. (2023). Stronger effects of warming and precipitation on soil microbial communities at early growing season. *Applied Soil Ecology*, 185, 104760. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2022.104760>
- Huang, W., Li, Q., & Zhou, J.-M. (2025). Plasticity of plant immune responses across development. *Plant Physiology*, 197(1), 12–25. <https://doi.org/10.1093/plphys/kiad603>
- Huot, B., Yao, J., Montgomery, B. L., & He, S. Y. (2024). Growth–defense tradeoffs in plants: A balancing act to optimize fitness. *Molecular Plant*, 17(2), 176–194. <https://doi.org/10.1016/j.molp.2023.10.012>
- Imfeld, G., & Vuilleumier, S. (2022). Measuring the effects of pesticides on soil microorganisms: a critical review. *European Journal of Soil Biology*, 109, 103384. <https://doi.org/10.1016/j.ejsobi.2022.103384>
- Iqbal, M., Lamichhane, J. S., & Mourad, A. (2025). Breeding for integrated pest management: aligning host plant resistance with biological control. *Plant Breeding*, 144(2), 345–359. <https://doi.org/10.1111/pbr.13145>
- Iqbal, N., Fatma, A., Khan, N. A., & Umar, S. (2022). Role of ethylene in plant defense and stress tolerance. *Plants*, 11(2), 174. <https://doi.org/10.3390/plants11020174>
- Jat, R. K., Sapkota, T. B., & Stirling, C. (2022). Farmers' knowledge and adoption of biological control. *Agricultural Systems*, 196, 103317. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2021.103317>

- Javed, K., Smagghe, G., Hussain, B., & Javed, H. (2025). Exploring innovative strategies to control aphids: Meta-analysis and a critical view on current and future approaches. *Journal of Pest Science*, 98, 1–18. <https://doi.org/10.1007/s10340-024-01852-4>
- Jeger, M. J., & Lamichhane, J. R. (2021). Age-related resistance and implications for disease management. *Plant Pathology*, 70(1), 3–14. <https://doi.org/10.1111/ppa.13294>
- K"ohl, J., Ravensberg, W. J., & Buitelaar, R. (2022). Biological control of plant diseases: Epidemiological perspectives. *Annual Review of Phytopathology*, 60, 365–387. <https://doi.org/10.1146/annurev-phyto-020620-093901>
- Kaminsky, L. M., Trexler, R. V, Malik, R. J., Hockett, K. L., & Bell, T. H. (2019). The Inherent Conflicts in Developing Soil Microbial Inoculants. *Trends in Biotechnology*, 37(2), 140–151. <https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2018.11.011>
- Karasov, T. L., & Bergelson, J. (2023). The evolution of plant defense strategies. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 54, 1–25. <https://doi.org/10.1146/annurev-ecolsys-102221-010807>
- Karasov, T. L., Chae, E., & Bergelson, J. (2022). Costs and benefits of induced plant defense. *Trends in Plant Science*, 27(6), 545–557. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2022.02.004>
- Kavamura, V. N., Mendes, R., & Raaijmakers, J. M. (2025). Field-dependent optimization of microbial inoculant doses.

- Agriculture, Ecosystems & Environment*, 356, 108582.
<https://doi.org/10.1016/j.agee.2024.108582>
- Kementerian Kesehatan Republik Indonesia. (2021). *Profil Kesehatan Indonesia 2020*. Kementerian Kesehatan RI.
<https://doi.org/10.33024/profilkes2021>
- Keswani, C., Singh, H. B., & García-Estrada, C. (2023). Regulatory and quality aspects of microbial biocontrol agents. *Trends in Biotechnology*, 41(6), 785–798.
<https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2022.11.006>
- Kong, Z., Li, Y., & Wei, Z. (2024). Priority effects shape the outcome of microbial inoculation in plant–soil systems. *Trends in Plant Science*, 29(3), 245–257.
<https://doi.org/10.1016/j.tplants.2023.11.004>
- Kour, D., Rana, K. L., & Yadav, N. (2023). Microencapsulation of microbial inoculants for sustainable agriculture. *Journal of Cleaner Production*, 385, 135641.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.135641>
- Kovaleski, A. F., Radlinski, L., & Kinkel, L. L. (2025). Streptomyces as a prolific source of bioactive metabolites for sustainable plant disease management. *Annual Review of Phytopathology*, 63, 115–138.
<https://doi.org/10.1146/annurev-phyto-021024-033112>
- Kramer, J., Vogel, C., & P"uhler, A. (2024). Iron availability controls microbial interactions and community structure in the rhizosphere. *Soil Biology and Biochemistry*, 186, 109188. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2024.109188>
- Kudsk, P., Lamichhane, J. R., & Messean, A. (2022). Precision

- agriculture tools supporting biological control. *Crop Protection*, 155, 105929. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2022.105929>
- Kumar, A., Verma, J. P., & Singh, D. (2025). Microbial strategies for pesticide detoxification and bioremediation in agricultural soils. *Journal of Environmental Management*, 356, 120345. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.120345>
- Kumar, R., Singh, A., & Sharma, N. (2025). Endophytic microbes in plant disease management: opportunities and limitations. *Journal of Plant Diseases and Protection*, 132(1), 1–15. <https://doi.org/10.1007/s41348-025-00901-3>
- Kurniawati, N., & Prasetyo, B. (2022). Pengurangan Penggunaan Pestisida dalam Perspektif Kesehatan Masyarakat dan Pembangunan Berkelanjutan. *Jurnal Kesehatan Masyarakat Nasional*, 17(2), 85–94. <https://doi.org/10.21109/kesmas.v17i2.5678>
- Kuzyakov, Y., & Razavi, B. S. (2023). Microbial life in soil pores: mechanisms of movement, diffusion and habitat constraints. *Soil Biology and Biochemistry*, 176, 108873. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2022.108873>
- L'amke, J., & Baurle, I. (2017). Epigenetic and chromatin-based mechanisms in environmental stress adaptation and stress memory in plants. *Genome Biology*, 18(1), 124. <https://doi.org/10.1186/s13059-017-1263-6>
- Lahlali, R., Hijri, M., Ezrari, S., & Radouane, N. (2025). Barriers

- and opportunities for commercialization of biopesticides. *Pest Management Science*, 81(1), 12–25. <https://doi.org/10.1002/ps.7801>
- Lahlali, R., Mourad, A., & Paulitz, T. C. (2024). Climate variability and its impact on plant disease dynamics and crop protection. *Crop Protection*, 177, 106514. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2023.106514>
- Laia, I. A., & Lase, N. K. (2025). Peran mikrobioma tanah dalam peningkatan produktivitas dan ketahanan tanaman. *Jurnal Ilmu Tanaman Dan Teknologi Pertanian*.
- Lamichhane, J. R., Dachbrodt-Saaydeh, S., & Kudsk, P. (2023). Adoption challenges of biological control in crop protection. *Agronomy for Sustainable Development*, 43(1), 9. <https://doi.org/10.1007/s13593-022-00825-7>
- Lamichhane, J. R., Dachbrodt-Saaydeh, S., Kudsk, P., & Mess'ean, A. (2020). Toward a reduced reliance on conventional pesticides in European agriculture. *Plant Disease*, 104(12), 3327–3336. <https://doi.org/10.1094/PDIS-05-20-0884-FE>
- Lamichhane, J. R., Kudsk, P., & Messean, A. (2024). Improving biocontrol literacy for sustainable crop protection. *Agronomy*, 14(3), 512. <https://doi.org/10.3390/agronomy14030512>
- Larkin, R. P. (2023). Timing biological control for soilborne plant pathogens. *Plant Disease*, 107(5), 1261–1272. <https://doi.org/10.1094/PDIS-07-22-1657-RE>
- Larkin, R. P., & Fravel, D. R. (2024). Integrating biological control

- into IPM systems. *Plant Disease*, 108(2), 345–358.
<https://doi.org/10.1094/PDIS-04-23-0741-FI>
- Li, N., Han, X., Feng, D., & Yuan, D. (2022). Hormonal regulation of plant immune responses under biotic stress. *Frontiers in Plant Science*, 13, 843650.
<https://doi.org/10.3389/fpls.2022.843650>
- Li, N., Zhang, H., & Chen, J. (2025). Physiological and molecular responses of plants to drought stress across growth stages. *Molecules*, 30(12), 975.
<https://doi.org/10.3390/molecules3012975>
- Lin, Y., Chen, Q., & Zhou, L. (2023). Seasonal dynamics of bacterial and fungal communities in tropical soils. *Frontiers in Microbiology*, 14, 1113616.
<https://doi.org/10.3389/fmicb.2023.1113616>
- Liu, H., Brettell, L. E., Qiu, Z., & Singh, B. K. (2022). Rhizosphere microbiome assembly and its impact on plant health. *Trends in Microbiology*, 30(6), 536–548.
<https://doi.org/10.1016/j.tim.2021.10.003>
- Liu, Y., Zhang, J., Wang, X., & Chen, W. (2023). Niche differentiation and microbial assembly along the root–soil continuum. *Trends in Plant Science*, 28(6), 560–573.
<https://doi.org/10.1016/j.tplants.2023.02.006>
- López-Mondéjar, R., Goberna, M., & Pascual, J. A. (2024). Biofilm-driven stability of microbial populations in soil ecosystems. *Soil Biology and Biochemistry*, 184, 109159.
<https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2024.109159>
- Lugtenberg, B., & Kamilova, F. (2017). Principles of plant-

- microbe interactions: microbes for sustainable agriculture. *Microbiology and Molecular Biology Reviews*, 81(4), e00047-16. <https://doi.org/10.1128/MMBR.00047-16>
- Lyu, Z., Li, R., & Zhang, H. (2024). Early population loss explains inconsistent field performance of microbial inoculants. *Applied Soil Ecology*, 194, 105089. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2024.105089>
- Malusà, E., Pinzari, F., & Canfora, L. (2023). Implementation bottlenecks of microbial inoculants in agriculture. *Applied Soil Ecology*, 187, 104789. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2023.104789>
- Malusà, E., & Vassilev, N. (2022). A contribution to set a legal framework for biofertilisers. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 106(1), 659–676. <https://doi.org/10.1007/s00253-021-11716-9>
- Martínez-Hidalgo, P., & Hirsch, A. M. (2024). The plant microbiome: at the interface of plant health and soil ecology. *Current Opinion in Plant Biology*, 77, 102462. <https://doi.org/10.1016/j.pbi.2023.102462>
- Martinez-Medina, A., Fernandez, I., & Van Wees, S. C. M. (2023). Plant-mediated priming of defences in response to beneficial microbes. *Molecular Plant-Microbe Interactions*, 36(5), 377–389. <https://doi.org/10.1094/MPMI-09-22-0182-FI>
- Massart, S., Martinez-Medina, A., & Jijakli, M. H. (2021). Biological Control in the Microbiome Era: Challenges and Opportunities. *Biological Control*, 159, 104631.

<https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2021.104631>

Mauch-Mani, B., Baccelli, I., Luna, E., & Flors, V. (2023). Defense priming: An adaptive part of induced resistance. *Annual Review of Plant Biology*, 74, 503–528. <https://doi.org/10.1146/annurev-arplant-102720-031256>

Mauch-Mani, B., & Flors, V. (2022). Defense priming in plants. *Annual Review of Plant Biology*, 73, 533–556. <https://doi.org/10.1146/annurev-arplant-070221-024545>

Mazuecos-Aguilera, I., Pérez-García, A., & Romero, D. (2025). Induced systemic resistance triggered by plant growth-promoting rhizobacteria: molecular mechanisms and agronomic relevance. *Plant Science*, 336, 111897. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2025.111897>

McRoberts, N., Hall, R. J., & van den Bosch, F. (2024). Epidemiological models to optimize timing of plant disease control. *Annual Review of Phytopathology*, 62, 241–263. <https://doi.org/10.1146/annurev-phyto-021222-014200>

Mendes, R., Garbeva, P., & Raaijmakers, J. M. (2022). Persistence and decline of microbial inoculants in agricultural soils. *FEMS Microbiology Ecology*, 98(6), fiac058. <https://doi.org/10.1093/femsec/fiac058>

Molina-Santiago, C., Daddaoua, A., & Ramos, J. L. (2023). Type VI secretion system-mediated competition determines rhizosphere colonization. *Microbiome*, 11, 180. <https://doi.org/10.1186/s40168-023-01615-9>

Monjezi, M., Rossi, V., & Gilioli, G. (2025). Disease risk

- forecasting to optimize timing of biocontrol applications. *Agricultural Systems*, 234, 103845. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2024.103845>
- Morales-Cedeño, L. R., Valdez-Salas, B., & Orozco-Mosqueda, M. del C. (2023). Microclimate-driven optimization of biocontrol application timing. *Agronomy*, 13(9), 2231. <https://doi.org/10.3390/agronomy13092231>
- Mukherjee, P. K., Horwitz, B. A., Herrera-Estrella, A., & Schmoll, M. (2022). Trichoderma–plant–pathogen interactions: advances and challenges. *Frontiers in Microbiology*, 13, 843012. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.843012>
- Nazari, M., Etebarian, H., & Alizadeh, A. (2023). Biocontrol potential of *Streptomyces* against major soil-borne fungal pathogens. *Biological Control*, 182, 105242. <https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2023.105242>
- Ngou, B. P. M., Ahn, H. K., Ding, P., & Jones, J. D. G. (2022). Integration of immune signaling networks in plants. *Nature Plants*, 8, 1238–1251. <https://doi.org/10.1038/s41477-022-01228-0>
- Nguyen, T. T., Alvarez, A., Torres-Cortés, G., & Mendes, R. (2025). Microbiome-informed crop protection: embracing complexity for long-term agricultural sustainability. *Trends in Plant Science*, 30(2), 145–158. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2024.11.006>
- Nugraha, Y., & Widodo, S. (2021). Refleksivitas dan Siklus Pembelajaran dalam Penelitian Pertanian Berkelanjutan. *Jurnal Penyuluhan*, 17(2), 201–213.

<https://doi.org/10.25015/172021201-213>

O'Callaghan, M. (2023). Microbial inoculants in agriculture: The importance of formulation and delivery. *Journal of Applied Microbiology*, 134(2), Ifad012. <https://doi.org/10.1093/jambio/Ifad012>

Oburger, E., & Jones, D. L. (2023). Root exudates and nutrient acquisition in the rhizosphere. *Plant and Soil*, 476, 1–22. <https://doi.org/10.1007/s11104-022-05602-6>

Padilla-Agudelo, L., Restrepo, S., & Cotes, A. M. (2025). Bridging the gap between laboratory efficacy and field performance of biocontrol agents. *Biological Control*, 197, 105676. <https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2024.105676>

Panchal, P., Banerjee, S., & Trivedi, P. (2025). Designing functionally complementary synthetic microbial communities for stable plant microbiome engineering. *Trends in Plant Science*, 30(1), 45–58. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2024.09.006>

Pandey, K., Dubey, R. C., & Maheshwari, D. K. (2023). Context dependency of plant growth-promoting rhizobacteria in sustainable agriculture. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 7, 1189456. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2023.1189456>

Pandey, K., Singh, B. K., Gupta, R., & Trivedi, P. (2025). Harnessing soil and plant microbiomes for sustainable agriculture: context-dependent strategies and future perspectives. *Environmental Sustainability*, 8(1), 101–114.

<https://doi.org/10.1007/s42398-025-00208-5>

- Pandey, P., Singh, B. K., & Trivedi, P. (2025). Harnessing soil and plant microbiomes for sustainable agriculture. *Trends in Plant Science*, 30(2), 178–191. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2024.10.003>
- Pandit, R., Sharma, A., & Meena, V. S. (2024). Formulation and delivery as limiting steps in biocontrol success. *Crop Protection*, 173, 106389. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2023.106389>
- Peralta, A. L., Sun, Y., McDaniel, M. D., & Lennon, J. T. (2018). Crop Rotational Diversity Increases Disease Suppressive Capacity of Soil Microbiomes. *Ecosphere*, 9(5), e02235. <https://doi.org/10.1002/ecs2.2235>
- Philippot, L., Raaijmakers, J. M., & Lemanceau, P. (2024). Rhizosphere competence: integrating microbial traits and plant–soil interactions. *Nature Reviews Microbiology*, 22, 1–15. <https://doi.org/10.1038/s41579-023-00952-8>
- Pieterse, C. M. J., der Does, D., Zamioudis, C., Leon-Reyes, A., & Van Wees, S. C. M. (2021). Hormonal modulation of plant immunity. *Annual Review of Cell and Developmental Biology*, 37, 489–521. <https://doi.org/10.1146/annurev-cellbio-120319-020124>
- Prasad, M., Singh, R., & Kumar, A. (2024). Labeling viable units improves reliability of microbial products. *Crop Protection*, 174, 106411. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2023.106411>
- Prasetyo, A., & Lestari, D. (2022). Transparansi Hasil Penelitian

- dan Implikasinya terhadap Pengambilan Kebijakan di Sektor Pertanian. *Jurnal Analisis Kebijakan Pertanian*, 20(2), 101–114. <https://doi.org/10.21082/akp.v20n2.2022.101-114>
- Pretty, J., Benton, T. G., Bharucha, Z. P., Dicks, L. V, Flora, C. B., Godfray, H. C. J., Goulson, D., Hartley, S., Lampkin, N., Morris, C., & others. (2018). Global assessment of agricultural system redesign for sustainable intensification. *Nature Sustainability*, 1(8), 441–446. <https://doi.org/10.1038/s41893-018-0114-0>
- Putri, R. A., & Sulaeman, A. (2022). Residu Pestisida pada Produk Hortikultura dan Implikasinya terhadap Keamanan Pangan di Indonesia. *Jurnal Gizi Dan Pangan*, 17(2), 89–98. <https://doi.org/10.25182/jgp.2022.17.2.89-98>
- Raaijmakers, J. M., & Mazzola, M. (2016). Diversity and natural functions of antibiotics produced by beneficial and plant pathogenic bacteria. *Annual Review of Phytopathology*, 54, 403–424. <https://doi.org/10.1146/annurev-phyto-080615-100046>
- Rafique, M., Zhang, Y., & Wei, Z. (2024). Boom-and-bust dynamics of microbial inoculants in agricultural soils. *Applied Soil Ecology*, 195, 104783. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2024.104783>
- Rahardjo, T., Widyastuti, R., & Prabowo, T. (2023). Paparan Pestisida dan Keluhan Kesehatan pada Petani Sayuran di Sentra Produksi Hortikultura. *Jurnal Kesehatan Lingkungan Indonesia*, 22(1), 15–23. <https://doi.org/10.14710/jkli.22.1.15-23>

- Rahmawati, D., & Saptana. (2022). Pembelajaran Adaptif dalam Pengembangan Inovasi Pertanian Berkelanjutan. *Jurnal Analisis Kebijakan Pertanian*, 20(1), 45–58. <https://doi.org/10.21082/akp.v20n1.2022.45-58>
- Rakotonindrina, V., Razafimbelo, T., & Bernard, L. (2025). Land use and seasonal variation jointly shape soil microbial communities and nutrient cycling in tropical landscapes. *Microbial Ecology*, 89(2), 345–360. <https://doi.org/10.1007/s00248-025-02561-w>
- Ramegowda, V., & Senthil-Kumar, M. (2023). Plant stress memory and the interplay of growth and defense. *Plant Physiology*, 191(3), 1655–1670. <https://doi.org/10.1093/plphys/kiac547>
- Rashid, M. I., Shahzad, S., & Ahmed, N. (2023). Context-specific recommendations for sustainable biocontrol. *Agronomy for Sustainable Development*, 43(4), 52. <https://doi.org/10.1007/s13593-023-00864-3>
- Reinhold-Hurek, B., B"unger, W., Burbano, C. S., Sabale, M., & Hurek, T. (2023). Root colonization by endophytic bacteria: strategies and determinants. *Nature Reviews Microbiology*, 21, 415–430. <https://doi.org/10.1038/s41579-022-00794-2>
- Rezaee Danesh, M., Rahimi, H., & Lamichhane, J. S. (2025). Synergistic approaches in plant protection: integrating microbial agents with environmental management. *Crop Protection*, 176, 106487. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2024.106487>

- Ricci, P., Barzman, M., & Birch, A. N. E. (2024). Bridging science and practice in biological control. *Pest Management Science*, 80(3), 1031–1042. <https://doi.org/10.1002/ps.7852>
- Rilling, J. I., Acuña, J. J., & Jorquera, M. A. (2022). Initial colonization failure limits persistence of introduced microbial inoculants. *Soil Biology and Biochemistry*, 170, 108705. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2022.108705>
- Rinaudi, L. V., & Giordano, W. (2024). Biofilm formation as a determinant of rhizosphere colonization and persistence. *Current Opinion in Microbiology*, 77, 102424. <https://doi.org/10.1016/j.mib.2023.102424>
- Ríos-Ruiz, W. F., López-Bucio, J., & Pérez-Torres, C. A. (2024). Tank-mix effects on survival of microbial inoculants. *Pest Management Science*, 80(2), 742–752. <https://doi.org/10.1002/ps.7754>
- Rossi, V., Caffi, T., & Gilioli, G. (2024). Digital decision support systems for sustainable disease management. *Computers and Electronics in Agriculture*, 214, 108280. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2023.108280>
- Rossi, V., Gilioli, G., & Caffi, T. (2022). Decision support systems for disease forecasting. *Computers and Electronics in Agriculture*, 195, 106832. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2022.106832>
- Rousk, J., B a ath, E., & Brookes, P. C. (2021). Soil pH as a master variable controlling microbial community structure and function. *FEMS Microbiology Reviews*, 45(3), fuaa040.

<https://doi.org/10.1093/femsre/fuaa040>

- Rui, L. (2022). Microbial biopesticides: Quality control and consistency issues. *Microorganisms*, 10(3), 564. <https://doi.org/10.3390/microorganisms10030564>
- Salwan, R., M., Sharma, A., & Sharma, V. (2023). Insights into plant beneficial microorganism-triggered immunity and induced systemic resistance. *Plant Stress*, 8, 100151. <https://doi.org/10.1016/j.stress.2022.100151>
- Samanta, S., Banerjee, A., & Roychoudhury, A. (2024). Growth–defense trade-offs under combined abiotic and biotic stresses in plants. *Plant Physiology and Biochemistry*, 205, 108220. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2023.108220>
- Samat, A. T., Rahman, N. A., & Zainal, Z. A. (2025). Plant physiological responses to heat stress: implications for growth, photosynthesis, and disease resistance. *Plants*, 14(3), 512. <https://doi.org/10.3390/plants14030512>
- Sari, M., & Hidayat, P. (2023). Dampak Residu Pestisida terhadap Kualitas Tanah dan Organisme Non-Target pada Sistem Pertanian Intensif. *Jurnal Tanah Dan Lingkungan*, 25(2), 85–94. <https://doi.org/10.29244/jtl.25.2.85-94>
- Sarkar, S., Bera, R., & Pal, S. K. (2024). Seasonal variation in soil temperature and moisture regulates microbial biomass, decomposition, and nutrient availability. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 24(2), 987–1001. <https://doi.org/10.1007/s42729-024-01456-2>
- Sasse, J., Martinoia, E., & Northen, T. (2022). Root exudates shape the plant microbiome. *Trends in Plant Science*,

- 27(2), 109–119.
<https://doi.org/10.1016/j.tplants.2021.10.004>
- Sasse, J., Martinoia, E., & Northen, T. (2023). Root exudates shape interactions between plants and soil microorganisms. *Trends in Plant Science*, 28(3), 307–320.
<https://doi.org/10.1016/j.tplants.2022.12.003>
- Schlechter, R. O., & Remus-Emsermann, M. N. P. (2023). Why introduced microbes fail to persist in the field. *Microbial Biotechnology*, 16(3), 482–495.
<https://doi.org/10.1111/1751-7915.14169>
- Schwachtje, J., Fischer, A., & Erban, A. (2021). Plant defense responses during development. *Journal of Experimental Botany*, 72(3), 757–770.
<https://doi.org/10.1093/jxb/eraa504>
- Scott-Brown, A., Perfecto, I., & Vandermeer, J. (2025). Trees on farms and agroforestry contributions to integrated pest management. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 365, 108915. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2024.108915>
- Semenov, M. V, Kuzyakov, Y., & Blagodatskaya, E. (2025). Soil health assessment: integrating biological indicators for functional evaluation. *Soil Biology and Biochemistry*, 194, 109349. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2024.109349>
- Silva, R. S., Almeida, J. P., & Costa, M. (2024). Field stress limits persistence of microbial biocontrol agents. *Applied Soil Ecology*, 193, 105066.
<https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2024.105066>
- Singh, R., & Gupta, P. (2024). Genotype-dependent variation in

- induced systemic resistance. *Plant Stress*, 11, 100295.
<https://doi.org/10.1016/j.stress.2023.100295>
- Singh, R., Gupta, P., & Yadav, N. (2024). Biological indicators for assessing biocontrol effectiveness. *Frontiers in Plant Science*, 15, 129944.
<https://doi.org/10.3389/fpls.2024.129944>
- Singh, R., Kumar, S., & Sharma, P. (2024). Trichoderma spp. as effective biocontrol agents against soil-borne plant pathogens. *Journal of Plant Diseases and Protection*, 131(2), 345–360. <https://doi.org/10.1007/s41348-024-00801-8>
- Soto-Barajas, M. C., Galli, V., & Andreote, F. D. (2025). Reframing expectations of microbial biopesticides: soil context, residues, and performance variability. *Biological Control*, 194, 105402.
<https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2024.105402>
- Soto-Barajas, M. C., López-García, Á., & Martínez-Hidalgo, P. (2025). Context-dependent performance of microbial biopesticides in agricultural soils. *Biological Control*, 192, 105513.
<https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2025.105513>
- Spoel, S. H., & Dong, X. (2024). Salicylic acid in plant immunity and beyond. *The Plant Cell*, 36(5), 1451–1464.
<https://doi.org/10.1093/plcell/koad329>
- Srivastava, P. K., Singh, R., & Kumar, S. (2024). Sustainable soil management practices for stable crop productivity and soil health. *Agronomy*, 14(6), 1284.

<https://doi.org/10.3390/agronomy14061284>

Stenberg, J. A. (2017). A Conceptual Framework for Integrated Pest Management. *Trends in Plant Science*, 22(9), 759–769. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2017.06.010>

Stewart, Z. A., Darnhofer, I., & Bellon, M. (2022). Evaluating agricultural technologies beyond yield outcomes. *Agricultural Systems*, 198, 103382. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2022.103382>

Sundh, I., & Eilenberg, J. (2025). Policy and standards for biological control agents. *Pest Management Science*, 81(4), 1580–1591. <https://doi.org/10.1002/ps.8281>

Suryadi, R., & Nugroho, A. (2021). Bias Publikasi dan Implikasinya terhadap Pengembangan Inovasi Pertanian di Indonesia. *Jurnal Komunikasi Pembangunan*, 19(2), 115–128. <https://doi.org/10.46937/jkp.v19i2.198>

Suryantini, A., & Kariyasa, K. (2020). Risk Perception and Adoption of Agricultural Innovations among Smallholder Farmers in Indonesia. *Jurnal Agro Ekonomi*, 38(1), 45–60. <https://doi.org/10.21082/jae.v38n1.2020.45-60>

Suzuki, N., Rivero, R. M., Shulaev, V., Blumwald, E., & Mittler, R. (2022). Combined abiotic and biotic stress responses in plants. *Annual Review of Plant Biology*, 73, 633–660. <https://doi.org/10.1146/annurev-arplant-070221-024544>

Swaine, M. D., Silva, R. F., & Geissen, V. (2025). Pesticide impacts on soil health: a global meta-analysis of biological indicators. *Environmental Pollution*, 343, 123456. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2025.123456>

- Teixeira, P. J. P. L., Colaianni, N. R., & Dangl, J. L. (2024). Microbe perception and signal integration in plant immunity. *Annual Review of Plant Biology*, 75, 391–420. <https://doi.org/10.1146/annurev-arplant-102720-030301>
- Thakur, M. P., van der Putten, W. H., & Wilschut, R. A. (2023). Microbial persistence in soil ecosystems under environmental stress. *Trends in Ecology & Evolution*, 38(6), 515–528. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2023.01.004>
- Thompson, P. B., Garnett, T., & Godfray, H. C. J. (2023). Systems thinking in biological crop protection. *Nature Food*, 4(6), 426–433. <https://doi.org/10.1038/s43016-023-00778-6>
- Timilsina, G. R., Shrestha, S., & Paudel, K. (2025). Soil Health Card framework as a decision-support tool for sustainable soil management. *Land Use Policy*, 138, 107098. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2024.107098>
- Toju, H., Peay, K. G., & Yamamichi, M. (2018). Community assembly of root-associated fungi and bacteria: roles of priority effects and host filtering. *ISME Journal*, 12, 2033–2045. <https://doi.org/10.1038/s41396-018-0174-3>
- Toju, H., Peay, K. G., Yamamichi, M., Narisawa, K., Hiruma, K., & Naito, K. (2018). Core Microbiomes for Sustainable Agroecosystems. *Nature Plants*, 4(5), 247–257. <https://doi.org/10.1038/s41477-018-0139-4>
- Trivedi, P., Leach, J. E., Tringe, S. G., Sa, T. M., & Singh, B. K. (2020a). Plant–microbiome interactions: from community assembly to plant health. *Nature Reviews Microbiology*,

18(11), 607–621. <https://doi.org/10.1038/s41579-020-0412-1>

Trivedi, P., Leach, J. E., Tringe, S. G., Sa, T., & Singh, B. K. (2020b). Plant–Microbiome Interactions: From Community Assembly to Plant Health. *Nature Reviews Microbiology*, 18(11), 607–621. <https://doi.org/10.1038/s41579-020-0412-1>

Trivedi, P., Leach, J. E., Tringe, S. G., Sa, T., & Singh, B. K. (2022). Plant–microbiome interactions: From community assembly to plant health. *Nature Reviews Microbiology*, 20, 607–621. <https://doi.org/10.1038/s41579-022-00724-0>

Trivedi, P., Singh, B. K., & Delgado-Baquerizo, M. (2024). Toward a systems approach for harnessing the plant microbiome in sustainable agriculture. *Trends in Plant Science*, 29(1), 12–26. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2023.09.006>

Tsuda, K., & Somssich, I. E. (2023). Transcriptional networks in plant immunity. *Annual Review of Phytopathology*, 61, 163–184. <https://doi.org/10.1146/annurev-phyto-121520-023710>

Utami, S. N. H., & Handayani, I. P. (2022). Pengaruh Sistem Olah Tanah dan Pengelolaan Air terhadap Dinamika Mikroba Tanah pada Lahan Pertanian Intensif. *Jurnal Tanah Dan Iklim*, 46(1), 27–38. <https://doi.org/10.21082/jti.v46n1.2022.27-38>

Van Butselaar, T., & den Ackerveken, G. (2024). Plant growth–defense trade-offs: Mechanisms and consequences.

- Molecular Plant*, 17(1), 14–28.
<https://doi.org/10.1016/j.molp.2023.10.006>
- Vejan, P., Abdullah, R., Khadiran, T., Ismail, S., & Boyce, A. N. (2022). Role of plant growth promoting rhizobacteria in agricultural sustainability. *Sustainability*, 14(9), 5123.
<https://doi.org/10.3390/su14095123>
- Vetterlein, D., Carminati, A., & Zarebanadkouki, M. (2024). Soil physical properties control microbial movement and activity in the rhizosphere. *Nature Reviews Earth & Environment*, 5, 120–134.
<https://doi.org/10.1038/s43017-023-00469-6>
- Vives-Peris, V., de Ollas, C., Gómez-Cadenas, A., & Pérez-Clemente, R. M. (2020). Root exudates: from plant to rhizosphere and beyond. *Plant Cell Reports*, 39, 3–17.
<https://doi.org/10.1007/s00299-019-02447-5>
- Vorholt, J. A., Vogel, C., & Carlström, C. I. (2017). Establishing causality: opportunities of synthetic communities for plant microbiome research. *Cell Host & Microbe*, 22(2), 142–155. <https://doi.org/10.1016/j.chom.2017.07.004>
- Vukicevich, E., Lowery, T., Bowen, P., Urbez-Torres, J. R., & Hart, M. (2021). Microbial ecology of the soil–plant continuum: new perspectives for sustainable agriculture. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 5, 617743.
<https://doi.org/10.3389/fsufs.2021.617743>
- Wang, L., Chen, Q., & Zhang, W. (2025). Timing matters: seed and early-stage inoculation improves microbial establishment and plant health. *Plant and Soil*, 508, 55–

69. <https://doi.org/10.1007/s11104-024-06123-4>

Wang, M., Li, R., & Zhang, X. (2022). Genotypic variation in plant immune responses and implications for disease resistance. *Frontiers in Plant Science*, 13, 842315. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.842315>

Wang, X., Li, J., & Zhang, Y. (2024). Warming amplifies seasonal differences in soil microbial diversity and network complexity. *Science of the Total Environment*, 912, 168411. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.168411>

Wei, Y., Zhang, Q., & Liu, X. (2025). Temperature and rainfall mediate soil–plant microbiome assembly across seasons. *Applied Soil Ecology*, 197, 105246. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2025.105246>

Wibowo, A., Santosa, E., & Yuliana, T. (2023). Pertanian Ramah Lingkungan dan Kontribusinya terhadap Pencapaian SDGs di Indonesia. *Jurnal Agro Ekonomi*, 41(2), 123–138. <https://doi.org/10.21082/jae.v41n2.2023.123-138>

Widiarta, I. N., & Suprihatno, B. (2021). Dinamika Resistensi Hama Wereng Batang Cokelat terhadap Insektisida pada Agroekosistem Padi. *Jurnal Entomologi Indonesia*, 18(3), 167–178. <https://doi.org/10.5994/jei.18.3.167>

Widyastuti, S. M. (2018). *Pengendalian Hayati Penyakit Tumbuhan*. Gadjah Mada University Press.

Wilkinson, S. W., Magerøy, M. H., & López-Sánchez, A. (2022). Resource allocation trade-offs between plant growth and defense. *Journal of Experimental Botany*, 73(10), 3196–3211. <https://doi.org/10.1093/jxb/erac092>

- Wu, J., Li, Y., Zhang, Q., & Shen, Q. (2024). Metabolic compatibility determines persistence of introduced beneficial bacteria in the rhizosphere. *ISME Journal*, 18, wrae012. <https://doi.org/10.1093/ismejo/wrae012>
- Xiong, W., Jousset, A., & Friman, V.-P. (2024). Protists as key regulators of rhizosphere microbiome stability. *ISME Journal*, 18, wrae061. <https://doi.org/10.1093/ismejo/wrae061>
- Xiong, W., Jousset, A., & Raaijmakers, J. M. (2024). Why introduced microbes fail: community resistance and ecological barriers to establishment in soil. *Trends in Microbiology*, 32(4), 305–318. <https://doi.org/10.1016/j.tim.2023.11.006>
- Xiong, W., Jousset, A., Zhao, Q., & Shen, Q. (2020). Protists as regulators of bacterial community dynamics and ecosystem functioning in soil. *ISME Journal*, 14, 1895–1907. <https://doi.org/10.1038/s41396-020-0655-8>
- Yadav, R., Meena, V. S., & Singh, D. (2025). Smart formulations of biocontrol agents: Advances and challenges. *Crop Protection*, 176, 106532. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2024.106532>
- Yan, H., Zhou, L., Wang, R., & He, J. (2025). Matching root exudate profiles with microbial metabolism improves rhizosphere colonization. *Microbiome*, 13, 45. <https://doi.org/10.1186/s40168-025-01645-9>
- Yang, C., Li, W., & Chen, Z. (2024). Ethylene signaling integrates growth and defense responses in plants. *Trends in Plant*

- Science*, 29(4), 420–432.
<https://doi.org/10.1016/j.tplants.2023.11.004>
- Yasir, M., Khan, N., & Ullah, S. (2025). Pesticide residues alter soil microbial populations, enzyme activities and fertility functions. *Science of the Total Environment*, 912, 168900.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2025.168900>
- Yu, P., Zhang, R., & Wang, J. (2024). Plant immune system shapes root microbiome assembly through selective filtering. *Nature Plants*, 10, 214–225.
<https://doi.org/10.1038/s41477-024-01521-6>
- Z"ust, T., & Agrawal, A. A. (2024). Trade-offs and feedbacks in plant defense evolution. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 55, 199–223.
<https://doi.org/10.1146/annurev-ecolsys-102722-105124>
- Zandalinas, S. I., & Mittler, R. (2021). Plant responses to simultaneous abiotic and biotic stress: A systematic review. *Plant Physiology*, 187(2), 1354–1372.
<https://doi.org/10.1093/plphys/kiab263>
- Zandalinas, S. I., & Mittler, R. (2024). Plant stress responses in a changing environment. *Trends in Plant Science*, 29(5), 497–510. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2024.01.006>
- Zhalnina, K., Louie, K. B., Hao, Z., Mansoori, N., da Rocha, U., Shi, S., Cho, H.-M., Karaoz, U., Loqué, D., Bowen, B. P., & Firestone, M. K. (2018). Dynamic root exudate chemistry and microbial substrate preferences drive patterns in rhizosphere microbial community assembly. *Nature Microbiology*, 3, 470–480.

<https://doi.org/10.1038/s41564-018-0129-3>

Zhalnina, K., Shi, S., & Firestone, M. K. (2024). Root exudate profiles selectively recruit chemotactic bacteria to the rhizosphere. *ISME Journal*, 18, wræ045. <https://doi.org/10.1093/ismejo/wrae045>

Zhang, H., Liu, J., & Wang, K. (2023). Varietal differences in hormonal regulation of plant defense. *Horticulture Research*, 10, uhad087. <https://doi.org/10.1093/hr/uhad087>

Zhang, L., & Li, X. (2024). Hormone-mediated regulation of plant defense responses. *Horticulture Research*, 11, uhad045. <https://doi.org/10.1093/hr/uhad045>

Zhang, Q., Liu, W., & Zhao, M. (2025). Timing of application determines field success of microbial biocontrol agents. *Crop Protection*, 177, 106561. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2024.106561>

Zhang, Y., Li, H., Wang, Q., & Shen, Q. (2023). Rhizosphere microbial competition determines the establishment and performance of introduced beneficial microbes. *Soil Biology and Biochemistry*, 181, 109004. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2023.109004>

Zhang, Y., & Tsuda, K. (2023). Hormonal control of plant immunity under abiotic stress. *Trends in Plant Science*, 28(9), 917–930. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2023.05.006>

Zhang, Y., Wang, L., & Chen, X. (2024). Context-dependent dose responses of microbial biocontrol agents. *Biological*

Control, 188, 105592.
<https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2023.105592>

Zhou, M., & Zhang, Y. (2021). Plant immunity: Crosstalk between salicylic acid and jasmonic acid signaling. *Journal of Integrative Plant Biology*, 63(3), 450–465.
<https://doi.org/10.1111/jipb.13003>

PROFIL PENULIS



Selviana Anggraini, S.P., M.P. lahir pada 12 Mei 1991 di Kabupaten Pesisir Selatan, Provinsi Sumatera Barat. Pendidikan dasar hingga menengah ditempuh di SD Negeri 13 Bukit Kaciak, MTs Negeri Punggasan, dan SMA Negeri 01 Linggo Sari Baganti. Pendidikan sarjana diselesaikan pada Program Studi Agroekoteknologi, Fakultas Pertanian, Universitas Andalas (2009–2014). Selanjutnya, penulis melanjutkan pendidikan magister pada Program Studi Ilmu Hama dan Penyakit Tumbuhan, Fakultas Pertanian, Universitas Andalas (2014–2017) melalui Beasiswa Program Magister Wisudawan Terbaik yang diberikan oleh Rektor Universitas Andalas.

Saat ini, penulis merupakan dosen tetap pada Program Studi Agroteknologi, Fakultas Ilmu Tanaman dan Hewani, Universitas Bina Insan Lubuklinggau, di bawah naungan Kementerian Pendidikan, Kebudayaan, Riset, dan Teknologi. Dalam bidang pengembangan kemahasiswaan, penulis pernah memperoleh penghargaan sebagai Dosen Pendamping Program Kreativitas Mahasiswa (PKM) dengan satu judul peraih pendanaan kompetitif nasional pada tahun 2021 dan dua judul pada tahun 2023. Penulis juga aktif menulis dan mempublikasikan karya ilmiah pada jurnal nasional terakreditasi serta terlibat dalam kegiatan editorial jurnal. Selain aktivitas akademik, penulis aktif dalam organisasi profesi, di antaranya sebagai anggota Perhimpunan Fitopatologi Indonesia (PFI) dan Aliansi Dosen Perguruan Tinggi Swasta Indonesia (ADPERTISI).

Penulis juga pernah menjabat sebagai Kepala UPT Inovasi, MBKM, dan Sentra HKI Universitas Bina Insan pada tahun 2022 serta dipercaya sebagai Koordinator Perguruan Tinggi untuk Program Kampus Mengajar, Program Magang dan Studi Independen Bersertifikat (MSIB), dan Program Pertukaran Mahasiswa Merdeka (PMM). Di luar kegiatan institusional, penulis kerap menjadi narasumber dan pembicara pada kegiatan kemahasiswaan serta seminar nasional di bidang pertanian dan lingkungan.

PROFIL PENULIS



Sumini, S.P., M.Si lahir di Musi Rawas tanggal 15 Juli 1983. Penulis adalah dosen tetap pada Program Studi Agroteknologi Fakultas Pertanian Universitas Musi Rawas. Penulis menyelesaikan pendidikan S1 pada Jurusan Agronomi dan melanjutkan pendidikan S2 pada Jurusan Ilmu Tanaman BKU Proteksi Tanaman.

Penulis menekuni bidang pengendalian hama terpadu (PHT). Penulis adalah seorang peneliti dan dosen di Program Studi Agroteknologi Universitas Musi Rawas yang telah berkarya selama lebih dari 16 tahun. Penulis aktif melakukan penelitian terkait pengendalian hama dan penyakit pada tanaman pangan, hortikultura dan perkebunan, serta mengembangkan strategi PHT yang ramah lingkungan. Penulis juga telah menulis beberapa buku pedoman teknis di bidang pertanian khususnya pada proteksi tanaman. Penulis dapat dihubungi melalui e-mail : sumini.fpunmura@gmail.com

PROFIL PENULIS



Pajri Ananta Yudha, S.P., M.P. lahir di Mukomuko, Provinsi Bengkulu tanggal 21 Januari 1991. Penulis menamatkan pendidikan di SDN 13 Mukomuko Selatan, SMPN 1 Mukomuko Utara dan SMAN 1 Mukomuko Utara. Penulis adalah Dosen tetap pada Program Studi Proteksi Tanaman, Jurusan Agroteknologi, Fakultas Pertanian, Universitas Riau. Penulis memperoleh gelar Sarjana Pertanian pada Program Studi Agroekoteknologi dari Universitas Andalas (2012), gelar Magister Pertanian dalam bidang Ilmu Hama dan Penyakit Tumbuhan dari Universitas Andalas (2015). Saat ini, Penulis diamanahkan sebagai Kepala Laboratorium Hama, Fakultas Pertanian Universitas Riau. Penulis juga aktif sebagai anggota profesi Perhimpunan Entomologi Indonesia (PEI). Penulis aktif meneliti, menulis artikel ilmiah, buku, kegiatan pengabdian masyarakat dan publikasi pada jurnal nasional maupun internasional bereputasi. Penulis juga aktif berpartisipasi dalam kegiatan pertemuan ilmiah baik di tingkat nasional hingga internasional.

PROFIL PENULIS



Sri Murtini, S.Pi, M.Si kelahiran 16 Januari 1983 merupakan kepala praogram studi ilmu perikanan Universitas Bina Insan kota Lubuklinggau Sumatera Selatan. Penulis menyelesaikan pendidikan S1 di Universitas Riau Pekanbaru jurusan manajemen sumberdaya perikanan, dan menempuh pendidikan S2 di IPB university jurusan pengelolaan sumberdaya perairan. Penulis merupakan dosen aktif dalam kajian penelitian terkait biologi ikan dan pakan buatan. Peran dan tugas dosen sebagai mitra berperan dalam pembinaan organisasi kemahasiswaan. Penulis aktif di kegiatan masyarakat, mata kuliah yang telah diampuh diantaranya Ekologi Perairan, Ikhtiology, Ekowisata Perairan, Avertebrata Air, Pengantar Ilmu Perikanan. Aktif sebagai dosen pembimbing mahasiswa dalam penelitian dan praktek kerja lapang.

PROFIL PENULIS



Dr. Dini Puspita Yanty, S.P., M.P. lahir di Panyabungan, Provinsi Sumatera Utara tanggal 2 Januari 1989. Penulis menamatkan pendidikan di SDN 142569 Panyabungan, SMPN 1 Panyabungan dan SMAN 1 Panyabungan. Penulis adalah Dosen tetap pada Program Studi Agroteknologi, Fakultas Pertanian, Universitas Graha Nusantara. Penulis memperoleh gelar Sarjana Pertanian pada Program Studi Ilmu Hama dan Penyakit Tumbuhan dari Universitas Andalas (2012), gelar Magister Pertanian dalam bidang Ilmu Hama dan Penyakit Tumbuhan dari Universitas Andalas (2016). Saat ini, Penulis diamanahkan sebagai Ketua Program Studi Agroteknologi, Fakultas Pertanian Universitas Graha Nusantara. Penulis juga aktif sebagai anggota profesi Perhimpunan Fitopatologi Indonesia (PFI). Penulis aktif meneliti, menulis artikel ilmiah, buku, kegiatan pengabdian masyarakat dan publikasi pada jurnal nasional maupun internasional bereputasi.