

DASAR PERLINDUNGAN TANAMAN



AHMAD NADHIRA, SP, M.Si
Editor : Drs. Zuhri, M.Si

Dasar Perlindungan Tanaman

UU No 28 tahun 2014 tentang Hak Cipta

Fungsi dan sifat hak cipta Pasal 4

Hak Cipta sebagaimana dimaksud dalam Pasal 3 huruf a merupakan hak eksklusif yang terdiri atas hak moral dan hak ekonomi.

Pembatasan Pelindungan Pasal 26

Ketentuan sebagaimana dimaksud dalam Pasal 23, Pasal 24, dan Pasal 25 tidak berlaku terhadap:

- i. penggunaan kutipan singkat Ciptaan dan/atau produk Hak Terkait untuk pelaporan peristiwa aktual yang ditujukan hanya untuk keperluan penyediaan informasi aktual;
- ii. Penggandaan Ciptaan dan/atau produk Hak Terkait hanya untuk kepentingan penelitian ilmu pengetahuan;
- iii. Penggandaan Ciptaan dan/atau produk Hak Terkait hanya untuk keperluan pengajaran, kecuali pertunjukan dan Fonogram yang telah dilakukan Pengumuman sebagai bahan ajar; dan
- iv. penggunaan untuk kepentingan pendidikan dan pengembangan ilmu pengetahuan yang memungkinkan suatu Ciptaan dan/atau produk Hak Terkait dapat digunakan tanpa izin Pelaku Pertunjukan, Produser Fonogram, atau Lembaga Penyiaran.

Sanksi Pelanggaran Pasal 113

1. Setiap Orang yang dengan tanpa hak melakukan pelanggaran hak ekonomi sebagaimana dimaksud dalam Pasal 9 ayat (1) huruf i untuk Penggunaan Secara Komersial dipidana dengan pidana penjara paling lama 1 (satu) tahun dan/atau pidana denda paling banyak Rp100.000.000 (seratus juta rupiah).
2. Setiap Orang yang dengan tanpa hak dan/atau tanpa izin Pencipta atau pemegang Hak Cipta melakukan pelanggaran hak ekonomi Pencipta sebagaimana dimaksud dalam Pasal 9 ayat (1) huruf c, huruf d, huruf f, dan/atau huruf h untuk Penggunaan Secara Komersial dipidana dengan pidana penjara paling lama 3 (tiga) tahun dan/atau pidana denda paling banyak Rp500.000.000,00 (lima ratus juta rupiah).

Dasar Perlindungan Tanaman

Ahmad Nadhira, SP, M. Si



Dasar Perlindungan Tanaman

ISBN : 978-634-7283-48-1

Hak cipta dilindungi undang-undang. Dilarang keras menerjemahkan, memfotokopi, atau memperbanyak sebagian atau seluruh isi buku ini tanpa izin tertulis dari Penerbit.

Penulis : Ahmad Nadhira, SP, M. Si

Editor : Drs. Zuhri, M.Si

Url Buku : <https://bookstore.takaza.id/product/dasar-perlindungan-tanaman/>

Desain Cover : Innovatix Labs Team

Ukuran : ix, 225, Uk: 15.5x23 cm

Cetakan Pertama : Agustus 2025

Hak Cipta 2025, Pada Penulis

Isi diluar tanggung jawab percetakan

Copyright © 2025 by Takaza Innovatix Labs
All Right Reserved



Penerbit Takaza Innovatix Labs

Anggota Ikatan Penerbit Indonesia (IKAPI) No. 044/SBA/2023

Jl. Berlian Raya Blok M4, Pegambiran Ampalu Nan XX,
Lubuk Begalung, Kota Padang, Sumatera Barat

No Hp: +62 811 50321 47

Website: www.takaza.id

E-mail: bookspublishing@takaza.id

KATA PENGANTAR

Puji syukur ke hadirat Tuhan Yang Maha Esa atas limpahan rahmat dan karunia-Nya sehingga buku *Dasar Perlindungan Tanaman* ini dapat disusun dan disajikan sebagai referensi ilmiah dan praktis di bidang pertanian. Buku ini hadir untuk memenuhi kebutuhan akan literatur yang komprehensif mengenai konsep, prinsip, dan strategi perlindungan tanaman dalam menghadapi berbagai tantangan biotik dan abiotik yang mengancam produktivitas pertanian. Disusun secara sistematis, buku ini mencakup pembahasan tentang Organisme Pengganggu Tumbuhan (OPT), penyakit tanaman, gangguan abiotik, gulma, serta pendekatan pengendalian modern berbasis teknologi dan prinsip keberlanjutan.

Harapannya, buku ini dapat menjadi sumber belajar yang bermanfaat bagi mahasiswa, akademisi, penyuluh, serta praktisi di lapangan untuk memahami pendekatan holistik dalam menjaga kesehatan tanaman dan lingkungan. Dengan memadukan konsep ilmiah, studi kasus, dan inovasi teknologi, buku ini tidak hanya memperkaya khazanah ilmu perlindungan tanaman, tetapi juga mendorong pengembangan pertanian yang adaptif dan berkelanjutan. Kritik dan saran yang membangun dari para pembaca sangat diharapkan demi penyempurnaan edisi berikutnya. Selamat membaca dan semoga buku ini memberikan manfaat yang sebesar-besarnya.

Penulis

DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR.....	v
DAFTAR ISI	vi
DAFTAR GAMBAR	ix
BAB I HAKIKAT PERLINDUNGAN TANAMAN.....	1
A. Definisi dan Tujuan Perlindungan Tanaman	2
B. Perkembangan Ilmu Perlindungan Tanaman	4
C. Lingkup dan Peran Perlindungan Tanaman	7
D. Hubungan Perlindungan Tanaman dengan Disiplin Ilmu Lain.....	9
E. Tantangan Global dan Perspektif Masa Depan.....	13
F. Rangkuman.....	15
G. Latihan.....	16
BAB II Organisme Pengganggu Tumbuhan (OPT)m: Tinjauan Umum	19
A. Klasifikasi OPT	20
B. Faktor Pemicu Ledakan Populasi Organisme Pengganggu Tumbuhan (OPT)	22
C. Dampak OPT terhadap Produksi Pertanian	25
D. Peran Ekologi dalam Penyebaran OPT	28
E. Model Gangguan (Segitiga, Segi Empat, Segi Lima).....	30
F. Rangkuman.....	33
G. Latihan.....	34
BAB III SERANGGA DAN MOLUSKA SEBAGAI ORGANISME PENGGANGGU TANAMAN (OPT).....	37
A. Anatomi dan Fisiologi Serangga	38
B. Siklus Hidup dan Metamorfosis	41
C. Identifikasi Serangga Pengganggu	43
D. Organisme Pengganggu Tanaman (OPT) dari Golongan Moluska	46
E. Teknik Pengamatan dan Sampling di Lapangan	49
F. Rangkuman.....	51
G. Latihan.....	52
BAB IV VERTEBRATA SEBAGAI HAMA TANAMAN	55
A. Jenis-jenis Vertebrata Perusak Tanaman.....	56
B. Pola dan Waktu Serangan	58

C. Strategi Pengendalian Alami	60
D. Peran Predator dan Kompetitor	63
E. Risiko Ekologis dari Pengendalian Kimia	66
F. Rangkuman	68
G. Latihan	69
BAB V PENGENDALIAN ORGANISME PENGGANGGU	
TUMBUHAN	72
A. Pengendalian Fisik dan Mekanis	73
B. Pengendalian Kimia dan Dampaknya	75
C. Pengendalian Hayati: Musuh Alami OPT	78
D. Teknologi Perangkap dan Repelen	81
E. Pengendalian Terpadu (PHT): Konsep dan Komponen.....	84
F. Rangkuman	86
G. Latihan	87
BAB VI PENYAKIT TUMBUHAN YANG DISEBABKAN	
MIKROORGANISME.....	90
A. Penyakit Bakteri: Patogenesis dan Gejala	91
B. Jamur Penyebab Penyakit Tanaman	93
C. Infeksi Virus: Vektor dan Pencegahan.....	96
D. Nematoda Parasit: Mekanisme Serangan.....	99
E. Studi Kasus: Penyakit Penting di Tanaman Pangan	102
F. Rangkuman	104
G. Latihan	105
BAB VII PENYAKIT NON-INFEKSI: FAKTOR ABIOTIK	108
A. Malnutrisi Unsur Hara	109
B. Stres Lingkungan dan Gejala Fisiologis	111
C. Interaksi Tanaman dengan Kondisi Lingkungan	114
D. Pencegahan dan Koreksi Kondisi Tanaman	117
E. Teknik Deteksi Awal Gangguan Non-infeksi.....	120
F. Rangkuman	122
G. Latihan	123
BAB VIII GULMA: BIOLOGI, DAMPAK, DAN KLASIFIKASI	126
A. Definisi dan Peran Gulma dalam Agroekosistem	127
B. Ciri Morfologi dan Adaptasi Gulma.....	129
C. Dampak Ekonomi dan Kompetisi Sumber Daya	132
D. Klasifikasi Gulma Berdasarkan Habitat	134
E. Gulma Sebagai Indikator Kesehatan Lahan.....	137
F. Rangkuman	140
G. Latihan	141

BAB IX TEKNOLOGI DAN STRATEGI PENGENDALIAN	
GULMA.....	144
A. Teknik Kultur Teknis	145
B. Pengendalian Kimiawi dan Aplikasi Herbisida	147
C. Bioteknologi dalam Pengendalian Gulma.....	150
D. Gulma Resisten: Masalah dan Solusi	152
E. Studi Kasus: Strategi Sukses Pengendalian Gulma.....	155
F. Rangkuman.....	158
G. Latihan.....	158
BAB X INOVASI DAN TEKNOLOGI MODERN DALAM	
PERLINDUNGAN TANAMAN.....	161
A. Penggunaan Biopestisida dan Agen Hayati	162
B. Teknologi Penginderaan Jauh dan Drones	164
C. Sistem Informasi Pertanian Berbasis Data	166
D. Integrasi <i>Artificial Intelligence</i> (AI) dan <i>Machine Learning</i> (ML) dalam Pengendalian Hama Terpadu (PHT)	169
E. Pertanian Berkelanjutan dan Regeneratif: Masa Depan Perlindungan Tanaman	171
F. Rangkuman.....	174
G. Latihan.....	175
DAFTAR PUSTAKA.....	177

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1 Anatomi dan Fisiologi Serangga	39
Gambar 2 Strategi Pengendalian Alami	62
Gambar 3 Infeksi Virus: Vektor dan Pencegahan	97

BAB I

HAKIKAT PERLINDUNGAN TANAMAN

Perlindungan tanaman merupakan aspek fundamental dalam sistem pertanian modern yang bertujuan untuk menjaga produktivitas dan keberlanjutan ekosistem budidaya. Upaya perlindungan tidak hanya mencakup pencegahan terhadap serangan organisme pengganggu tumbuhan, tetapi juga mengintegrasikan pendekatan ekologis, teknis, dan sosial demi ketahanan pangan jangka panjang.

- **Tujuan Pembelajaran**

- Menjelaskan definisi dan tujuan utama perlindungan tanaman dalam konteks pertanian modern dan berkelanjutan.
- Menganalisis perkembangan ilmu perlindungan tanaman dari pendekatan konvensional hingga teknologi canggih seperti bioteknologi dan kecerdasan buatan.
- Mengidentifikasi cakupan dan peran strategis perlindungan tanaman dari aspek teknis, ekologis, sosial, dan kelembagaan.
- Menjelaskan keterkaitan perlindungan tanaman dengan berbagai disiplin ilmu seperti biologi, ekologi, teknologi informasi, dan kebijakan publik.
- Mengevaluasi tantangan global dalam bidang perlindungan tanaman serta merumuskan solusi berbasis teknologi dan kebijakan masa depan.

A. Definisi dan Tujuan Perlindungan Tanaman

Perlindungan tanaman merupakan cabang ilmu pertanian yang fokus pada pengendalian dan pencegahan gangguan organisme pengganggu tumbuhan (OPT), seperti hama, penyakit, dan gulma, yang berpotensi menurunkan hasil dan mutu tanaman budidaya. Dalam konteks akademik, perlindungan tanaman didefinisikan sebagai serangkaian tindakan ilmiah dan teknis yang diterapkan untuk mempertahankan kesehatan tanaman dari ancaman biotik dan abiotik (*Sharma et al., 2022*). Tujuan utamanya adalah memastikan stabilitas produksi serta keamanan pangan global. Ilmu ini tidak hanya mengandalkan pendekatan kimia, tetapi juga mencakup bioteknologi, pengelolaan agroekosistem, dan strategi pengendalian hayati.

Perlindungan tanaman mencerminkan integrasi antara ilmu dasar seperti biologi, patologi tanaman, dan entomologi dengan pendekatan terapan seperti teknologi pestisida dan rekayasa genetika. Menurut *Rodríguez-González et al. (2021)*, pendekatan holistik dalam perlindungan tanaman mencakup monitoring populasi OPT, pengendalian berbasis habitat, serta pemanfaatan varietas tahan penyakit. Hal ini sejalan dengan prinsip pengelolaan hama terpadu (*Integrated Pest Management, IPM*) yang kini menjadi kerangka dasar perlindungan tanaman di berbagai negara. Pendekatan ini menekankan keberlanjutan, efisiensi, dan keamanan lingkungan.

Definisi perlindungan tanaman juga terus berkembang seiring dengan tantangan baru dalam produksi pertanian, seperti perubahan iklim, perdagangan global, dan perkembangan resistensi pestisida. Dalam analisis kontemporer, perlindungan tanaman tidak hanya ditujukan untuk menjaga hasil panen, tetapi juga untuk melindungi biodiversitas dan stabilitas ekologi pertanian (*Zhang & Reitz, 2023*).

Perspektif ini mendorong perlunya inovasi dalam teknologi deteksi dini, seperti penggunaan *remote sensing*, drone, dan *machine learning* untuk memprediksi dan mengelola serangan OPT secara presisi.

Tujuan perlindungan tanaman meliputi empat aspek utama: menjaga produktivitas pertanian, menjamin mutu hasil panen, melindungi kesehatan manusia dan lingkungan, serta meningkatkan efisiensi penggunaan sumber daya. Studi *Bhandari et al. (2020)* menunjukkan bahwa kerugian hasil akibat serangan OPT dapat mencapai 20–40% secara global. Oleh sebab itu, perlindungan tanaman memiliki dampak signifikan terhadap stabilitas ekonomi petani dan ketersediaan pangan masyarakat. Dalam skala makro, sistem perlindungan tanaman yang efektif juga menjadi indikator ketahanan pangan nasional.

Salah satu tujuan penting dalam perlindungan tanaman modern adalah mengurangi ketergantungan pada pestisida sintetis. Pendekatan ini bertujuan menghindari kontaminasi lingkungan serta mencegah risiko terhadap kesehatan manusia. Oleh karena itu, penggunaan agens hayati seperti *Beauveria bassiana*, *Trichoderma spp.*, dan parasitoid alami kini semakin dikembangkan (*Molina-Hernández et al., 2021*). Praktik ini sejalan dengan strategi pembangunan pertanian berkelanjutan yang dicanangkan oleh Food and Agriculture Organization (FAO) dalam agenda pertanian hijau.

Perlindungan tanaman juga memiliki dimensi sosial-ekonomi yang signifikan. Menurut *Singh et al. (2023)*, penerapan perlindungan tanaman berbasis komunitas di negara berkembang dapat memperkuat kapasitas petani dalam mengelola ancaman hama, serta mendorong adopsi teknologi lokal. Edukasi petani, pelatihan lapangan, dan penyuluhan menjadi sarana penting dalam mentransfer pengetahuan

tentang deteksi dini, penggunaan pestisida yang tepat dosis, serta manajemen pascapanen yang efektif.

Secara keseluruhan, perlindungan tanaman merupakan pilar penting dalam sistem pertanian yang produktif, aman, dan berkelanjutan. Tujuan perlindungan tanaman tidak hanya bersifat teknis, tetapi juga meliputi keberlanjutan ekosistem, kesejahteraan petani, dan keselamatan konsumen. Dengan kemajuan teknologi dan pendekatan ilmiah interdisipliner, perlindungan tanaman masa kini dituntut adaptif, presisi, dan ramah lingkungan. Oleh karena itu, pemahaman yang mendalam mengenai definisi dan tujuan perlindungan tanaman menjadi kunci dalam membangun sistem pertanian masa depan yang resilien dan berdaya saing tinggi.

B. Perkembangan Ilmu Perlindungan Tanaman

Ilmu perlindungan tanaman mengalami perkembangan pesat sejak awal abad ke-20, seiring dengan meningkatnya kebutuhan akan produksi pangan yang tinggi dan berkelanjutan. Awalnya, pendekatan perlindungan tanaman lebih bersifat reaktif, yakni mengandalkan penggunaan pestisida sintesis secara intensif untuk membunuh hama dan penyakit. Periode revolusi hijau menjadi titik awal modernisasi proteksi tanaman dengan didorong oleh kemajuan di bidang kimia pertanian. Namun seiring waktu, muncul kesadaran akan dampak ekologis negatif dari pendekatan tunggal berbasis kimia, sehingga mendorong perubahan paradigma ke arah pengelolaan hama terpadu (*Integrated Pest Management*). Pendekatan ini menggabungkan berbagai teknik pengendalian yang kompatibel secara ekologis dan sosial (Ngowi *et al.*, 2021).

Kemajuan ilmu biologi molekuler dan genetika menjadi tonggak penting dalam transformasi pendekatan perlindungan tanaman. Penelitian-penelitian modern telah memungkinkan identifikasi gen ketahanan tanaman terhadap patogen dan serangga, sehingga pengembangan varietas unggul yang resisten menjadi strategi utama dalam mitigasi kerugian hasil pertanian. Teknologi rekayasa genetika dan CRISPR/Cas9 kini mulai digunakan untuk mempercepat pemuliaan tanaman yang memiliki sifat tahan hama dan penyakit. Pendekatan berbasis genomik ini mampu meningkatkan presisi dalam identifikasi dan manipulasi gen target secara spesifik (*Chen et al., 2022*).

Selain inovasi bioteknologi, perkembangan penting lainnya adalah pemanfaatan *remote sensing*, penginderaan jauh, dan kecerdasan buatan dalam sistem monitoring dan prediksi serangan OPT. Dengan teknologi ini, petani dan ahli agronomi dapat memperoleh informasi akurat secara real time mengenai kondisi tanaman dan potensi wabah hama. Studi *Liu et al. (2023)* menunjukkan bahwa penggunaan citra satelit dan *machine learning* dalam deteksi dini serangan hama terbukti meningkatkan efektivitas pengambilan keputusan dan mengurangi penggunaan pestisida berlebihan. Teknologi ini menjadi landasan penting dalam konsep *precision agriculture* yang sedang berkembang.

Perkembangan ilmu ekologi juga memperkaya perspektif dalam perlindungan tanaman. Para ahli kini menekankan pentingnya pemahaman hubungan antar organisme dalam agroekosistem. Pendekatan ekologi lanskap dan pertanian konservasi mendorong pelestarian musuh alami dan peningkatan biodiversitas pertanian sebagai strategi pengendalian hayati. Menurut *Morales et al. (2021)*, sistem pertanian yang memiliki keanekaragaman tanaman dan elemen

alami, seperti pagar hidup dan guludan, cenderung lebih tahan terhadap invasi hama dan penyakit. Hal ini menunjukkan bahwa pendekatan ekologi tidak hanya ramah lingkungan tetapi juga adaptif terhadap perubahan iklim.

Di bidang mikrobiologi tanaman, penelitian tentang mikrobioma tumbuhan juga memberi kontribusi besar terhadap ilmu perlindungan tanaman. Interaksi tanaman dengan mikroorganisme seperti *endofit*, *rhizobakteri*, dan *mikroba antagonis* kini dipandang sebagai bagian integral dari sistem pertahanan biologis tanaman. Studi *Ramírez et al. (2020)* menunjukkan bahwa manipulasi komunitas mikrobioma dapat meningkatkan ketahanan sistemik tanaman secara alami terhadap patogen. Pendekatan ini memperluas konsep perlindungan tanaman dari luar tubuh tanaman menjadi perlindungan berbasis interaksi mikroba dalam jaringan tanaman.

Perubahan regulasi global tentang keamanan pangan dan lingkungan turut mendorong pengembangan alternatif ramah lingkungan dalam perlindungan tanaman. Banyak negara dan organisasi internasional mulai melarang atau membatasi penggunaan pestisida tertentu, dan mendorong adopsi *bio-pesticides*, pestisida nabati, serta teknologi RNAi sebagai solusi masa depan. *Barrera et al. (2022)* menjelaskan bahwa bioformulasi dari metabolit sekunder tanaman dan mikroorganisme kini menjadi pasar berkembang dalam industri proteksi tanaman modern. Hal ini juga sejalan dengan tren konsumen global yang semakin peduli terhadap keberlanjutan dan produk pertanian organik.

Ilmu perlindungan tanaman tidak lagi bersifat disipliner sempit, melainkan menjadi bidang interdisipliner yang menggabungkan ekologi, teknologi informasi, bioteknologi, dan ilmu sosial.

Perkembangannya kini mencakup desain kebijakan pertanian berkelanjutan, pendidikan petani berbasis teknologi, serta integrasi dengan sistem pangan global. Pendekatan holistik ini diyakini dapat menjawab tantangan global seperti ketahanan pangan, resistensi hama, serta degradasi lingkungan. Dengan demikian, ilmu perlindungan tanaman terus berkembang sebagai pilar strategis dalam sistem pertanian masa depan yang inklusif, presisi, dan lestari.

C. Lingkup dan Peran Perlindungan Tanaman

Perlindungan tanaman memiliki lingkup yang sangat luas, meliputi berbagai aspek teknis, ekologis, sosial, dan ekonomi yang bertujuan menjaga keberlangsungan pertanian. Secara teknis, lingkup perlindungan tanaman mencakup identifikasi dan klasifikasi organisme pengganggu tumbuhan (OPT), strategi pengendalian, hingga pengembangan teknologi pemantauan dan prediksi serangan hama dan penyakit. Ilmu ini juga melibatkan pemahaman patologi tanaman, entomologi pertanian, dan ekofisiologi gulma. Menurut *Veresoglou et al. (2021)*, perlindungan tanaman tidak hanya mengatur intervensi saat serangan terjadi, tetapi juga memuat tindakan pencegahan, deteksi dini, dan penanggulangan berbasis prinsip keberlanjutan.

Peran utama perlindungan tanaman adalah melindungi hasil dan produktivitas tanaman budidaya dari gangguan biotik seperti hama, patogen, dan gulma, serta gangguan abiotik seperti kekeringan, salinitas, dan perubahan iklim. Dalam banyak sistem pertanian, serangan OPT dapat menyebabkan kerugian hasil antara 20–40% jika tidak dikelola secara efektif (*Ramos et al., 2020*). Oleh karena itu, peran perlindungan tanaman sangat strategis dalam menjamin ketahanan pangan nasional dan global. Selain menjaga kuantitas hasil,

perlindungan tanaman juga bertujuan meningkatkan kualitas produk agar sesuai dengan standar pasar domestik maupun ekspor.

Lingkup perlindungan tanaman tidak terbatas pada produksi pertanian saja, melainkan juga berdampak pada kesehatan manusia dan lingkungan. Penggunaan pestisida yang tidak bijak dapat menyebabkan pencemaran tanah, air, dan residu kimia pada produk pangan. Dalam konteks ini, peran perlindungan tanaman adalah memastikan bahwa sistem pengendalian OPT mengedepankan prinsip *food safety* dan kelestarian ekosistem. Pendekatan seperti *integrated pest and pesticide management* (IPPM) kini banyak dikembangkan untuk menyeimbangkan efektivitas pengendalian dengan keselamatan lingkungan (Tschumi et al., 2023).

Selain aspek teknis dan lingkungan, perlindungan tanaman juga memiliki peran penting dalam pemberdayaan petani. Transfer teknologi, pelatihan lapangan, dan penyuluhan menjadi bagian dari lingkup operasional perlindungan tanaman yang berdampak langsung pada kapasitas petani dalam mengenali dan menangani OPT. Kundu et al. (2022) menunjukkan bahwa peningkatan pengetahuan petani tentang teknik pengendalian hayati dan rotasi tanaman berkontribusi terhadap penurunan penggunaan pestisida dan peningkatan pendapatan usaha tani. Hal ini menunjukkan bahwa perlindungan tanaman juga memiliki dimensi edukatif dan sosial yang signifikan.

Di tingkat kelembagaan, lingkup perlindungan tanaman juga mencakup peran pemerintah, lembaga riset, serta sektor swasta dalam merancang kebijakan, regulasi, dan inovasi teknologi. Pemerintah bertugas memastikan pengawasan dan evaluasi penggunaan bahan pengendali OPT, pengujian varietas tahan penyakit, serta mengatur peredaran pestisida. Sementara itu, lembaga penelitian dan universitas

berperan dalam menghasilkan solusi ilmiah berbasis data dan teknologi lokal. *Martins et al. (2021)* menyatakan bahwa kolaborasi lintas sektor sangat diperlukan untuk menciptakan sistem perlindungan tanaman yang adaptif dan responsif terhadap tantangan pertanian modern.

Peran perlindungan tanaman juga semakin penting dalam konteks perubahan iklim dan globalisasi. Perpindahan patogen dan hama lintas batas negara akibat perdagangan dan migrasi iklim memperluas risiko terhadap tanaman pangan dunia. Sistem karantina tumbuhan, deteksi cepat, serta jaringan komunikasi antar negara menjadi bagian dari lingkup perlindungan tanaman global. *Morimoto et al. (2023)* menekankan pentingnya penguatan sistem pengawasan berbasis digital dan kolaborasi regional untuk mencegah penyebaran wabah baru seperti *fall armyworm* atau *Xylella fastidiosa*.

Secara keseluruhan, perlindungan tanaman memainkan peran vital dalam membentuk sistem pertanian yang sehat, produktif, dan berkelanjutan. Lingkupnya tidak hanya berkaitan dengan aspek teknis pengendalian OPT, tetapi juga mencakup edukasi, kebijakan, konservasi, dan mitigasi risiko global. Penguatan kapasitas aktor-aktor pertanian, pengembangan teknologi lokal, serta penerapan prinsip keberlanjutan adalah kunci keberhasilan perlindungan tanaman di masa depan. Tanpa perlindungan tanaman yang efektif, ketahanan pangan dan ekologi pertanian akan menghadapi ancaman serius di tengah krisis global yang terus berkembang.

D. Hubungan Perlindungan Tanaman dengan Disiplin Ilmu Lain

Perlindungan tanaman tidak berdiri sendiri sebagai disiplin ilmu yang terisolasi, melainkan memiliki keterkaitan erat dengan berbagai

bidang ilmu lain yang mendukung pendekatan terpadu dan komprehensif dalam pengelolaan pertanian. Interdisiplinairitas menjadi ciri khas dalam pengembangan ilmu perlindungan tanaman, seiring kompleksitas tantangan biotik dan abiotik yang dihadapi dalam budidaya pertanian modern. Keterhubungan ini menjadikan perlindungan tanaman sebagai titik temu antara biologi, ekologi, teknologi, hingga ilmu sosial. Perspektif lintas ilmu ini memungkinkan integrasi pendekatan yang adaptif, efisien, dan berkelanjutan dalam mengatasi permasalahan organisme pengganggu tumbuhan.

Hubungan paling mendasar terlihat dengan ilmu biologi, khususnya biologi molekuler, genetika, dan mikrobiologi. Ilmu ini menjadi fondasi dalam memahami mekanisme ketahanan tanaman terhadap patogen, identifikasi karakteristik organisme pengganggu, serta eksplorasi potensi agen hayati sebagai pengendali alami. Studi *Gupta et al. (2021)* menunjukkan bahwa interaksi genetik antara tanaman dan patogen dapat digunakan untuk merancang strategi resistensi berbasis genomik, seperti pengembangan varietas yang memiliki gen ketahanan spesifik terhadap penyakit. Mikrobiologi juga berperan dalam penelitian endofit dan *rhizobacteria* yang meningkatkan imunitas tanaman secara biologis.

Kedekatan dengan ekologi memberikan dimensi lanjutan pada perlindungan tanaman. Ekologi lanskap, agroekologi, dan dinamika populasi menjadi bagian penting dalam memahami interaksi antara tanaman, hama, predator alami, dan lingkungan sekitarnya. Konsep seperti musuh alami, kompetisi antargulma, dan kestabilan populasi serangga banyak dipelajari dalam ekologi terapan untuk membentuk sistem perlindungan yang ramah lingkungan. *Zhao et al. (2022)* menekankan bahwa pengelolaan biodiversitas di lahan pertanian

mampu memperkuat pengendalian hama secara alami, sehingga mengurangi ketergantungan pada pestisida sintetis.

Ilmu teknologi informasi dan data analitik juga memainkan peran strategis dalam modernisasi sistem perlindungan tanaman. Penerapan *machine learning*, *artificial intelligence*, dan *remote sensing* memungkinkan deteksi dini terhadap wabah hama, pemantauan pertumbuhan tanaman, serta evaluasi efektivitas intervensi pengendalian. Integrasi antara sistem informasi geografis (GIS) dengan data iklim dan pertumbuhan tanaman telah digunakan untuk membangun model prediksi serangan hama skala regional (*Chen et al., 2023*). Teknologi ini mempercepat pengambilan keputusan dan meningkatkan efisiensi intervensi, sekaligus mengurangi pemborosan sumber daya.

Keterkaitan dengan ilmu kimia tidak dapat dipisahkan, terutama dalam pengembangan dan formulasi pestisida, baik sintetis maupun hayati. Ilmu kimia organik dan toksikologi dibutuhkan untuk memahami mode aksi bahan aktif terhadap target organisme, kestabilan senyawa dalam lingkungan, serta dampaknya terhadap makhluk bukan sasaran. *Rodrigues et al. (2020)* mengungkapkan bahwa kemajuan dalam kimia hijau (*green chemistry*) mendorong pengembangan bioinsektisida dan pestisida berbasis metabolit sekunder tumbuhan yang lebih aman dan biodegradable. Hubungan ini menunjukkan bahwa disiplin kimia sangat penting dalam menciptakan inovasi pengendalian yang ramah lingkungan.

Selain itu, perlindungan tanaman juga bersinggungan erat dengan ilmu ekonomi pertanian dan sosiologi pedesaan. Analisis biaya-manfaat terhadap metode pengendalian, keputusan petani dalam mengadopsi teknologi perlindungan tanaman, serta perilaku pasar

terhadap produk aman residu semuanya melibatkan pendekatan ilmu sosial. Menurut *de Boer et al. (2021)*, keberhasilan perlindungan tanaman tidak hanya ditentukan oleh efektivitas teknis, tetapi juga oleh kesesuaian sosial, ekonomi, dan budaya petani dalam konteks lokal. Oleh karena itu, pendekatan partisipatif dan pemberdayaan petani menjadi bagian penting dalam implementasi sistem perlindungan tanaman yang berkelanjutan.

Hubungan dengan ilmu hukum dan kebijakan publik juga sangat relevan, terutama dalam konteks regulasi pestisida, perlindungan varietas tanaman, serta karantina dan keamanan hayati. Hukum pertanian mengatur peredaran bahan pengendali OPT, sertifikasi produk pertanian, serta perlindungan petani dari kerugian akibat kegagalan teknologi. *Singh & Yadav (2023)* menyebutkan bahwa kerangka hukum dan kebijakan yang jelas dapat meningkatkan adopsi teknologi perlindungan tanaman dan mendorong inovasi sektor swasta. Oleh karena itu, kolaborasi antara ahli agronomi, regulator, dan pembuat kebijakan menjadi krusial dalam membentuk sistem perlindungan tanaman yang transparan dan berkeadilan.

Keseluruhan hubungan antar disiplin ilmu ini membuktikan bahwa perlindungan tanaman merupakan bidang strategis yang harus didekati secara lintas sektoral. Tidak cukup hanya dengan pendekatan biologis atau teknis, namun juga membutuhkan kontribusi dari ilmu sosial, teknologi, kebijakan, dan hukum. Kolaborasi multidisipliner ini menjadi kunci dalam mengembangkan sistem perlindungan tanaman masa depan yang tangguh terhadap dinamika ekosistem, tantangan global, dan kebutuhan sosial masyarakat. Oleh karena itu, penguatan jejaring ilmu dan kolaborasi lintas bidang menjadi prasyarat utama dalam pembangunan pertanian berkelanjutan yang berbasis pada perlindungan tanaman.

E. Tantangan Global dan Perspektif Masa Depan

Ilmu perlindungan tanaman menghadapi berbagai tantangan global yang semakin kompleks dan dinamis. Salah satu tantangan utama adalah meningkatnya tekanan akibat perubahan iklim yang mengubah pola sebaran organisme pengganggu tumbuhan (OPT), memperpanjang musim tanam, serta menciptakan lingkungan yang lebih menguntungkan bagi patogen dan hama invasif. Studi *Deutsch et al. (2022)* menyebutkan bahwa suhu yang lebih tinggi meningkatkan tingkat reproduksi dan mobilitas serangga, sehingga memicu ledakan populasi hama pada berbagai komoditas pangan strategis. Tantangan ini menuntut sistem perlindungan tanaman yang tidak hanya responsif tetapi juga proaktif dalam mendeteksi dan mengantisipasi dinamika iklim.

Resistensi terhadap pestisida merupakan tantangan serius lainnya yang memperburuk efektivitas pengendalian konvensional. Penggunaan pestisida secara berulang dan tidak bijak mendorong seleksi alam terhadap populasi hama dan patogen yang resisten, menyebabkan siklus ketergantungan terhadap bahan kimia semakin meningkat. Fenomena ini diperparah dengan minimnya regulasi ketat di beberapa negara berkembang, yang berdampak pada tingginya kandungan residu dalam hasil pertanian. Menurut *Furlong et al. (2023)*, strategi diversifikasi pengendalian seperti rotasi bahan aktif, penggunaan pestisida biologis, serta integrasi sistem IPM menjadi solusi jangka panjang untuk menahan laju resistensi ini.

Tantangan selanjutnya muncul dari tekanan globalisasi yang mempercepat penyebaran OPT lintas negara. Perdagangan internasional, migrasi manusia, dan mobilitas logistik telah memperluas jangkauan patogen eksotik dan hama invasif yang

sebelumnya tidak ditemukan di suatu wilayah. Sebagai contoh, penyebaran *Tuta absoluta* dan *Spodoptera frugiperda* ke Asia merupakan bukti nyata lemahnya sistem deteksi dan karantina. *Bebber et al. (2021)* menegaskan bahwa perlindungan tanaman harus dilengkapi dengan sistem biosekuriti yang kuat, pemantauan lintas negara, serta kerjasama regional untuk mencegah potensi pandemi pertanian yang mengancam ketahanan pangan global.

Ketimpangan akses terhadap teknologi dan informasi juga menjadi tantangan besar, terutama di negara-negara berkembang. Banyak petani kecil yang masih mengandalkan pengetahuan lokal tanpa didukung data ilmiah atau teknologi tepat guna. Kesenjangan ini menyebabkan rendahnya efektivitas pengendalian OPT serta tingginya risiko gagal panen. *Rahman et al. (2020)* menunjukkan bahwa keberhasilan perlindungan tanaman tidak hanya bergantung pada inovasi teknologi, tetapi juga pada distribusi yang merata, pelatihan berkelanjutan, dan pemberdayaan petani. Oleh karena itu, perlu pendekatan inklusif yang melibatkan semua aktor dalam rantai nilai pertanian.

Di masa depan, pendekatan *precision agriculture* berbasis data dan kecerdasan buatan menjadi arah baru yang menjanjikan. Integrasi antara sensor tanah, citra satelit, dan model prediksi akan memungkinkan pengambilan keputusan berbasis lokasi secara real-time. Teknologi seperti drone, sistem informasi geografis (GIS), dan platform digital akan mempercepat deteksi dini serangan OPT dan memfasilitasi respons cepat yang lebih tepat sasaran. *Yin et al. (2021)* menyoroti bahwa transformasi digital dalam perlindungan tanaman bukan hanya soal efisiensi, tetapi juga tentang keberlanjutan dan keamanan pangan global.

Selain itu, munculnya bioteknologi seperti CRISPR, RNA interference (RNAi), dan teknologi mikrobioma tanaman membuka perspektif baru dalam menciptakan ketahanan tanaman yang bersifat sistemik. Pendekatan ini memungkinkan manipulasi ekspresi gen tanaman untuk menahan infeksi patogen tertentu, serta meningkatkan keberadaan mikroorganisme baik dalam rhizosfer. *Kanchiswamy et al. (2022)* menunjukkan bahwa rekayasa tanaman tahan hama berbasis RNAi telah memberikan hasil menjanjikan dalam uji lapangan, tanpa meninggalkan residu kimia dan aman terhadap organisme bukan sasaran. Pengembangan ini akan menjadi kunci revolusi perlindungan tanaman generasi berikutnya.

Masa depan perlindungan tanaman juga akan ditentukan oleh kemampuan kolaboratif lintas sektor: antara akademisi, industri, pemerintah, dan masyarakat sipil. Diperlukan kerangka regulasi yang adaptif terhadap perkembangan teknologi, sistem insentif bagi pertanian berkelanjutan, serta penguatan kapasitas kelembagaan di tingkat lokal dan nasional. Perlindungan tanaman tidak bisa lagi dilihat sebagai upaya teknis semata, tetapi sebagai bagian integral dari sistem ketahanan pangan dunia yang harus dikelola secara sistemik dan holistik. Dengan menggabungkan kecanggihan teknologi, kebijakan yang progresif, dan kearifan lokal, perlindungan tanaman dapat menjawab tantangan global dan membawa pertanian menuju masa depan yang lebih resilien.

F. Rangkuman

Perlindungan tanaman adalah cabang ilmu pertanian yang berfokus pada pengendalian hama, penyakit, dan gulma guna menjamin produktivitas dan kualitas hasil pertanian. Bab ini menyoroti pentingnya integrasi pendekatan ekologis, teknis, dan sosial

dalam menjaga ekosistem budidaya dari ancaman biotik maupun abiotik. Perkembangan ilmu ini telah bergeser dari penggunaan pestisida konvensional menuju pendekatan ramah lingkungan seperti pengendalian hayati, varietas tahan, dan teknologi presisi berbasis data. Selain itu, perlindungan tanaman memiliki peran vital dalam ketahanan pangan, kesehatan lingkungan, dan pemberdayaan petani. Disiplin ini saling berkaitan dengan biologi, ekologi, teknologi, ekonomi, dan hukum. Tantangan global seperti perubahan iklim, resistensi hama, dan ketimpangan teknologi memerlukan solusi inovatif seperti CRISPR, RNAi, dan kolaborasi lintas sektor. Perlindungan tanaman masa depan menuntut pendekatan sistemik, adaptif, dan berkelanjutan.

G. Latihan

Soal

1. Jelaskan secara komprehensif definisi perlindungan tanaman dan bagaimana konsep ini berkembang dalam konteks pertanian modern!
2. Uraikan empat tujuan utama perlindungan tanaman dan bagaimana tujuannya berkontribusi terhadap ketahanan pangan!
3. Bagaimana peran bioteknologi dan teknologi digital mengubah paradigma dalam sistem perlindungan tanaman saat ini?
4. Identifikasi dan jelaskan hubungan antara perlindungan tanaman dengan dua disiplin ilmu lainnya beserta implikasinya dalam praktik di lapangan!

5. Sebutkan dan jelaskan tiga tantangan global utama dalam bidang perlindungan tanaman serta strategi yang dapat diambil untuk mengatasinya!

Jawaban

1. **Definisi perlindungan tanaman** mencakup upaya ilmiah dan teknis dalam mengendalikan organisme pengganggu tumbuhan (OPT) untuk menjaga produktivitas pertanian. Konsep ini berkembang dari pendekatan kimia reaktif menjadi pendekatan holistik berbasis Integrated Pest Management (IPM), yang mengedepankan keberlanjutan dan efisiensi ekologis.
2. **Empat tujuan utama perlindungan tanaman** adalah: (1) menjaga produktivitas pertanian dari kerusakan akibat OPT, (2) menjamin mutu hasil panen sesuai standar konsumsi, (3) melindungi kesehatan manusia dan lingkungan dari dampak pestisida, dan (4) meningkatkan efisiensi pemanfaatan sumber daya. Keseluruhan tujuan ini berkontribusi besar terhadap keberlanjutan produksi dan ketahanan pangan nasional.
3. **Bioteknologi** seperti CRISPR dan RNAi memungkinkan pengembangan varietas tahan hama/penyakit tanpa residu kimia. **Teknologi digital** seperti remote sensing dan AI memungkinkan deteksi dini serta pengambilan keputusan berbasis data real-time. Kedua inovasi ini mempercepat respons dan meningkatkan efisiensi perlindungan tanaman.
4. Perlindungan tanaman terkait erat dengan **biologi** (misalnya dalam memahami interaksi genetik tanaman-patogen) dan **ekologi** (misalnya dalam konservasi musuh alami dan agroekosistem beragam). Keduanya penting dalam merancang

sistem pengendalian yang efisien dan berkelanjutan di lapangan.

5. Tiga tantangan utama adalah: (a) **perubahan iklim** yang memperluas wilayah OPT; (b) **resistensi pestisida** akibat penggunaan berlebihan; dan (c) **akses teknologi yang timpang** di negara berkembang. Strategi yang dapat digunakan termasuk diversifikasi metode pengendalian, transformasi digital, dan pelatihan serta pemberdayaan petani secara berkelanjutan.

BAB II

Organisme Pengganggu Tumbuhan (OPT)

Tinjauan Umum

Organisme Pengganggu Tumbuhan (OPT) merupakan ancaman utama dalam sektor pertanian karena menimbulkan kerusakan signifikan pada produktivitas tanaman. Bab ini mengupas tinjauan umum mengenai OPT dengan fokus awal pada klasifikasinya. Memahami klasifikasi OPT sangat penting untuk menyusun strategi pengendalian yang tepat dan berkelanjutan. Klasifikasi ini didasarkan pada sifat biologi, siklus hidup, serta cara interaksinya dengan tanaman inang.

- **Tujuan Pembelajaran**

- Menjelaskan definisi dan klasifikasi Organisme Pengganggu Tumbuhan (OPT) secara ilmiah dan praktis.
- Menganalisis faktor-faktor penyebab ledakan populasi OPT dalam sistem pertanian.
- Mengidentifikasi dampak serangan OPT terhadap produksi pertanian dari aspek kuantitas, kualitas, ekonomi, sosial, dan lingkungan.
- Menjelaskan peran ekologi dalam penyebaran OPT dan keterkaitannya dengan sistem agroekosistem.
- Menguraikan model gangguan tanaman (segitiga, segi empat, segi lima) sebagai kerangka konseptual dalam manajemen OPT.

A. Klasifikasi OPT

Organisme Pengganggu Tumbuhan (OPT) didefinisikan sebagai semua makhluk hidup yang dapat menyebabkan kerusakan atau kehilangan hasil pada tanaman budidaya. Berdasarkan sifat biologis dan cara penggangguannya terhadap tanaman, OPT diklasifikasikan ke dalam beberapa kelompok besar, yaitu hama (hewan), patogen (penyebab penyakit), dan gulma. Klasifikasi ini tidak hanya bersifat akademik, melainkan juga praktis dalam menyusun strategi pengendalian yang berbasis *integrated pest management*. Pemahaman klasifikasi ini penting sebagai dasar dalam menetapkan prioritas pengendalian dan identifikasi potensi kerugian tanaman (*Munyua et al., 2022*).

Kelompok pertama dalam klasifikasi OPT adalah hama, yang umumnya terdiri atas serangga, nematoda, tikus, dan hewan lain yang merusak bagian tanaman. Serangga hama seperti *Helicoverpa armigera*, *Nilaparvata lugens*, dan *Spodoptera litura* menjadi contoh nyata kerugian yang disebabkan oleh hama di lahan pertanian tropis. Hama diklasifikasikan lebih lanjut berdasarkan tipe mulutnya (pengunyah atau penghisap) dan siklus hidupnya (metamorfosis sempurna atau tidak sempurna) (*Ali et al., 2020*). Identifikasi yang akurat terhadap hama sangat diperlukan dalam memilih teknik pengendalian seperti insektisida, penggunaan musuh alami, atau tanaman tahan.

Kategori berikutnya adalah patogen, yang mencakup organisme penyebab penyakit seperti jamur, bakteri, virus, dan mikoplasma. Patogen seperti *Xanthomonas oryzae* dan *Phytophthora infestans* dikenal luas karena kemampuannya menyebar cepat dan menimbulkan epidemi. Patogen diklasifikasikan berdasarkan morfologi, cara infeksi,

dan inang yang diserangnya. Pengelompokan ini krusial dalam menerapkan sistem deteksi dini dan pengelolaan berbasis bioteknologi seperti penggunaan varietas tahan atau terapi genetik (*Chen et al., 2023*).

Selanjutnya, gulma didefinisikan sebagai tumbuhan yang tumbuh tidak pada tempat yang diinginkan dan mengganggu tanaman budidaya. Contoh gulma antara lain *Imperata cylindrica*, *Cyperus rotundus*, dan *Echinochloa crus-galli*. Gulma diklasifikasikan berdasarkan siklus hidup (tahunan atau tahunan berganda), cara reproduksi (vegetatif atau generatif), dan habitat tumbuhnya. Klasifikasi ini membantu dalam menyusun strategi pengendalian seperti herbisida selektif, penyiangan manual, atau rotasi tanaman (*Kumar et al., 2021*).

Perkembangan teknologi klasifikasi kini telah didukung oleh pendekatan molekuler dan bioinformatika. Teknik seperti *DNA barcoding*, *next-generation sequencing*, dan *metagenomics* memungkinkan identifikasi spesies OPT secara cepat dan akurat, terutama untuk patogen yang bersifat laten atau tidak dapat dikultur. Inovasi ini mendukung sistem pertanian presisi dan pengambilan keputusan berbasis data (*Zhang et al., 2023*). Kemajuan ini juga memperluas cakupan klasifikasi hingga tingkat strain atau biotipe, yang relevan dalam konteks resistensi pestisida dan adaptasi ekologi.

Selain aspek biologi, klasifikasi OPT juga mempertimbangkan pendekatan ekologis, seperti habitat dan interaksi antarspesies. Misalnya, hama yang menyerang tanaman dalam sistem monokultur memiliki dinamika yang berbeda dibandingkan pada sistem tumpangsari. Pendekatan ekologi ini menekankan pentingnya pemahaman konteks agroekosistem dalam pengelolaan OPT secara

berkelanjutan (*Sankaran et al., 2022*). Hal ini mendorong sinergi antara petani, peneliti, dan pembuat kebijakan dalam pengembangan strategi pengendalian yang adaptif terhadap perubahan iklim dan praktik pertanian modern.

Pemahaman terhadap klasifikasi OPT menjadi fondasi penting dalam pendidikan dan praktik perlindungan tanaman. Pengklasifikasian yang tepat tidak hanya membantu dalam diagnosis dan pengendalian, tetapi juga dalam penentuan risiko, peringatan dini, dan pengembangan kebijakan pertanian nasional. Melalui sistem klasifikasi yang komprehensif, intervensi teknis dapat diarahkan secara lebih presisi dan efisien untuk mendukung ketahanan pangan dan keberlanjutan pertanian (*Liu et al., 2021*).

B. Faktor Pemicu Ledakan Populasi Organisme Pengganggu Tumbuhan (OPT)

Ledakan populasi Organisme Pengganggu Tumbuhan (OPT) merupakan fenomena yang sangat merugikan dalam sistem pertanian karena menyebabkan penurunan produktivitas, biaya pengendalian yang meningkat, serta ketidakseimbangan ekosistem. Peristiwa ini sering kali dipicu oleh interaksi kompleks berbagai faktor biotik dan abiotik. Untuk memahami dinamika ini secara menyeluruh, penting mengkaji faktor-faktor pemicu ledakan populasi secara sistematis, mulai dari perubahan iklim, praktik budidaya, resistensi terhadap pestisida, hingga hilangnya musuh alami. Studi tentang faktor-faktor tersebut memberi landasan penting dalam perumusan strategi pengelolaan hama yang adaptif dan berbasis ekologi (*Khan et al., 2023*).

Perubahan iklim menjadi pemicu utama yang semakin diakui dalam mempercepat pertumbuhan dan siklus hidup OPT. Kenaikan suhu global dan perubahan pola curah hujan menciptakan lingkungan yang lebih kondusif bagi beberapa jenis hama dan patogen. Misalnya, suhu tinggi dapat mempercepat metabolisme serangga, meningkatkan laju reproduksi, serta memperluas wilayah distribusinya. Selain itu, musim yang lebih panjang tanpa gangguan musim dingin memungkinkan keberlangsungan hidup hama sepanjang tahun (*Nagy et al., 2022*). Patogen seperti jamur juga lebih mudah menyebar pada kondisi kelembapan tinggi yang berkepanjangan.

Praktik budidaya yang tidak beragam, terutama monokultur dalam skala luas, turut mendorong terjadinya ledakan populasi OPT. Sistem tanam tunggal menyebabkan lingkungan menjadi homogen dan menyediakan makanan melimpah bagi spesies tertentu, sehingga menurunkan hambatan alami terhadap perkembangan populasinya. Tanaman inang yang sama dari musim ke musim memperpanjang siklus hidup hama spesifik. Ditambah lagi, penggunaan benih non-lokal dan ketergantungan pada input sintetis menyebabkan degradasi agroekosistem yang memperkuat ketidakseimbangan ekologis (*Rahman et al., 2021*).

Penggunaan pestisida kimia yang tidak bijak turut mempercepat resistensi OPT dan memperburuk ketidakseimbangan ekologis. Hama yang terus terpapar zat aktif pestisida dalam jangka panjang akan membentuk populasi resisten, sehingga efektivitas pengendalian menurun drastis. Resistensi ini tidak hanya terjadi pada serangga, tetapi juga pada patogen dan gulma yang berkembang melalui seleksi alam akibat tekanan kimia. Selain itu, pestisida juga sering membunuh musuh alami seperti parasitoid dan predator, yang seharusnya menjadi pengendali populasi alami (*Karanja et al., 2022*).

Hilangnya musuh alami merupakan faktor penting yang memperparah ledakan OPT. Intervensi manusia dalam ekosistem, seperti deforestasi, pencemaran, dan penggunaan insektisida spektrum luas, menyebabkan kepunahan lokal predator dan parasit alami. Akibatnya, populasi OPT tidak lagi memiliki kendali biologis dari dalam ekosistem itu sendiri. Ketika keseimbangan ini terganggu, bahkan populasi kecil OPT dapat tumbuh secara eksponensial tanpa hambatan ekologis yang memadai (*Bianchi et al., 2020*). Konsep ini mendasari pentingnya konservasi *biological control agents* dalam strategi pertanian berkelanjutan.

Faktor globalisasi dan mobilitas manusia juga tidak bisa diabaikan dalam menyumbang ledakan OPT. Perdagangan internasional yang masif, terutama dalam bentuk produk hortikultura dan benih, mempermudah penyebaran hama invasif lintas batas geografis. Organisme asing yang masuk ke ekosistem baru sering kali tidak memiliki musuh alami, sehingga populasinya dapat berkembang tanpa kendali. Contoh nyata adalah penyebaran *Tuta absoluta* di Asia dan Afrika yang menjadi hama utama pada tanaman tomat dalam waktu singkat (*Barros et al., 2023*).

Faktor internal OPT itu sendiri seperti kemampuan reproduksi tinggi, siklus hidup pendek, dan sifat polifagus (dapat memakan berbagai jenis tanaman) juga mempercepat lonjakan populasi. Beberapa spesies serangga dapat menghasilkan hingga ribuan telur dalam satu musim, memperkuat potensi invasi dalam waktu singkat. Selain itu, kemampuan adaptasi genetik OPT terhadap lingkungan baru maupun tekanan kimia menjadikannya sangat dinamis dan sulit dikendalikan secara konvensional (*Singh et al., 2021*). Oleh karena itu, pemahaman genetika populasi OPT menjadi krusial dalam

mengembangkan pendekatan pengelolaan yang berbasis teknologi dan bioteknologi.

Dengan mempertimbangkan seluruh faktor pemicu ledakan OPT tersebut, penting bagi sistem pertanian modern untuk membangun pendekatan yang integratif dan adaptif. Pengendalian berbasis ekosistem, rotasi tanaman, penggunaan varietas tahan, pemanfaatan agen hayati, serta pemantauan berbasis teknologi digital merupakan langkah nyata yang harus diadopsi untuk mengurangi risiko ledakan populasi OPT. Mengembangkan pertanian yang resilien terhadap perubahan ekologis menjadi kebutuhan strategis demi keberlanjutan produksi pangan (*Tanaka et al., 2022*).

C. Dampak OPT terhadap Produksi Pertanian

Organisme Pengganggu Tumbuhan (OPT) memberikan dampak signifikan terhadap produksi pertanian baik dari sisi kuantitas hasil panen maupun kualitas produk yang dihasilkan. Dampak ini tidak hanya bersifat fisik pada tanaman, tetapi juga mencakup aspek ekonomi, ekologi, dan sosial petani. Serangan OPT dapat menyebabkan gagal panen, kerugian pendapatan, serta meningkatnya ketergantungan terhadap pestisida kimia. Oleh karena itu, penting untuk memahami secara sistematis bagaimana OPT mengganggu proses pertumbuhan tanaman dan distribusi hasil, sebagai dasar untuk merumuskan strategi mitigasi yang tepat dan berkelanjutan (*Okonya et al., 2020*).

Secara langsung, OPT menyerang organ tanaman seperti akar, batang, daun, bunga, dan buah. Serangga pengunyah daun seperti *Spodoptera litura* dapat merusak jaringan fotosintetik yang esensial bagi pertumbuhan tanaman, sementara hama pengisap seperti

Nilaparvata lugens merusak pembuluh floem yang menghambat penyaluran nutrisi. Serangan patogen seperti *Phytophthora infestans* pada kentang atau *Xanthomonas oryzae* pada padi menyebabkan bercak dan pembusukan yang mematikan bagian vital tanaman. Gangguan pada fase vegetatif dan generatif ini berujung pada penurunan produksi secara drastis (Wang *et al.*, 2021).

Dampak secara kuantitatif tercermin dari penurunan hasil panen yang signifikan. Studi menunjukkan bahwa rata-rata kerugian hasil akibat serangan OPT berkisar antara 20–40%, tergantung pada jenis tanaman, tingkat infestasi, dan metode pengelolaan yang digunakan. Dalam kasus yang ekstrem, seperti infestasi belalang (*Locusta migratoria*), kerusakan bisa mencapai 100% di beberapa wilayah yang tidak memiliki sistem respons cepat. Ketika sistem pertanian tidak mampu mengendalikan OPT secara tepat waktu, maka produktivitas nasional pun terancam, terutama pada tanaman pangan utama seperti padi, jagung, dan kedelai (Schulthess *et al.*, 2022).

Dampak kualitas juga tak kalah penting. Serangan OPT dapat menyebabkan deformasi, perubahan warna, pembusukan, atau kontaminasi mikroba pada produk pertanian, yang mengurangi nilai pasar hasil panen. Produk seperti buah dan sayuran yang mengalami kerusakan permukaan karena ulat atau penyakit cendawan akan mengalami penurunan kelas mutu dan harga. Hal ini merugikan petani karena pendapatan yang diperoleh tidak sebanding dengan biaya produksi. Di tingkat industri, kualitas bahan baku pertanian yang menurun juga berpengaruh pada standar ekspor dan rantai pasok pangan global (Kareem *et al.*, 2023).

OPT juga berdampak pada ekonomi rumah tangga petani melalui meningkatnya biaya input untuk pengendalian hama. Ketika serangan

OPT tidak tertanggulangi, petani terdorong untuk menggunakan pestisida secara berlebihan atau membeli benih tahan hama dengan harga tinggi. Pengeluaran ini menyebabkan ketimpangan antara pendapatan dan biaya produksi. Beban ekonomi ini sangat dirasakan oleh petani kecil dengan modal terbatas. Dampaknya bisa meluas pada ketahanan pangan keluarga dan peningkatan risiko kemiskinan di wilayah pedesaan (*Mwangi et al., 2020*).

Dalam jangka panjang, dampak ekologis juga muncul akibat ketergantungan terhadap pestisida untuk menanggulangi OPT. Pestisida yang digunakan secara intensif dapat mencemari tanah, air, dan udara serta membunuh organisme non-target seperti penyerbuk dan musuh alami hama. Ketika biodiversitas dalam agroekosistem terganggu, ketahanan sistem pertanian terhadap serangan hama menurun dan memperparah siklus kerusakan berulang. Ini menjadikan OPT sebagai bagian dari masalah yang lebih besar terkait keberlanjutan lingkungan dan produksi pangan global (*Zhou et al., 2021*).

Dari perspektif sosial, OPT juga menciptakan tekanan psikologis bagi petani yang terus-menerus menghadapi risiko gagal panen. Ketidakpastian dalam pengelolaan OPT mendorong terjadinya stres ekonomi dan kekecewaan terhadap dukungan kelembagaan. Lebih jauh, ledakan populasi hama atau penyakit tanaman dapat memicu migrasi tenaga kerja dari sektor pertanian, yang memperparah krisis regenerasi petani muda di banyak wilayah. Oleh sebab itu, penanganan OPT harus dimaknai sebagai agenda multidimensi yang tidak hanya bersifat teknis, tetapi juga menyentuh aspek sosial dan kebijakan publik (*Lim et al., 2022*).

D. Peran Ekologi dalam Penyebaran OPT

Ekologi memainkan peranan kunci dalam memahami dinamika penyebaran Organisme Pengganggu Tumbuhan (OPT). Sebagai bagian dari interaksi antarorganisme dan lingkungan, OPT berkembang dalam sistem ekologi yang kompleks, di mana faktor biotik seperti predator, parasitoid, dan inang, serta faktor abiotik seperti suhu, kelembapan, dan topografi memengaruhi pola penyebarannya. Studi ekologi menyediakan kerangka ilmiah untuk menganalisis keterkaitan antara OPT dengan habitat, populasi, dan jaringan trofik, serta bagaimana perubahan ekosistem memperbesar atau memperkecil peluang invasi. Perspektif ekologi ini sangat penting dalam perumusan strategi pengendalian yang berbasis sistem dan berkelanjutan (*Rodrigues et al., 2021*).

Salah satu aspek ekologi yang paling berpengaruh terhadap penyebaran OPT adalah kesesuaian habitat. Setiap spesies OPT memiliki preferensi lingkungan tertentu yang mendukung siklus hidup dan reproduksinya. Serangga seperti *Helicoverpa armigera* tumbuh optimal di wilayah beriklim hangat dengan kelembapan tinggi, sedangkan jamur patogen seperti *Puccinia graminis* menyebar lebih cepat di daerah berangin dan lembap. Habitat pertanian yang homogen, seperti sistem monokultur, meningkatkan risiko penyebaran karena menyediakan sumber pakan yang tidak terputus. Homogenitas ini menghilangkan hambatan ekologis alami yang biasanya terdapat dalam lanskap yang beragam (*Park et al., 2020*).

Interaksi trofik dalam ekosistem juga sangat menentukan penyebaran dan kelimpahan OPT. OPT merupakan bagian dari rantai makanan yang lebih besar, dan kelangsungan hidupnya sangat dipengaruhi oleh adanya predator, parasitoid, dan patogen alami.

Dalam ekosistem seimbang, populasi hama dikendalikan secara alami oleh musuh alaminya. Namun, ketika musuh alami berkurang akibat penggunaan pestisida atau perubahan habitat, maka populasi OPT cenderung meledak. Ekologi menyediakan dasar untuk pendekatan pengendalian hayati dengan memperkuat peran *natural enemies* untuk menghambat penyebaran hama (De Palma et al., 2022).

Migrasi dan mobilitas OPT juga sangat dipengaruhi oleh karakteristik ekologis wilayah. Serangga terbang seperti *Bemisia tabaci* dan *Nilaparvata lugens* memiliki kemampuan untuk berpindah dari satu lokasi ke lokasi lain dalam waktu singkat, terutama jika didukung oleh arah angin dan kontur lanskap terbuka. Ekologi lanskap menyoroti pentingnya koridor habitat, barrier alami seperti hutan atau rawa, serta pola penggunaan lahan dalam memengaruhi jalur penyebaran. Pengetahuan ini digunakan dalam *landscape pest management* untuk menata ruang pertanian agar tidak mendukung perluasan populasi OPT (Grzywacz et al., 2023).

Perubahan iklim sebagai bagian dari ekologi global turut memperluas distribusi geografis OPT ke wilayah baru yang sebelumnya tidak mendukung kehidupan mereka. Meningkatnya suhu dan variasi kelembapan mengubah batas fisiologis spesies hama, memungkinkan mereka menyerang pada musim atau ketinggian yang berbeda dari sebelumnya. Contohnya, ulat grayak (*Spodoptera frugiperda*) yang semula terbatas di Amerika kini menyebar ke Afrika dan Asia karena kondisi iklim yang menguntungkan. Peran ekologi dalam hal ini membantu prediksi penyebaran berdasarkan model iklim dan data biologis spesies (Early et al., 2021).

Keanekaragaman hayati dalam suatu agroekosistem memiliki pengaruh besar dalam menahan penyebaran OPT. Tanaman penutup

tanah, interkrop, dan kehadiran vegetasi liar berkontribusi menciptakan ekosistem yang lebih stabil dan kompleks, sehingga menyulitkan OPT untuk berkembang pesat. Keragaman spesies menciptakan tekanan kompetitif dan predatorik terhadap hama, serta mengurangi kerentanan sistem terhadap invasi tunggal. Pendekatan *ecological intensification* dalam pertanian memanfaatkan prinsip ini untuk menciptakan pertanian yang produktif sekaligus tahan terhadap gangguan OPT (Bennett et al., 2022).

Penerapan prinsip ekologi dalam pengelolaan OPT menciptakan pendekatan yang lebih ramah lingkungan, berkelanjutan, dan berbasis ilmu. Strategi seperti konservasi musuh alami, rekayasa habitat, serta pemantauan berbasis ekosistem memungkinkan pengendalian yang lebih holistik dan efisien. Integrasi pendekatan ini dalam kebijakan pertanian dan pelatihan petani menjadi syarat penting dalam membangun sistem pangan yang resilien terhadap ancaman biologis. Dengan memahami peran ekologi dalam penyebaran OPT, upaya pengendalian tidak hanya bersifat reaktif, tetapi juga proaktif dan preventif (Harrison et al., 2020).

E. Model Gangguan (Segitiga, Segi Empat, Segi Lima)

Pemahaman mengenai dinamika gangguan pada tanaman oleh Organisme Pengganggu Tumbuhan (OPT) memerlukan pendekatan model konseptual yang sistematis. Dalam ilmu perlindungan tanaman, beberapa model gangguan telah dikembangkan sebagai kerangka analisis untuk menjelaskan interaksi antara tanaman, OPT, lingkungan, serta faktor manusia. Model segitiga, segi empat, dan segi lima merupakan pendekatan visual dan teoritik yang digunakan untuk memahami kompleksitas faktor penyebab dan penyebaran gangguan. Setiap model menggambarkan relasi kausal dan interdependensi antar

elemen yang relevan, sehingga dapat digunakan sebagai dasar pengambilan keputusan dalam manajemen OPT (*Hokkanen et al., 2021*).

Model segitiga gangguan tanaman merupakan model paling klasik dan fundamental yang terdiri dari tiga komponen utama: tanaman inang, OPT, dan lingkungan. Interaksi di antara ketiganya menentukan apakah gangguan atau penyakit akan terjadi. Ketika ketiganya berada dalam kondisi yang saling mendukung, seperti tanaman rentan, keberadaan OPT, dan lingkungan yang mendukung (suhu, kelembapan, dan lainnya), maka gangguan akan muncul. Model ini dikembangkan dari prinsip segitiga penyakit dalam fitopatologi dan menjadi dasar dalam identifikasi titik lemah untuk intervensi pengendalian (*Sparks et al., 2020*).

Model segi empat menambahkan elemen keempat yaitu manusia atau aktivitas pertanian. Dalam sistem pertanian modern, peran manusia sangat menentukan karena pengelolaan lahan, penggunaan input kimia, varietas tanaman, dan praktik budidaya secara langsung memengaruhi tiga elemen dalam segitiga gangguan. Kehadiran manusia dapat berperan sebagai pencegah maupun pemicu gangguan tergantung pada perilaku dan keputusan yang diambil. Sebagai contoh, penggunaan pestisida yang berlebihan dapat mengganggu musuh alami, sehingga memperparah gangguan oleh OPT (*Zhang et al., 2021*).

Model segi lima mengembangkan pendekatan yang lebih kompleks dengan menambahkan elemen kelima yaitu waktu. Waktu mencakup aspek temporal dari gangguan, seperti musim tanam, fase pertumbuhan tanaman, waktu serangan OPT, dan siklus hidup organisme. Dengan memasukkan waktu sebagai variabel, model ini

memperhitungkan dinamika perubahan yang terjadi dalam satu musim atau antar musim. Model ini juga memungkinkan evaluasi risiko danantisipasi ledakan OPT berdasarkan data historis atau prediksi iklim (*Gurr et al., 2022*). Waktu juga berperan dalam menentukan efektif atau tidaknya suatu intervensi pengendalian.

Ketiga model tersebut—segitiga, segi empat, dan segi lima—tidak hanya bersifat konseptual, tetapi juga aplikatif dalam perencanaan pengendalian hama dan penyakit. Dalam praktiknya, model segitiga digunakan dalam analisis cepat saat terjadi serangan OPT, sedangkan model segi empat digunakan untuk evaluasi sistem produksi secara menyeluruh. Model segi lima sangat berguna dalam sistem peringatan dini dan perencanaan jangka panjang karena mengintegrasikan dimensi temporal. Kombinasi antar model ini memungkinkan pendekatan *integrated pest management* yang lebih efektif dan efisien (*Kogan et al., 2023*).

Penerapan model gangguan ini juga sangat bergantung pada ketersediaan data dan kapasitas analisis. Untuk konteks pertanian presisi, teknologi digital seperti *remote sensing*, Internet of Things (IoT), dan *decision support systems* digunakan untuk memetakan komponen model dan mensimulasikan skenario gangguan. Integrasi antara data cuaca, data tanah, populasi OPT, dan aktivitas budidaya memungkinkan penerapan model segi lima secara real-time dalam aplikasi digital pertanian modern (*Sharma et al., 2020*). Hal ini menjadikan model gangguan sebagai alat penting dalam mendukung pengambilan keputusan berbasis data.

Dalam konteks pendidikan dan penyuluhan pertanian, model gangguan sangat efektif sebagai media komunikasi ilmiah kepada petani dan pengambil kebijakan. Penyuluh dapat menggunakan

ilustrasi visual model untuk menjelaskan secara sistematis mengapa gangguan terjadi dan bagaimana cara mencegahnya. Pemahaman berbasis model ini mendorong petani untuk lebih sadar terhadap peran mereka sebagai bagian dari sistem yang saling memengaruhi. Implementasi model juga memperkuat pendekatan sistem pertanian yang berkelanjutan dan resilien terhadap ancaman biologis (*Nguyen et al., 2022*).

F. Rangkuman

Organisme Pengganggu Tumbuhan (OPT) adalah makhluk hidup yang dapat menurunkan hasil dan mutu tanaman budidaya. OPT diklasifikasikan menjadi hama (seperti serangga dan tikus), patogen (jamur, bakteri, virus), dan gulma (tumbuhan pengganggu). Klasifikasi ini penting untuk penentuan strategi pengendalian yang efektif dan berbasis prinsip pertanian berkelanjutan.

Ledakan populasi OPT dipicu oleh faktor-faktor seperti perubahan iklim, sistem monokultur, resistensi terhadap pestisida, hilangnya musuh alami, hingga globalisasi. Fenomena ini berdampak pada penurunan hasil panen, kerugian ekonomi, gangguan ekologi, hingga krisis sosial bagi petani.

OPT menyebar dalam ekosistem melalui interaksi biotik dan abiotik. Perubahan dalam habitat, musuh alami, serta keanekaragaman hayati sangat mempengaruhi pola penyebaran. Pendekatan ekologi penting dalam memahami dinamika populasi OPT secara sistemik.

Tiga model gangguan tanaman—segitiga (tanaman-OPT-lingkungan), segi empat (dengan tambahan faktor manusia), dan segi lima (menambahkan dimensi waktu)—digunakan sebagai alat bantu

untuk memahami dan merespons gangguan tanaman secara holistik dan presisi.

G. Latihan

Soal

1. Jelaskan tiga kelompok utama dalam klasifikasi Organisme Pengganggu Tumbuhan (OPT) beserta contohnya!
2. Uraikan lima faktor yang dapat memicu ledakan populasi OPT dalam ekosistem pertanian!
3. Jelaskan dampak serangan OPT terhadap kualitas dan kuantitas hasil pertanian!
4. Bagaimana prinsip ekologi berperan dalam penyebaran dan pengendalian OPT secara berkelanjutan?
5. Bandingkan model segitiga, segi empat, dan segi lima dalam menjelaskan dinamika gangguan tanaman akibat OPT!

Jawaban

1. **Tiga kelompok utama OPT** adalah:
 - **Hama**, yaitu hewan perusak tanaman, seperti *Spodoptera litura* dan *Nilaparvata lugens*.
 - **Patogen**, yaitu mikroorganisme penyebab penyakit seperti jamur *Phytophthora infestans* dan bakteri *Xanthomonas oryzae*.

- **Gulma**, yaitu tumbuhan pengganggu seperti *Imperata cylindrica* dan *Cyperus rotundus*. Klasifikasi ini penting untuk memilih metode pengendalian yang sesuai.

2. Lima faktor pemicu ledakan populasi OPT:

- Perubahan iklim (suhu dan kelembapan ekstrem).
- Sistem monokultur yang menyediakan inang melimpah.
- Resistensi OPT terhadap pestisida akibat penggunaan berulang.
- Hilangnya musuh alami karena degradasi lingkungan.
- Perdagangan global dan mobilitas manusia yang membawa hama invasif.

3. Dampak serangan OPT:

- **Kuantitas**: menurunkan hasil panen 20–40%, bahkan sampai gagal panen.
- **Kualitas**: menurunkan mutu hasil, seperti kerusakan buah atau kontaminasi.
Dampaknya memperburuk pendapatan petani dan merugikan rantai pasok pangan.

4. Peran ekologi:

- Ekologi menjelaskan hubungan OPT dengan lingkungan, musuh alami, dan keanekaragaman hayati.

- Habitat homogen seperti monokultur mempercepat penyebaran OPT.
- Pendekatan ekologi mendorong penggunaan kontrol hayati dan rekayasa habitat untuk pengendalian jangka panjang.

5. **Perbandingan model gangguan:**

- **Segitiga:** mencakup tanaman inang, OPT, dan lingkungan.
- **Segi empat:** menambahkan faktor manusia sebagai pengelola pertanian.
- **Segi lima:** memasukkan dimensi waktu untuk memahami dinamika musiman dan prediksi gangguan. Ketiganya berfungsi sebagai alat analisis dalam sistem pengendalian hama terpadu (PHT).

BAB III

SERANGGA DAN MOLUSKA SEBAGAI ORGANISME PENGGANGGU TANAMAN (OPT)

Organisme Pengganggu Tanaman (OPT) dari golongan serangga dan moluska menjadi perhatian utama dalam perlindungan tanaman. Serangga dan moluska berperan signifikan sebagai hama yang mengganggu pertumbuhan dan produktivitas tanaman melalui mekanisme biologis yang kompleks. Pemahaman mendalam mengenai anatomi dan fisiologi keduanya sangat penting untuk mengenali cara kerja tubuh serta strategi adaptif yang digunakan dalam menyerang tanaman.

- **Tujuan Pembelajaran**

- Menjelaskan anatomi dan fisiologi serangga serta relevansinya dalam strategi pengendalian hama.
- Menganalisis siklus hidup dan proses metamorfosis serangga serta implikasinya terhadap dinamika populasi hama.
- Mengidentifikasi jenis-jenis serangga pengganggu berdasarkan morfologi, perilaku, dan pendekatan molekuler.
- Memahami karakteristik biologis moluska sebagai OPT serta strategi pengelolaannya secara terpadu.
- Menerapkan teknik pengamatan dan sampling yang efektif untuk mendeteksi dan memantau populasi OPT di lapangan.

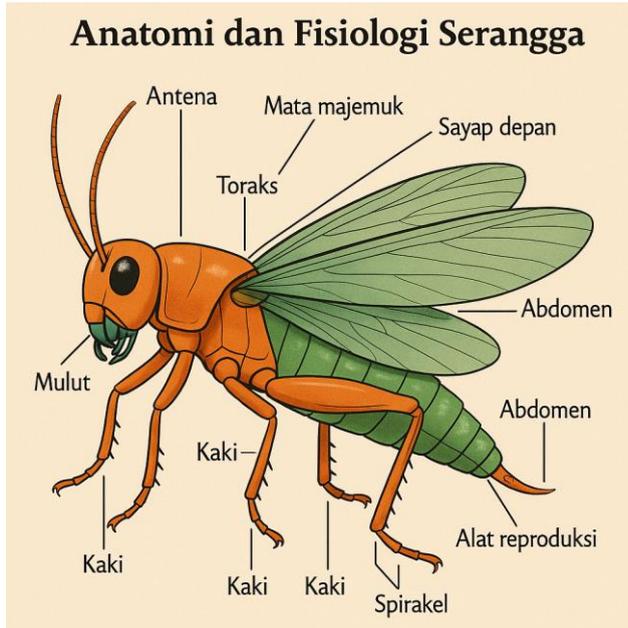
A. Anatomi dan Fisiologi Serangga

Serangga merupakan anggota *Arthropoda* yang menunjukkan keragaman luar biasa dalam struktur morfologis dan fisiologis. Tubuh serangga terdiri atas tiga bagian utama yaitu kepala, toraks, dan abdomen. Kepala menjadi pusat dari sensorik dan alat makan, toraks sebagai pusat pergerakan dengan tiga pasang kaki dan biasanya dua pasang sayap, serta abdomen yang mengandung organ reproduksi dan ekskresi. Struktur tubuh ini sangat adaptif terhadap lingkungan dan mempengaruhi cara serangga berinteraksi dengan tanaman, baik sebagai herbivora, polinator, maupun vektor penyakit (Chapman, 2022).

Sistem pencernaan serangga terbagi menjadi tiga bagian: foregut, midgut, dan hindgut. Foregut bertugas menghancurkan makanan, midgut sebagai tempat pencernaan dan penyerapan nutrisi, serta hindgut untuk penyerapan air dan pembentukan feses. Sistem ini menunjukkan efisiensi tinggi terutama pada serangga pengunyah seperti *Spodoptera frugiperda*, yang menjadi hama penting pada tanaman jagung (González-Cabrera et al., 2021). Variasi pada morfologi mulut seperti tipe pengunyah, penghisap, atau penusuk-penghisap turut menentukan pola kerusakan tanaman.

Sistem respirasi pada serangga bersifat trakeal, memungkinkan difusi oksigen langsung ke jaringan tanpa melalui sirkulasi darah. Trakea bercabang menjadi trakeola yang sangat kecil dan tersebar luas hingga ke seluruh bagian tubuh. Adaptasi respirasi ini memungkinkan aktivitas metabolik tinggi dan kecepatan gerak yang mendukung kelangsungan hidup serangga di lingkungan pertanian yang dinamis (Saini et al., 2023). Sistem ini juga memberi tantangan dalam

pengendalian dengan insektisida berbasis sistemik karena tidak melalui sistem peredaran darah seperti pada hewan vertebrata.



Gambar 1 Anatomi dan Fisiologi Serangga

Sistem peredaran darah serangga bersifat terbuka, di mana hemolimfa (darah serangga) tidak membawa oksigen tetapi berfungsi untuk mengedarkan nutrien, hormon, dan limbah metabolik. Hemolimfa juga memiliki fungsi imun, termasuk fagositosis oleh hemosit dan pelepasan peptida antimikroba. Beberapa serangga seperti *Helicoverpa armigera* menunjukkan respons imun kuat terhadap infeksi bakteri atau fungi, yang membuat mereka tahan terhadap bioinsektisida (Zhou et al., 2020). Pengetahuan ini penting dalam pengembangan strategi pengendalian biologis yang efektif.

Sistem saraf serangga terdiri atas otak dan ganglion ventral. Serangga memiliki reseptor sensori yang sangat sensitif terhadap cahaya, bau, suhu, dan kelembaban, termasuk mata faset (mata majemuk), antena, dan sensilla. Fungsi sensorik ini mempengaruhi perilaku seperti orientasi terhadap cahaya (fototaksis), bau (kemotaksis), dan suhu (termotaksis). Serangga seperti *Nilaparvata lugens* memanfaatkan sinyal kimia untuk mendeteksi tanaman inang dan pasangan kawin (Hu et al., 2022).

Reproduksi serangga menunjukkan variasi luas, dari fertilisasi internal, partenogenesis, hingga metamorfosis sempurna (holometabola) dan tidak sempurna (hemimetabola). Pola metamorfosis ini menentukan keberhasilan populasi serangga di suatu habitat. Pada spesies hama, siklus hidup yang cepat dan kemampuan reproduksi tinggi mempercepat terjadinya ledakan populasi dan menyulitkan pengendalian (Zhu et al., 2021). Studi fisiologi hormon serangga seperti *juvenile hormone* dan *ecdysone* menjadi dasar pengembangan insektisida berbasis hormon (insect growth regulators).

Pemahaman tentang fisiologi sistem ekskresi juga relevan karena organ *Malpighian tubules* memegang peranan penting dalam osmoregulasi dan ekskresi limbah nitrogen. Serangga yang hidup di lingkungan kering menunjukkan efisiensi tinggi dalam mempertahankan air tubuh. Hal ini menjadi faktor penting dalam invasi serangga ke ekosistem pertanian kering dan marginal seperti yang terjadi pada *Schistocerca gregaria* (belalang gurun) yang merusak tanaman di daerah kering Afrika dan Asia (Berthier et al., 2022).

Anatomi dan fisiologi serangga memberikan dasar ilmiah yang kuat dalam mengenali kelemahan biologis untuk intervensi

pengendalian. Pendekatan integratif yang menggabungkan pengetahuan morfologis, fisiologis, dan perilaku serangga berperan penting dalam manajemen hama berkelanjutan. Intervensi berbasis fisiologi seperti RNA interference (RNAi), hormon sintetis, dan pengganggu sistem sensorik menjadi pilihan strategis dalam menghadapi resistensi serangga terhadap insektisida kimia. Pemahaman yang komprehensif terhadap sistem internal serangga merupakan fondasi dari pengembangan teknologi perlindungan tanaman berbasis ekologi dan presisi.

B. Siklus Hidup dan Metamorfosis

Siklus hidup serangga merupakan rangkaian tahapan perkembangan mulai dari telur hingga dewasa. Siklus ini sangat bervariasi antar spesies dan menjadi kunci dalam memahami dinamika populasi serta strategi pengendalian Organisme Pengganggu Tanaman (OPT). Proses ini dikendalikan oleh interaksi kompleks antara faktor genetik, hormonal, dan lingkungan. Metamorfosis merupakan perubahan morfologi dan fisiologi yang terjadi selama pertumbuhan serangga. Berdasarkan bentuk perubahan tersebut, metamorfosis dibedakan menjadi *ametabola*, *hemimetabola*, dan *holometabola*, yang masing-masing memiliki implikasi terhadap ekologi dan manajemen hama (Belles, 2021).

Serangga ametabola tidak mengalami perubahan bentuk yang signifikan dari larva ke dewasa, contohnya *Thysanura*. Jenis ini tidak memiliki fase pupa, dan pertumbuhan hanya ditandai dengan peningkatan ukuran. Pada serangga hemimetabola seperti belalang (*Orthoptera*) dan wereng (*Homoptera*), metamorfosis berlangsung secara bertahap melalui tahap telur, nimfa, dan imago. Nimfa memiliki kemiripan morfologi dengan serangga dewasa tetapi belum

memiliki organ reproduktif yang matang. Transformasi bertahap ini mempengaruhi cara serangga beradaptasi pada lingkungan dan mengakses sumber makanan yang sama dengan bentuk dewasanya (*Zhao et al., 2022*).

Pada serangga holometabola seperti kupu-kupu, lalat, dan kumbang, metamorfosis berlangsung melalui empat tahap: telur, larva, pupa, dan imago. Tahap larva sangat aktif dalam mencari makan, sedangkan pupa merupakan fase reorganisasi total struktur tubuh. Transformasi dramatis ini melibatkan proses histolisis dan histogenesis, di mana jaringan larva dihancurkan dan dibentuk kembali menjadi organ dewasa. Perbedaan habitat dan sumber pakan antara larva dan dewasa mengurangi kompetisi intraspesifik dalam spesies tersebut (*Truman & Riddiford, 2019*).

Hormon utama yang mengatur metamorfosis serangga adalah *ecdysone* dan *juvenile hormone (JH)*. *Ecdysone* menginisiasi molting atau pergantian kulit, sementara *JH* menentukan bentuk tahap berikutnya. Ketika kadar *JH* tinggi, serangga tetap dalam fase larva; saat *JH* menurun, serangga memasuki tahap pupa dan kemudian dewasa. Dinamika hormonal ini telah dimanfaatkan dalam pengembangan *insect growth regulators (IGR)* sebagai metode pengendalian yang menargetkan sistem endokrin serangga, sehingga dapat mengganggu perkembangan hama tanpa merusak tanaman atau organisme non-target (*Roy et al., 2020*).

Siklus hidup yang cepat dan kemampuan bertelur dalam jumlah besar menjadikan banyak serangga hama memiliki laju populasi yang tinggi. Misalnya, *Spodoptera litura* dapat menghasilkan lebih dari 1.000 telur selama satu siklus hidup, mempercepat invasi dan kerusakan pada tanaman. Kondisi lingkungan seperti suhu,

kelembaban, dan fotoperiode turut mempengaruhi kecepatan perkembangan setiap tahap metamorfosis. Pemanasan global telah menyebabkan pergeseran waktu musim berkembang serangga, memperluas distribusi geografisnya dan meningkatkan risiko serangan di luar wilayah endemik sebelumnya (Andrade et al., 2022).

Pemahaman terhadap tahapan siklus hidup sangat penting dalam menentukan titik kritis intervensi pengendalian. Misalnya, aplikasi insektisida lebih efektif saat serangga berada pada fase larva muda yang lebih rentan terhadap bahan aktif. Strategi pengendalian berbasis waktu atau *timing control* bergantung pada prediksi akurat terhadap durasi dan karakteristik setiap tahap perkembangan serangga. Oleh karena itu, pembangunan model derajat hari (*degree day models*) digunakan untuk memetakan dinamika perkembangan serangga berdasarkan suhu akumulatif harian (Bahlai et al., 2021).

Metamorfosis juga memiliki implikasi ekologis dalam siklus energi dan rantai makanan. Larva serangga menjadi konsumen primer penting dalam ekosistem pertanian dan menjadi mangsa bagi predator alami seperti parasitoid dan burung. Perubahan bentuk dari larva ke imago juga berkontribusi terhadap diversitas ekologi, khususnya dalam peran ganda sebagai hama dan polinator. Oleh karena itu, pendekatan pengelolaan yang mempertimbangkan seluruh siklus hidup serangga menjadi penting dalam mewujudkan sistem perlindungan tanaman yang berkelanjutan dan berbasis ekologi.

C. Identifikasi Serangga Pengganggu

Identifikasi serangga pengganggu merupakan tahap fundamental dalam upaya perlindungan tanaman. Keberhasilan pengendalian hama sangat bergantung pada ketepatan dalam mengenali jenis serangga,

stadium hidup, dan karakteristik ekologi. Kesalahan dalam identifikasi dapat menyebabkan kegagalan dalam penanganan, bahkan meningkatkan resistensi dan dampak ekonomi. Identifikasi dilakukan berdasarkan morfologi eksternal, perilaku, habitat, dan—dalam perkembangan mutakhir—analisis molekuler. Pendekatan ini bertujuan membedakan spesies pengganggu dari serangga netral atau menguntungkan (*García-Robledo et al., 2022*).

Ciri morfologi merupakan dasar paling umum dalam identifikasi awal serangga pengganggu. Beberapa karakter utama yang diamati meliputi bentuk dan struktur antena, tipe mulut, jumlah dan bentuk kaki, sayap, serta warna tubuh. Misalnya, *Nilaparvata lugens* (wereng coklat) dikenali melalui tubuh ramping berwarna coklat kehitaman dengan sayap yang menutupi abdomen secara menyilang. Tipe mulut penusuk-penghisap pada wereng ini menjadi ciri khas sekaligus petunjuk terhadap pola serangannya pada jaringan floem tanaman padi (*Khan et al., 2021*).

Metode identifikasi berbasis perilaku juga penting untuk memahami pola serangan dan waktu kemunculan. Contohnya, *Spodoptera frugiperda* (ulat grayak jagung) aktif pada malam hari (nokturnal) dan bersembunyi pada siang hari di pangkal tanaman. Perilaku seperti ini membantu pengamat untuk menentukan waktu pengendalian yang optimal. Selain itu, lokasi kerusakan pada tanaman, seperti daun, batang, atau akar, menjadi petunjuk tambahan dalam mengenali jenis serangga. Pola gigitan, bentuk bekas makan, atau eksudat juga memberi indikasi spesifik terhadap pelaku kerusakan (*De Oliveira et al., 2023*).

Identifikasi serangga juga dapat dibantu melalui alat bantu optik seperti kaca pembesar dan mikroskop stereo. Pada beberapa serangga

kecil seperti kutu daun (*Aphididae*), tungau (*Tetranychidae*), dan thrips (*Thysanoptera*), struktur tubuh sangat halus sehingga memerlukan pengamatan mikroskopik untuk membedakan spesies. Laboratorium identifikasi modern telah mengembangkan teknik barcoding DNA, yaitu pengenalan spesies berdasarkan sekuens genetik mitokondria seperti gen *COI* (cytochrome oxidase I), yang memberikan akurasi tinggi dalam membedakan spesies serupa secara morfologi (Zhang *et al.*, 2020).

Keberadaan katalog serangga lokal dan global memudahkan proses identifikasi lapangan. Di Indonesia, referensi seperti *Fauna of Indonesia* dan *Identifikasi Serangga OPT* dari lembaga litbang pertanian menjadi rujukan utama. Selain itu, basis data seperti *Global Biodiversity Information Facility (GBIF)* digunakan untuk membandingkan distribusi dan identitas spesies secara global. Kolaborasi antara ahli entomologi, petani, dan penyuluh lapangan juga mempercepat proses validasi identitas hama di lapangan (Nguyen *et al.*, 2022).

Faktor lingkungan turut memengaruhi morfologi dan pola serangan serangga. Serangga pengganggu yang sama dapat menunjukkan variasi warna atau ukuran tubuh di daerah yang berbeda. Perubahan ini disebut polimorfisme dan menjadi tantangan dalam identifikasi berbasis visual semata. Oleh karena itu, penggabungan data morfologi, perilaku, ekologi, dan genetik menjadi pendekatan ideal dalam identifikasi akurat, khususnya untuk hama invasif seperti *Tuta absoluta* yang sering disalahartikan sebagai ulat buah tomat lokal (Ullah *et al.*, 2021).

Kegiatan identifikasi serangga pengganggu menjadi lebih penting dalam konteks biosekuriti dan perdagangan internasional. Negara-

negara pengimpor produk pertanian menetapkan regulasi ketat terhadap kehadiran OPT tertentu yang dianggap karantina. Kesalahan identifikasi atau keterlambatan pelaporan dapat menyebabkan penolakan ekspor dan kerugian besar. Oleh sebab itu, peningkatan kapasitas identifikasi di level lokal hingga nasional harus menjadi prioritas, termasuk pelatihan teknis, penyuluh, dan petani terhadap jenis-jenis serangga utama yang menyerang komoditas unggulan pertanian (Valenzuela et al., 2019).

Secara keseluruhan, identifikasi serangga pengganggu bukan hanya aspek teknis, tetapi juga strategis dalam sistem pengendalian hama terpadu (PHT). Informasi identifikasi yang akurat menjadi dasar dalam pemilihan agen pengendali hayati, jenis insektisida, waktu aplikasi, dan monitoring populasi. Inovasi teknologi seperti aplikasi identifikasi berbasis citra digital, kecerdasan buatan (AI), dan sistem informasi geografis (GIS) semakin memperkuat kemampuan pemangku kepentingan dalam mengenali dan merespons serangan OPT secara presisi dan cepat.

D. Organisme Pengganggu Tanaman (OPT) dari Golongan Moluska

Moluska merupakan kelompok invertebrata bertubuh lunak, sebagian besar dilindungi oleh cangkang kalsium karbonat. Dalam konteks pertanian, beberapa spesies moluska terutama dari kelas *Gastropoda*, seperti siput dan bekicot, menjadi organisme pengganggu tanaman (OPT) yang serius. Serangan moluska berdampak besar terhadap produksi hortikultura, tanaman pangan, dan pembibitan, karena mereka merusak jaringan muda tanaman, meninggalkan lendir, dan menjadi vektor patogen. Pemahaman mengenai biologi, perilaku

makan, serta dinamika populasi moluska sangat penting untuk menentukan strategi pengendalian yang tepat (*Rueda et al., 2021*).

Siput darat seperti *Achatina fulica* (bekicot Afrika raksasa) dan *Deroceras reticulatum* (siput abu-abu tanpa cangkang) adalah spesies yang paling sering dilaporkan sebagai OPT. Bekicot Afrika memiliki kemampuan reproduksi tinggi dan daya jelajah luas, sementara *D. reticulatum* sangat aktif pada malam hari atau kondisi lembab. Spesies ini menyerang berbagai jenis tanaman muda, termasuk sawi, selada, cabai, dan tomat. Mereka merusak dengan cara menggesek permukaan daun, batang muda, dan buah, meninggalkan bekas makan berbentuk tidak teratur serta lendir yang mengundang infeksi sekunder (*Rowson et al., 2020*).

Moluska bersifat polifag, artinya menyerang berbagai jenis tanaman. Sifat ini menjadikannya ancaman besar bagi pertanian intensif dan pertanaman monokultur. Daya adaptasi moluska terhadap perubahan lingkungan sangat tinggi, seperti toleransi terhadap kelembaban dan pH tanah, serta kemampuan dormansi saat kondisi ekstrem. Dalam ekosistem pertanian tropis, moluska berkembang pesat terutama saat musim hujan. Keberadaan mulsa, pupuk organik, dan lingkungan lembab mempercepat populasi mereka di lahan pertanian (*Bailey et al., 2019*).

Reproduksi moluska berlangsung secara hermaprodit, di mana satu individu memiliki organ kelamin jantan dan betina, memungkinkan perkembangbiakan cepat. Seekor *Achatina fulica* dapat menghasilkan lebih dari 100 telur per siklus. Telur diletakkan di bawah permukaan tanah atau sisa tanaman. Kecepatan pertumbuhan dan reproduksi ini menyulitkan pengendalian jika populasi sudah mencapai ambang ekonomi. Monitoring intensif terhadap telur dan

siput muda sangat penting agar pengendalian dilakukan pada fase paling rentan (*López-Collado et al., 2022*).

Pengendalian moluska dapat dilakukan secara mekanis, kimiawi, biologi, dan kultur teknis. Secara mekanis, petani melakukan pengumpulan manual atau penggunaan perangkap umpan berbahan dedak dan ragi. Secara kimiawi, penggunaan moluskisida berbahan metaldehid atau feri fosfat dapat menekan populasi, tetapi harus digunakan secara hati-hati karena berdampak pada organisme non-target. Pendekatan biologi seperti introduksi predator alami (misalnya bebek dan kumbang carabid) serta jamur patogen juga dikembangkan untuk mengurangi dampak ekologis dari insektisida sintetis (*Baur et al., 2023*).

Deteksi dini dan identifikasi jenis moluska pengganggu sangat penting untuk merancang strategi pengendalian yang efektif. Pemeriksaan jejak lendir, lubang tidak beraturan pada daun, dan sisa telur di sekitar tanaman merupakan indikator khas serangan moluska. Teknologi citra digital dan sistem kecerdasan buatan mulai diterapkan untuk mengenali pola serangan dan distribusi populasi moluska secara spasial. Penggunaan sistem informasi geografis (SIG) juga mempermudah pemetaan wilayah endemik moluska OPT (*Yin et al., 2020*).

OPT dari golongan moluska memerlukan pendekatan pengelolaan terintegrasi yang tidak hanya berfokus pada pengendalian populasi, tetapi juga modifikasi habitat, sanitasi lahan, serta edukasi petani. Penerapan *Integrated Pest Management* (IPM) berbasis komunitas menjadi sangat penting mengingat siklus hidup moluska yang lambat namun stabil, serta kemampuan mereka untuk bertahan dalam jangka panjang di lingkungan pertanian. Keberhasilan pengelolaan moluska

sebagai OPT akan sangat bergantung pada sinergi antara inovasi teknologi, praktik agronomi yang baik, dan dukungan kebijakan pertanian yang berkelanjutan.

E. Teknik Pengamatan dan Sampling di Lapangan

Teknik pengamatan dan sampling di lapangan merupakan langkah penting dalam kegiatan monitoring Organisme Pengganggu Tanaman (OPT), baik dari golongan serangga maupun moluska. Observasi langsung terhadap populasi hama di lahan budidaya diperlukan untuk mengetahui intensitas serangan, stadium perkembangan, serta sebaran spasialnya. Pengambilan data yang sistematis memungkinkan identifikasi ambang ekonomi serangan dan menjadi dasar dalam pengambilan keputusan pengendalian berbasis *Integrated Pest Management* (IPM). Oleh karena itu, metode pengamatan harus dirancang dengan memperhatikan validitas ilmiah, efisiensi waktu, dan kemudahan penerapan di lapangan (*Sparks et al., 2020*).

Terdapat dua pendekatan utama dalam teknik sampling, yaitu *destructive sampling* dan *non-destructive sampling*. *Destructive sampling* dilakukan dengan mengambil sebagian tanaman atau bagian tanaman untuk dianalisis di laboratorium, seperti penghitungan telur atau larva dalam daun yang dikumpulkan. Sementara itu, *non-destructive sampling* dilakukan langsung di lapangan tanpa merusak tanaman, misalnya dengan menghitung jumlah serangga yang terlihat per tanaman atau per plot. Teknik ini berguna untuk pengamatan populasi hama yang aktif di permukaan tanaman, seperti kutu daun atau wereng (*Rodenhouse et al., 2021*).

Metode pengambilan contoh (sampling) harus representatif dan sistematis. Beberapa pola pengambilan contoh yang umum digunakan

antara lain *zig-zag*, *diagonal*, dan *petak acak berulang*. Pola diagonal, misalnya, digunakan untuk memetakan distribusi hama dalam suatu areal tanaman dengan pengamatan pada titik-titik sudut dan tengah petak. Pola tersebut efektif untuk mendeteksi penyebaran awal serangan hama. Ukuran petak sampel dan jumlah titik pengamatan bergantung pada jenis tanaman, luas lahan, serta mobilitas hama yang diamati (*Sileshi et al., 2022*).

Perangkat bantu sampling juga memainkan peran penting. Jaring serangga (sweep net), perangkap lampu (light trap), dan perangkap feromon (pheromone trap) banyak digunakan untuk menangkap serangga dewasa, terutama dari ordo *Lepidoptera* dan *Coleoptera*. Light trap efektif untuk serangga nokturnal seperti ulat grayak, sedangkan perangkap feromon menargetkan serangga spesifik berbasis sinyal kimia seksual. Untuk moluska, perangkap umpan berbahan organik seperti dedak, daun pisang, atau bekatul digunakan untuk menarik siput dan bekicot pada malam hari (*Mohd-Zainudin et al., 2021*).

Selain itu, teknik *visual counting* dan *leaf sampling* sangat berguna untuk serangga kecil seperti kutu daun dan thrips. Visual counting dilakukan dengan menghitung jumlah serangga pada jumlah helai daun tertentu secara acak. Sedangkan leaf sampling dapat menggunakan metode *leaf disc* untuk mengamati kerusakan atau jumlah telur yang diletakkan. Dalam kasus serangga bawah tanah seperti larva *Agrotis* atau *Phyllophaga*, penggalian tanah sedalam 5–10 cm menjadi teknik yang relevan untuk mendeteksi keberadaan larva (*Tang et al., 2019*).

Frekuensi pengamatan di lapangan sangat bergantung pada siklus hidup serangga dan musim tanam. Pengamatan mingguan atau dua

kali seminggu direkomendasikan pada fase vegetatif dan generatif awal tanaman, karena merupakan waktu kritis munculnya populasi awal hama. Data hasil pengamatan dicatat dalam formulir lapangan yang mencakup lokasi, jenis tanaman, jenis OPT, jumlah individu, intensitas serangan, dan stadium perkembangan. Digitalisasi pencatatan melalui aplikasi berbasis smartphone dan GPS mulai diterapkan untuk meningkatkan kecepatan pelaporan dan akurasi spasial (*Khanal et al., 2023*).

Interpretasi data hasil sampling menghasilkan nilai seperti kepadatan populasi, indeks dominansi, dan peta distribusi hama. Dari data ini, petani atau penyuluh dapat menentukan apakah populasi telah melampaui ambang ekonomi (*economic threshold*) dan kapan intervensi pengendalian harus dilakukan. Teknik pengamatan dan sampling yang tepat tidak hanya meningkatkan efektivitas pengendalian, tetapi juga menghindari penggunaan pestisida yang tidak perlu. Oleh karena itu, pelatihan berkelanjutan bagi petani dan pengamat lapang sangat penting untuk memastikan akurasi dan konsistensi metode pengambilan data.

F. Rangkuman

Serangga dan moluska merupakan golongan utama Organisme Pengganggu Tanaman (OPT) yang menimbulkan kerusakan serius pada berbagai komoditas pertanian. Serangga memiliki sistem anatomi dan fisiologi kompleks yang menunjang kemampuan mereka sebagai herbivora, vektor penyakit, maupun polinator. Sistem pencernaan, respirasi, sirkulasi, saraf, dan reproduksi serangga sangat beragam dan berperan penting dalam adaptasi serta resistensi terhadap pengendalian. Siklus hidup serangga, baik ametabola, hemimetabola, maupun holometabola, memberikan wawasan penting mengenai

tahapan rentan untuk intervensi. Identifikasi serangga pengganggu dilakukan melalui morfologi, perilaku, dan teknik molekuler seperti DNA barcoding. Sementara itu, moluska seperti siput dan bekicot menunjukkan daya rusak tinggi melalui mekanisme makan abrasif serta kemampuan reproduksi cepat. Pengelolaan moluska menuntut strategi IPM berbasis habitat dan populasi. Teknik pengamatan dan sampling di lapangan menjadi fondasi dalam menentukan ambang ekonomi serangan dan efektivitas pengendalian, dengan metode visual, perangkap, dan pencatatan digital yang semakin berkembang.

G. Latihan

Soal

1. Jelaskan struktur dan fungsi utama dari sistem pencernaan dan respirasi pada serangga serta kaitannya dengan efektivitas pengendalian hama!
2. Bandingkan metamorfosis hemimetabola dan holometabola serta berikan contoh dampaknya terhadap ekosistem pertanian!
3. Bagaimana peran juvenile hormone dan ecdysone dalam proses perkembangan serangga? Jelaskan penerapannya dalam pengendalian hama!
4. Sebutkan dan jelaskan tiga pendekatan dalam identifikasi serangga pengganggu serta manfaatnya dalam sistem perlindungan tanaman!
5. Uraikan karakteristik moluska sebagai OPT dan strategi pengendalian terpadu yang dapat digunakan untuk mengelola populasinya!

Jawaban

1. **Sistem pencernaan serangga** terdiri dari tiga bagian utama: foregut (pengunyahan dan pengaliran makanan), midgut (pencernaan dan penyerapan), serta hindgut (penyerapan air dan ekskresi). **Sistem respirasi trakeal** memungkinkan oksigen didistribusikan langsung ke jaringan tubuh tanpa bantuan hemolimfa. Hal ini menyebabkan efektivitas insektisida sistemik menjadi terbatas, karena tidak beredar dalam sistem peredaran darah serangga seperti pada vertebrata.
2. **Metamorfosis hemimetabola** terjadi secara bertahap tanpa fase pupa, contohnya pada wereng. Sementara **holometabola** melibatkan transformasi total melalui tahap larva, pupa, dan imago, seperti pada kupu-kupu. Perbedaan habitat antara larva dan imago pada holometabola mengurangi kompetisi intraspesifik dan memengaruhi distribusi serangga dalam ekosistem pertanian.
3. **Juvenile hormone (JH)** mempertahankan bentuk larva, sedangkan **ecdysone** memicu molting. Ketika kadar JH menurun, serangga memasuki tahap dewasa. Pengendalian hama berbasis hormon, seperti insect growth regulators (IGR), memanfaatkan manipulasi hormonal ini untuk menghentikan perkembangan serangga pada fase tidak produktif atau mematikan.
4. Pendekatan identifikasi serangga pengganggu meliputi:
 - **Morfologi eksternal:** identifikasi berdasarkan bentuk antena, mulut, sayap, dan warna tubuh.

- **Perilaku dan pola makan:** analisis waktu aktivitas, lokasi serangan, dan bentuk kerusakan.
 - **Molekuler/DNA barcoding:** menggunakan gen COI untuk membedakan spesies secara genetik. Pendekatan ini membantu menentukan spesies target dan strategi pengendalian yang tepat.
5. Moluska seperti siput dan bekicot merusak tanaman dengan menggosok daun muda dan meninggalkan lendir, serta bertindak sebagai vektor patogen. Pengelolaannya meliputi:
- **Mekanis:** pemungutan manual dan penggunaan perangkat.
 - **Kimiawi:** moluskisida seperti metaldehid.
 - **Biologis:** predator alami seperti bebek atau kumbang.
 - **Kultur teknis:** sanitasi, pengeringan lahan, dan modifikasi habitat untuk mencegah kelembaban berlebih. Strategi terpadu diperlukan karena kemampuan reproduksi cepat dan adaptasi moluska terhadap lingkungan tropis.

BAB IV

VERTEBRATA SEBAGAI HAMA TANAMAN

Vertebrata merupakan kelompok hewan bertulang belakang yang dalam konteks ekosistem pertanian sering kali menjadi agen perusak tanaman. Gangguan yang disebabkan oleh vertebrata tidak hanya mengurangi hasil panen, tetapi juga dapat menyebabkan kerusakan struktural pada tanaman dan sarana produksi lainnya. Bab ini mengulas secara mendalam peran vertebrata sebagai hama tanaman, mulai dari identifikasi jenis-jenis vertebrata pengganggu, ekologi dan perilaku mereka, hingga pendekatan pengendalian yang tepat berbasis prinsip ekologi dan konservasi.

- **Tujuan Pembelajaran**

- Mengidentifikasi jenis-jenis vertebrata yang berperan sebagai hama tanaman di ekosistem pertanian.
- Menjelaskan pola dan waktu serangan dari berbagai vertebrata perusak tanaman berdasarkan fase pertumbuhan tanaman.
- Mendeskripsikan strategi pengendalian alami dan peran predator serta kompetitor dalam pengelolaan hama vertebrata.
- Menganalisis risiko ekologis dari penggunaan pengendalian kimia terhadap populasi vertebrata dan organisme non-target.
- Merancang strategi pengendalian berbasis ekosistem dan konservasi dalam pengelolaan hama vertebrata.

A. Jenis-jenis Vertebrata Perusak Tanaman

Hama dari golongan vertebrata merupakan kelompok hewan bertulang belakang yang kerap kali menjadi masalah serius dalam produksi tanaman. Keberadaan mereka di lingkungan pertanian dapat menyebabkan penurunan kuantitas dan kualitas hasil panen. Jenis-jenis yang umum ditemukan di lahan pertanian mencakup mamalia seperti tikus (*Rattus spp.*), burung seperti pipit (*Lonchura spp.*), serta reptil dan amfibi yang merusak benih atau jaringan tanaman muda. Menurut analisis ekotipe hama vertebrata, karakteristik morfologi dan kebiasaan makan sangat menentukan tingkat kerusakan yang ditimbulkan (Singh et al., 2021).

Tikus sawah merupakan salah satu jenis vertebrata perusak yang paling merugikan petani. Mereka memiliki kemampuan reproduksi tinggi dan beradaptasi dengan cepat terhadap perubahan lingkungan. Tikus merusak tanaman dengan cara menggigit batang muda, memakan bulir padi, dan merobohkan tanaman. Studi pengendalian hayati terhadap populasi *Rattus argentiventer* menunjukkan bahwa pendekatan ekosistem lebih efektif dibandingkan metode kimia (Rahman et al., 2022). Strategi pemantauan populasi dan rotasi habitat menjadi bagian dari mitigasi keberlanjutan.

Kelompok burung seperti pipit dan burung gereja juga menjadi pengganggu utama pada masa pemasakan biji-bijian. Burung menyerang ladang padi dan jagung dengan mencabut bulir atau mematuki buah tanaman. Mereka juga kerap mengganggu saat tahap pengeringan pascapanen. Beberapa pendekatan teknologi terkini seperti penggunaan *sonic deterrent systems* dan *visual scare devices* telah diuji untuk meminimalisasi serangan burung (Chen et al., 2020).

Penggunaan teknologi ini disesuaikan dengan karakteristik spesies dan ekosistem lokal.

Kelelawar pemakan buah (*Pteropus spp.*) merupakan vertebrata perusak pada sistem hortikultura. Mereka menyebabkan kerugian pada buah-buahan seperti mangga, rambutan, dan pisang. Meskipun memiliki peran penting dalam penyerbukan dan penyebaran biji, kehadiran mereka di lahan produksi intensif dapat menimbulkan dilema ekologis. Beberapa pendekatan konservatif mengedepankan pengelolaan lanskap dan penyediaan sumber makanan alternatif sebagai solusi jangka panjang (Alves et al., 2021).

Reptil seperti biawak (*Varanus salvator*) dan ular tidak secara langsung memakan tanaman, tetapi dapat merusak lingkungan pertanian dan menyerang unggas peliharaan. Kehadiran mereka juga menimbulkan ketakutan pada petani yang mengganggu kegiatan pertanian. Meskipun bukan hama utama, kehadiran mereka dalam sistem pertanian perlu dimitigasi secara hati-hati. Pendekatan edukatif kepada petani menjadi aspek penting dalam pengelolaan fauna reptil yang kadang dilindungi (Fernandes et al., 2023).

Amfibi seperti katak umumnya bukan hama tanaman, tetapi beberapa spesies dapat merusak bibit atau mencemari sistem perairan irigasi. Kehadiran mereka juga menjadi indikator perubahan kualitas lingkungan. Beberapa laporan menyebutkan bahwa populasi amfibi meningkat pesat di sawah dengan input pupuk organik tinggi. Hal ini menunjukkan bahwa amfibi dapat menjadi bioindikator, sekaligus potensial menjadi perusak jika populasi tidak dikendalikan (Zhao et al., 2022).

Secara keseluruhan, pengelompokan vertebrata sebagai hama tanaman harus mempertimbangkan karakteristik ekologis dan dampak ekonomis yang ditimbulkan. Pemahaman menyeluruh terhadap spesies, pola makan, habitat, serta musim serangan menjadi dasar penting dalam menyusun strategi pengendalian yang efektif dan berkelanjutan. Pendekatan integratif seperti *Integrated Vertebrate Pest Management (IVPM)* sangat diperlukan untuk mengurangi dampak kerusakan tanpa merusak keseimbangan ekosistem (Narayan et al., 2023).

B. Pola dan Waktu Serangan

Pola dan waktu serangan hama vertebrata sangat dipengaruhi oleh ritme biologis, musim tanam, serta dinamika lingkungan pertanian. Vertebrata memiliki perilaku yang adaptif terhadap perubahan musim, pola tanam, dan ketersediaan pakan. Dalam konteks pertanian tropis, banyak spesies hama vertebrata menunjukkan pola serangan yang berkorelasi erat dengan fase perkembangan tanaman, seperti pembibitan, pertumbuhan vegetatif, dan pematangan hasil. Pemahaman terhadap pola ini menjadi dasar penting dalam merancang strategi pengendalian yang bersifat preventif dan efisien, baik dari segi waktu, biaya, maupun tenaga kerja (Oladunjoye et al., 2022).

Tikus sawah, sebagai salah satu vertebrata perusak utama, biasanya menyerang tanaman pada fase generatif, terutama ketika bulir padi mulai terisi. Pola serangan mereka cenderung terjadi pada malam hari (nokturnal) dan meningkat drastis menjelang panen. Serangan dini biasanya sulit terdeteksi karena bersifat sporadis, tetapi ketika populasi meningkat, kerusakan dapat bersifat sistematis. Studi pemodelan populasi tikus menunjukkan adanya peningkatan aktivitas pada musim kemarau pendek yang bertepatan dengan masa tanam

kedua (Yusoff et al., 2020). Aktivitas pemupukan dan panen sebelumnya juga menjadi faktor pendorong invasi.

Burung pemakan biji seperti *Lonchura spp.* biasanya menyerang tanaman pada waktu pagi dan sore hari, terutama pada musim panen padi dan jagung. Mereka membentuk koloni dan berpindah cepat dari satu lahan ke lahan lain tergantung ketersediaan makanan. Musim hujan cenderung mengurangi intensitas serangan karena biji-bijian basah kurang disukai. Namun, pada musim kering, intensitasnya meningkat drastis. Kajian pada lanskap pertanian skala luas menunjukkan bahwa burung mengandalkan indikator visual dan audio untuk mendeteksi lokasi pangan, sehingga deteksi dini terhadap aktivitas mereka menjadi sangat krusial (Li et al., 2021).

Serangan kelelawar buah bersifat musiman dan sangat berkorelasi dengan masa berbuah tanaman hortikultura. Mereka lebih aktif pada musim kemarau saat buah matang dan ketersediaan air di alam terbatas. Pola aktivitasnya terjadi saat malam hari, dimulai dari senja hingga menjelang fajar. Mereka menyerang dalam kelompok kecil dan memilih buah matang yang memiliki aroma kuat seperti mangga, jambu, dan pisang. Studi ekologi perilaku menunjukkan bahwa kelelawar memilih lokasi serangan berdasarkan jarak dari hutan atau tempat tinggalnya, serta berdasarkan pada tingkat gangguan manusia di sekitar lahan (Santos et al., 2020).

Mamalia besar seperti kera dan babi hutan memiliki pola serangan yang bergantung pada kelangkaan sumber pangan alami. Ketika ketersediaan pakan di hutan menurun akibat deforestasi atau musim kering, mereka berpindah ke lahan pertanian. Serangan biasanya terjadi secara acak tetapi intens pada masa puncak panen buah atau umbi-umbian. Kera dikenal memiliki pola yang kompleks, bahkan

menggunakan strategi eksplorasi dan pengintaian sebelum menyerang. Di beberapa daerah tropis, babi hutan menyebabkan kerugian besar dengan merusak sistem tanam berpola dan membuat saluran masuk permanen ke lahan pertanian (Wijayanti et al., 2023).

Reptil seperti biawak dan ular tidak menyerang tanaman secara langsung, namun kehadiran mereka sering bersamaan dengan populasi hama utama. Misalnya, biawak dapat datang ke lahan karena tertarik oleh kehadiran tikus. Oleh karena itu, waktu kehadiran reptil ini seringkali menjadi indikator meningkatnya populasi hama primer. Sementara itu, ular sebagai predator alami justru membantu mengontrol tikus, meskipun petani sering mengusirnya karena dianggap berbahaya. Studi ekosistem menunjukkan adanya ketergantungan antar-spesies dalam menentukan waktu dan pola pergerakan mereka (Tuan et al., 2021).

Pemetaan temporal dan spasial dari pola serangan vertebrata sangat penting untuk desain pengendalian yang akurat. Penggunaan teknologi seperti *remote sensing*, kamera jebak, dan pemodelan spasial berbasis GIS telah terbukti efektif dalam mengidentifikasi zona rawan serangan dan periode kritis. Integrasi data iklim, pola tanam, dan aktivitas biologis hama memungkinkan petani dan pengelola pertanian merancang jadwal tanam dan rotasi lahan yang meminimalisasi risiko serangan (Kumar et al., 2022). Oleh karena itu, strategi pengendalian harus bersifat dinamis, berbasis data, dan disesuaikan dengan ritme ekologis hama vertebrata.

C. Strategi Pengendalian Alami

Strategi pengendalian alami terhadap vertebrata sebagai hama tanaman menitikberatkan pada pendekatan ekologis yang menjaga

keseimbangan antara spesies dalam ekosistem pertanian. Tidak seperti pengendalian kimia yang cenderung bersifat reaktif dan berisiko menimbulkan dampak negatif jangka panjang, pengendalian alami memanfaatkan musuh alami, manipulasi habitat, dan perilaku ekologis dari hama itu sendiri. Pendekatan ini sejalan dengan prinsip *agroekologi* dan *integrated pest management (IPM)* yang menekankan keberlanjutan, efisiensi ekologis, serta keberterimaan sosial dan ekonomi (Martin et al., 2022).

Salah satu pendekatan utama dalam pengendalian alami terhadap vertebrata adalah konservasi dan pemanfaatan musuh alami. Misalnya, ular dan burung pemangsa seperti elang dan burung hantu berperan penting dalam mengendalikan populasi tikus di lahan pertanian. Studi ekosistem menunjukkan bahwa keberadaan tempat bersarang alami seperti pohon tinggi dan menara kayu meningkatkan keberadaan predator ini secara signifikan, sehingga secara tidak langsung menurunkan populasi tikus (Sweeney et al., 2021). Oleh karena itu, menciptakan lanskap pertanian yang ramah bagi predator alami menjadi kunci keberhasilan pengendalian berbasis ekologi.

Manipulasi habitat juga merupakan strategi efektif dalam mengurangi tekanan serangan vertebrata. Menjaga keanekaragaman vegetasi di sekitar lahan pertanian, seperti semak, pagar hidup, atau zona penyangga alami, dapat mengurangi tingkat serangan karena vertebrata cenderung menghindari area yang berisiko tinggi terhadap keberadaan predator. Penanaman tanaman pengalih (*decoy plants*) atau tanaman yang tidak disukai vertebrata di sekeliling tanaman utama juga terbukti menurunkan tingkat kerusakan secara signifikan (Sarker et al., 2020). Praktik ini mendukung diversifikasi agroekosistem dan meningkatkan ketahanan ekologis.



Gambar 2 Strategi Pengendalian Alami

Pemanfaatan teknologi tradisional yang ramah lingkungan seperti penggunaan jebakan mekanis, suara pengusir alami, dan penggunaan predator buatan juga menjadi bagian dari strategi alami. Di beberapa wilayah Asia Tenggara, petani memanfaatkan sistem *burung hantu sawah* yang dibiakkan dan dilepas ke alam untuk menekan populasi tikus. Penggunaan suara pemangsa atau bau predator sintetis (feromon) juga mampu menimbulkan efek takut pada beberapa jenis burung pengganggu (Harper et al., 2021). Strategi ini dapat digunakan secara selektif tanpa mengganggu spesies bukan target.

Pengendalian populasi dengan pendekatan reproduksi juga semakin dikembangkan. Beberapa studi memanfaatkan teknik sterilisasi alami atau *chemosterilants* untuk mengendalikan tikus sawah. Penggunaan bahan alami seperti ekstrak tumbuhan tertentu yang mengandung zat anti-fertilitas telah diuji pada populasi *Rattus spp.* dan menunjukkan hasil yang signifikan dalam menekan reproduksi tanpa mencemari lingkungan (Singh et al., 2021). Strategi

ini sangat cocok diterapkan di daerah konservasi atau pertanian organik yang sensitif terhadap input kimia.

Strategi rotasi tanaman dan pengaturan waktu tanam juga memegang peranan penting dalam pengendalian alami. Dengan menyesuaikan kalender tanam agar tidak sinkron secara regional, petani dapat mengurangi daya tarik lahan secara kolektif bagi vertebrata hama. Konsep ini dikenal sebagai *asynchronous planting*, di mana distribusi waktu tanam mencegah populasi hama mencapai puncak secara serentak. Praktik ini terbukti mengurangi intensitas serangan pada fase generatif tanaman, terutama terhadap serangan burung dan tikus (Ghosh et al., 2022).

Pengendalian berbasis komunitas merupakan elemen krusial dalam strategi alami, karena keberhasilan tindakan ini sangat bergantung pada partisipasi kolektif petani. Misalnya, sistem jadwal panen kolektif, penjagaan lahan bersama, atau sistem rotasi pengendalian manual lebih efektif jika dilakukan dalam satu kawasan atau desa. Pendekatan partisipatif juga memperkuat kesadaran lingkungan, memperkuat jaringan sosial, dan memperkecil ketergantungan terhadap solusi kimia yang merusak (Nugroho et al., 2023). Model *community-based vertebrate control* telah diadopsi di berbagai negara sebagai kerangka kolaboratif yang adaptif.

D. Peran Predator dan Kompetitor

Predator dan kompetitor memiliki peranan vital dalam menjaga keseimbangan populasi vertebrata perusak tanaman dalam ekosistem pertanian. Dalam sistem alami, dinamika populasi ditentukan oleh interaksi antarorganisme, di mana predator memangsa hama dan kompetitor bersaing untuk sumber daya terbatas. Dengan memahami

dan mendayagunakan peran predator dan kompetitor, strategi pengendalian hama vertebrata dapat diarahkan pada pendekatan ekologis yang berkelanjutan. Konsep *biological regulation* dalam *agroecology* menekankan bahwa keragaman biologis menjadi fondasi pengendalian populasi hama tanpa harus mengandalkan pestisida sintetis (Torres et al., 2022).

Predator alami seperti burung pemangsa, ular, dan mamalia karnivora kecil menjadi agen penting dalam menekan populasi vertebrata hama, khususnya tikus dan burung kecil. Elang tikus (*Elanus caeruleus*) dan burung hantu (*Tyto alba*) telah terbukti secara signifikan mengurangi kerusakan akibat tikus di lahan sawah. Studi lapangan menunjukkan bahwa pemasangan kotak sarang buatan di sekitar ladang meningkatkan kepadatan burung hantu dan menurunkan aktivitas tikus hingga 60% dalam satu musim tanam (Handika et al., 2021). Hal ini menunjukkan pentingnya desain habitat buatan untuk mendukung kehadiran predator alami.

Ular seperti *Ptyas mucosa* dan *Boiga dendrophila* berperan sebagai predator utama tikus, namun sering kali dibunuh karena ketakutan atau ketidaktahuan petani. Padahal keberadaan ular membantu mengendalikan populasi hama tanpa merusak tanaman. Pendidikan dan pelatihan petani dalam mengenali spesies ular yang tidak berbahaya dapat meningkatkan toleransi dan konservasi predator tersebut. Studi etnozooologi di pertanian tropis menunjukkan bahwa persepsi petani terhadap ular sebagai pembasmi hama mulai meningkat seiring edukasi berbasis konservasi (Ramirez et al., 2020).

Kompetitor juga memainkan peran penting dalam membatasi ruang ekologis vertebrata perusak. Kehadiran spesies lain yang memanfaatkan sumber daya serupa dapat menekan pertumbuhan

populasi hama melalui kompetisi makanan dan tempat tinggal. Misalnya, keberadaan tikus rumahan (*Mus musculus*) dalam sistem pertanian dapat mengurangi dominasi *Rattus argentiventer* karena perbedaan strategi foraging dan wilayah teritorial yang saling tumpang tindih (Dwiastuti et al., 2022). Walaupun *M. musculus* juga dianggap sebagai hama, efek kompetisinya sering kali memperlambat invasi spesies yang lebih merusak.

Peran predator generalis seperti biawak juga penting, meskipun tidak selalu langsung menyerang hama utama. Biawak mengkonsumsi telur atau anak tikus, burung kecil, serta amfibi, sehingga mampu menjaga populasi beberapa vertebrata tetap terkendali. Meski keberadaannya sering dihindari karena dianggap mengganggu, biawak sesungguhnya menjadi bagian penting dari jaringan trofik dalam agroekosistem. Studi trophic cascade menunjukkan bahwa hilangnya predator seperti biawak dapat menyebabkan ledakan populasi hama tingkat bawah (Cho et al., 2021).

Beberapa ekosistem pertanian telah berhasil mengadopsi strategi *predator augmentation*, yaitu meningkatkan populasi predator melalui pembiakan dan pelepasan terkontrol. Contohnya adalah program pembiakan burung hantu di Malaysia dan Filipina yang menunjukkan penurunan signifikan terhadap serangan tikus. Teknik ini memiliki kelebihan karena bersifat ramah lingkungan, minim risiko resistensi, dan memperkuat ketahanan ekosistem. Selain itu, program ini memperkuat keterlibatan komunitas lokal dalam konservasi hayati pertanian (Fernando et al., 2023).

Perlu ditekankan bahwa efektivitas peran predator dan kompetitor sangat bergantung pada ketersediaan habitat dan kestabilan lingkungan. Monokultur intensif dan penggunaan pestisida yang

berlebihan dapat mengurangi keberadaan organisme pengendali alami. Oleh karena itu, restorasi habitat alami, pengelolaan lanskap multistrata, dan larangan penggunaan pestisida non-selektif menjadi kunci keberhasilan strategi ini. Ketika kondisi ekologi mendukung, predator dan kompetitor akan bekerja sebagai sistem pengendalian hama yang berkelanjutan dan efisien (Nguyen et al., 2022).

E. Risiko Ekologis dari Pengendalian Kimia

Pengendalian hama vertebrata dengan bahan kimia, terutama rodentisida dan repelan sintesis, telah lama menjadi pilihan utama di banyak sistem pertanian intensif. Keampuhannya dalam menurunkan populasi hama dalam waktu relatif singkat menjadikan metode ini populer di kalangan petani. Namun, penggunaan bahan kimia dalam jangka panjang menimbulkan dampak ekologis yang kompleks dan merugikan. Intervensi berbasis kimia tidak hanya berdampak pada target spesies, tetapi juga memengaruhi organisme non-target, kualitas lingkungan, serta kestabilan rantai makanan dalam agroekosistem (Barber et al., 2022).

Salah satu risiko utama pengendalian kimia adalah bioakumulasi bahan aktif pestisida dalam tubuh organisme non-target. Burung pemangsa seperti burung hantu dan elang yang memangsa tikus yang telah terkena rodentisida dapat mengalami keracunan sekunder. Fenomena ini tidak hanya mengurangi populasi predator alami tetapi juga memperlemah sistem kontrol hayati yang seharusnya dapat bekerja secara berkelanjutan. Studi toksikologi ekosistem mencatat bahwa bahan aktif seperti brodifakum memiliki waktu paruh yang panjang dan tetap aktif dalam jaringan hewan hingga berminggu-minggu setelah aplikasi (Shore et al., 2020).

Penggunaan rodentisida sintetis juga menyebabkan resistensi fisiologis pada populasi hama vertebrata. Tikus, sebagai contoh, mampu mengembangkan mutasi genetik yang membuatnya tahan terhadap bahan aktif antikoagulan. Hal ini berdampak pada meningkatnya dosis aplikasi yang diperlukan, memperbesar beban lingkungan, serta mendorong siklus ketergantungan terhadap pestisida (Jacob et al., 2021). Selain itu, resistensi juga dapat menyebabkan hilangnya efektivitas pestisida generasi awal, yang semula diandalkan dalam pengendalian darurat.

Kerusakan pada komunitas mikroorganisme tanah juga menjadi dampak ekologis yang tidak kalah penting. Bahan kimia yang diaplikasikan di sekitar lahan atau saluran irigasi dapat mencemari tanah dan air, sehingga mengganggu keseimbangan mikrobiota yang berperan penting dalam dekomposisi dan ketersediaan nutrisi. Studi mikroekologi menunjukkan bahwa keberadaan rodentisida dalam tanah menurunkan keanekaragaman mikroba dan aktivitas enzimatis tanah hingga 35% dalam waktu dua minggu setelah aplikasi (Song et al., 2021). Efek ini memperlemah produktivitas jangka panjang lahan pertanian.

Selain efek langsung pada organisme dan tanah, pengendalian kimia juga berdampak terhadap perilaku dan interaksi spesies. Kehilangan spesies predator atau perubahan komposisi komunitas akibat kontaminasi kimia dapat menyebabkan efek domino berupa ledakan populasi spesies lain yang sebelumnya terkendali. Dalam istilah ekologi, ini disebut sebagai *trophic cascade*, di mana ketidakseimbangan pada satu tingkat trofik memengaruhi seluruh jaringan makanan. Contoh nyata adalah peningkatan populasi serangga hama sekunder setelah populasi burung pemangsa menurun akibat keracunan (Hughes et al., 2023).

Risiko jangka panjang dari penggunaan kimia juga terkait dengan kesehatan manusia dan keberlanjutan sistem pangan. Sisa bahan kimia yang terserap dalam jaringan tanaman dapat masuk ke rantai makanan manusia, baik secara langsung melalui konsumsi hasil pertanian maupun tidak langsung melalui kontaminasi air. Kontaminasi residu pestisida telah dikaitkan dengan peningkatan risiko gangguan hormonal dan penyakit degeneratif pada manusia (Tang et al., 2020). Situasi ini menimbulkan kekhawatiran serius terhadap keamanan pangan dan kesehatan masyarakat pedesaan.

Menyikapi berbagai risiko ekologis tersebut, banyak negara mulai membatasi penggunaan rodentisida dan pestisida sintetis dalam sistem pertanian terbuka. Regulasi ketat terhadap jenis dan dosis bahan kimia, serta promosi terhadap alternatif pengendalian biologis menjadi bagian dari kebijakan pertanian berkelanjutan. Pendekatan ini tidak hanya melindungi lingkungan dan keanekaragaman hayati, tetapi juga membangun sistem pertanian yang lebih adaptif terhadap perubahan iklim dan tekanan ekologis lainnya (González-Miqueo et al., 2022).

F. Rangkuman

Vertebrata sebagai hama tanaman mencakup kelompok hewan bertulang belakang seperti tikus, burung, kelelawar, reptil, dan amfibi yang dapat menyebabkan kerusakan signifikan terhadap produksi pertanian. Tikus dan burung merupakan pelaku utama kerusakan saat masa generatif tanaman, sementara kelelawar menyerang buah-buahan matang. Serangan vertebrata dipengaruhi oleh musim, ritme biologis, dan ketersediaan pakan. Strategi pengendalian alami seperti pemanfaatan predator alami (ular, burung hantu), manipulasi habitat, penggunaan tanaman pengalih, dan pengendalian berbasis komunitas menjadi pilihan ramah lingkungan. Peran predator dan kompetitor

terbukti efektif dalam mengontrol populasi hama secara ekologis. Di sisi lain, penggunaan bahan kimia seperti rodentisida menimbulkan risiko serius, seperti resistensi hama, keracunan sekunder, gangguan mikroorganisme tanah, dan efek negatif terhadap kesehatan manusia. Oleh karena itu, pengelolaan hama vertebrata harus berbasis prinsip ekologi, konservasi, dan keberlanjutan.

G. Latihan

Soal

1. Jelaskan tiga jenis vertebrata yang berperan sebagai hama utama dalam ekosistem pertanian dan dampaknya terhadap hasil tanaman!
2. Bagaimana pola dan waktu serangan tikus dan burung pada tanaman padi berbeda satu sama lain? Sertakan alasan ekologisnya!
3. Uraikan pendekatan pengendalian alami terhadap hama vertebrata yang sesuai dengan prinsip agroekologi!
4. Apa saja peran penting predator dan kompetitor dalam pengendalian populasi vertebrata perusak tanaman?
5. Paparkan lima risiko ekologis utama dari penggunaan pengendalian kimia terhadap hama vertebrata!

Jawaban

1. Tiga jenis vertebrata utama sebagai hama tanaman adalah:

- **Tikus (*Rattus spp.*):** merusak batang muda dan bulir padi, menyebabkan kerusakan besar karena kemampuan reproduksinya yang tinggi.
- **Burung (*Lonchura spp.*):** menyerang biji-bijian seperti padi dan jagung, terutama saat fase pematangan hasil.
- **Kelelawar buah (*Pteropus spp.*):** menyerang buah-buahan seperti mangga, pisang, dan jambu dengan menyebabkan buah rontok atau rusak.
Ketiganya menurunkan kuantitas dan kualitas hasil panen serta dapat menimbulkan kerugian ekonomi yang besar.

2. Tikus menyerang tanaman padi terutama pada malam hari (nokturnal), khususnya pada fase generatif saat bulir mulai terisi. Sebaliknya, burung pipit menyerang pada pagi dan sore hari, dan menyerang padi ketika sudah hampir panen. Secara ekologis, tikus aktif di malam hari karena menghindari predator dan manusia, sementara burung memanfaatkan waktu terang untuk mencari makanan dan menghindari kondisi lembab atau hujan.

3. Pendekatan pengendalian alami meliputi:

- Pemanfaatan predator alami seperti burung hantu dan ular.
- Manipulasi habitat dengan menjaga keanekaragaman vegetasi dan menanam tanaman pengalih.
- Penggunaan teknologi tradisional seperti suara pengusir alami dan feromon.
- Sterilisasi alami pada tikus menggunakan ekstrak tumbuhan antifertilitas.

- Pengaturan waktu tanam secara asinkron untuk menghindari puncak serangan hama. Semua strategi ini sejalan dengan prinsip agroekologi yang mengutamakan keberlanjutan dan harmoni dengan lingkungan.
4. Predator seperti burung hantu dan elang memangsa tikus dan burung kecil, membantu mengendalikan populasi hama secara alami. Ular juga memangsa tikus namun sering kali dibunuh karena ketidaktahuan. Kompetitor seperti *Mus musculus* bersaing dengan *Rattus* spp. dalam mencari pakan dan tempat, sehingga menekan dominasi hama utama. Keberadaan predator dan kompetitor menjaga keseimbangan trofik dalam agroekosistem.
5. Risiko ekologis utama dari pengendalian kimia adalah:
- **Keracunan sekunder** pada predator alami seperti burung hantu akibat memakan tikus beracun.
 - **Resistensi genetik** pada tikus terhadap bahan aktif rodentisida.
 - **Penurunan keanekaragaman mikroorganisme tanah** akibat kontaminasi kimia.
 - **Efek domino (trophic cascade)** yang menyebabkan gangguan keseimbangan ekosistem.
 - **Risiko kesehatan manusia** akibat residu kimia masuk ke rantai makanan.

BAB V

PENGENDALIAN ORGANISME PENGGANGGU TUMBUHAN

Pengendalian *Organisme Pengganggu Tumbuhan* (OPT) merupakan aspek penting dalam perlindungan tanaman yang bertujuan menjaga keberlangsungan produksi pertanian. Dalam praktiknya, pengendalian OPT mencakup berbagai pendekatan, termasuk metode fisik, mekanis, kimia, biologis, dan terpadu. Pendekatan fisik dan mekanis merupakan teknik tradisional yang masih relevan digunakan dalam sistem pertanian berkelanjutan karena dampaknya yang minim terhadap lingkungan.

- **Tujuan Pembelajaran**

- Menjelaskan konsep, prinsip, dan metode pengendalian Organisme Pengganggu Tumbuhan (OPT) secara fisik, mekanis, kimiawi, hayati, dan terpadu.
- Menganalisis kelebihan dan kekurangan setiap pendekatan pengendalian OPT dalam konteks pertanian berkelanjutan.
- Mengidentifikasi faktor ekologis, sosial, dan teknologi yang memengaruhi efektivitas pengendalian OPT.
- Mengevaluasi peran pengendalian hayati dan teknologi perangkat dalam sistem pertanian ramah lingkungan.

A. Pengendalian Fisik dan Mekanis

Pengendalian fisik dan mekanis merupakan dua pendekatan non-kimia yang digunakan untuk menekan populasi *Organisme Pengganggu Tumbuhan* (OPT) secara langsung. Pengendalian fisik mencakup penggunaan suhu ekstrem, cahaya, radiasi, air, dan hambatan fisik, sedangkan pengendalian mekanis lebih berfokus pada penggunaan alat atau tindakan manual seperti perangkap, pemangkasan, dan pengambilan hama secara langsung. Kedua pendekatan ini umumnya diterapkan sebagai bagian dari *integrated pest management (IPM)*, terutama pada sistem pertanian yang mengutamakan prinsip ekologi dan keberlanjutan (Mouratidis et al., 2021).

Efektivitas pengendalian fisik telah dikaji dalam berbagai sistem pertanian, termasuk pertanian organik dan hortikultura intensif. Misalnya, penggunaan jaring pelindung untuk menghalangi serangan serangga telah terbukti mampu mengurangi kerusakan tanaman secara signifikan pada budidaya kubis dan tomat. Selain itu, perlakuan suhu panas melalui sinar matahari atau *solarization* menjadi metode populer dalam membunuh patogen tanah dan benih gulma, seperti yang diterapkan dalam manajemen tanah tropis dan subtropis (Baker et al., 2020). Mekanisme ini berperan mensterilkan lapisan tanah atas, memutus siklus hidup OPT tanpa menimbulkan residu.

Dalam konteks pengendalian mekanis, berbagai studi telah menunjukkan bahwa pengumpulan hama secara manual dan pemangkasan bagian tanaman yang terinfeksi dapat menekan perkembangan penyakit tanaman dengan efektif, terutama dalam skala pertanian kecil dan menengah. Penggunaan perangkap seperti *yellow sticky trap* juga merupakan praktik umum dalam memonitor dan

mengendalikan serangga vektor virus pada tanaman hortikultura (Kumar & Singh, 2023). Efektivitas metode ini ditingkatkan dengan integrasi teknologi sensor untuk meningkatkan akurasi pemantauan populasi hama secara real time.

Pengendalian fisik dan mekanis juga menjadi solusi yang ramah lingkungan dalam mengatasi resistensi hama terhadap pestisida kimia. Dalam praktiknya, metode ini mampu mengurangi tekanan seleksi terhadap populasi hama, sehingga memperlambat munculnya resistensi. Penelitian terbaru menunjukkan bahwa kombinasi antara perangkap feromon dan penghalang fisik mampu menurunkan populasi *Spodoptera frugiperda* hingga 60% dalam satu musim tanam tanpa menggunakan pestisida (Jallow et al., 2022). Hal ini menegaskan pentingnya pendekatan non-kimia dalam sistem pertanian berkelanjutan.

Meski memiliki banyak keuntungan, pendekatan ini juga menghadapi berbagai tantangan, terutama dalam hal efisiensi tenaga kerja dan keterbatasan jangkauan aplikasi. Pengendalian mekanis cenderung memerlukan banyak tenaga kerja dan waktu, sehingga menjadi kurang efisien pada skala pertanian besar. Di sisi lain, penggunaan teknologi seperti *ultrasonic devices* atau sistem irigasi bertekanan tinggi untuk membasmi telur hama telah dikembangkan sebagai solusi untuk meningkatkan efisiensi metode fisik (Sung & Lee, 2023). Perkembangan teknologi ini menjadi kunci dalam memperluas implementasi pengendalian fisik di masa depan.

Perkembangan sistem *precision agriculture* juga turut mendorong adopsi pengendalian mekanis dan fisik yang lebih modern dan efisien. Dengan menggunakan data spasial dan citra satelit, deteksi dini terhadap infestasi OPT memungkinkan penerapan pengendalian secara

lokal dan terarah, mengurangi kebutuhan akan aplikasi menyeluruh yang boros sumber daya. Integrasi data ini juga memungkinkan optimalisasi penggunaan alat-alat mekanis dalam melakukan intervensi pada titik-titik kritis serangan hama (Mavridis et al., 2022).

Secara keseluruhan, pengendalian fisik dan mekanis memiliki nilai strategis dalam manajemen OPT yang berkelanjutan, terutama di era ketahanan pangan dan perubahan iklim. Penerapan metode ini tidak hanya memberikan manfaat ekologis tetapi juga dapat meningkatkan kesejahteraan petani dengan menurunkan biaya input pertanian. Dukungan dari pemerintah dan sektor swasta untuk pengembangan teknologi berbasis pengendalian non-kimia akan menjadi penentu dalam perluasan praktik ini ke berbagai sistem pertanian di dunia (Rodríguez-Sánchez et al., 2021).

B. Pengendalian Kimia dan Dampaknya

Pengendalian kimia merupakan metode yang paling umum digunakan dalam manajemen *Organisme Pengganggu Tumbuhan* (OPT), terutama karena efektivitasnya yang tinggi dalam waktu singkat. Pestisida sintetik bekerja dengan cara mengganggu fisiologi hama melalui berbagai mekanisme seperti inhibisi sistem saraf, gangguan hormonal, atau kerusakan pada dinding sel. Keunggulan pengendalian kimia terletak pada skalabilitas penggunaannya serta kemampuannya dalam menghadapi serangan hama yang mendadak dan bersifat eksplosif, khususnya pada tanaman pangan strategis. Dalam praktik komersial, pestisida seringkali menjadi pilihan utama karena ketersediaannya dan familiaritas petani terhadap penggunaannya (Ali et al., 2020).

Namun, penggunaan pestisida kimia secara intensif dan terus-menerus memicu berbagai permasalahan lingkungan dan kesehatan. Residu kimia yang tertinggal di tanah, air, dan hasil pertanian berpotensi mengganggu ekosistem dan kesehatan manusia. Studi toksikologi menunjukkan bahwa paparan jangka panjang terhadap organofosfat dan piretroid dapat menyebabkan gangguan endokrin dan neurotoksik, terutama pada populasi rentan seperti anak-anak dan pekerja pertanian. Hal ini diperparah dengan minimnya kesadaran petani terhadap prinsip keamanan kerja dan ambang batas residu pestisida (Marzuki et al., 2022). Efek akumulatif ini menjadikan pengendalian kimia sebagai isu multidimensional yang melibatkan pertanian, kesehatan, dan konservasi lingkungan.

Dampak ekologis dari pestisida juga mencakup gangguan terhadap keanekaragaman hayati. Banyak organisme non-target seperti serangga polinator, predator alami, dan mikroorganisme tanah mengalami penurunan populasi akibat kontak langsung atau tidak langsung dengan bahan aktif pestisida. Efek kaskade yang ditimbulkan dapat melemahkan sistem pengendalian hayati alami dan menciptakan ketergantungan jangka panjang terhadap input kimia eksternal. Sebuah kajian di ekosistem pertanian tropis menemukan bahwa penggunaan herbisida berbasis glifosat menurunkan keanekaragaman mikroba tanah hingga 35% dalam satu musim tanam (Rodríguez et al., 2023). Hal ini berimplikasi pada menurunnya fungsi ekosistem seperti dekomposisi dan siklus hara.

Fenomena resistensi hama terhadap pestisida merupakan konsekuensi logis dari tekanan seleksi yang terus-menerus. Hama yang mampu bertahan akan berkembang biak dan menurunkan efektivitas pestisida dari waktu ke waktu. Beberapa spesies seperti *Helicoverpa armigera* dan *Plutella xylostella* telah menunjukkan

resistensi terhadap lebih dari satu golongan insektisida, mempersulit strategi pengendalian. Untuk mengatasi hal ini, pendekatan *rotasi bahan aktif* dan penggunaan *mode of action* yang berbeda secara berkala telah dianjurkan oleh para ahli entomologi (Nguyen & Zalucki, 2021). Namun, tanpa pengawasan dan edukasi yang memadai, resistensi tetap menjadi tantangan utama dalam penggunaan pengendalian kimia.

Aspek sosial-ekonomi dari pengendalian kimia juga perlu diperhatikan. Biaya pembelian pestisida dapat membebani petani kecil, terutama jika frekuensi aplikasi tinggi akibat tekanan OPT yang intensif. Ketergantungan terhadap agen kimia komersial membuat petani terjatuh dalam sistem input tinggi yang berisiko tinggi pula secara ekonomi. Dalam studi kasus pada sistem pertanian padi di Asia Tenggara, ditemukan bahwa 40% biaya produksi petani dialokasikan untuk pembelian pestisida dan pupuk kimia, sementara produktivitas tidak selalu meningkat secara proporsional (Setyawan et al., 2023). Ketidakseimbangan ini menunjukkan perlunya intervensi kebijakan untuk mengedukasi dan mendampingi petani menuju penggunaan yang rasional.

Kebijakan regulasi terhadap penggunaan pestisida sangat menentukan arah implementasi pengendalian kimia. Banyak negara telah memperketat izin edar dan ambang batas residu maksimum pada komoditas pangan. Di sisi lain, belum semua negara berkembang memiliki sistem pengawasan dan laboratorium pengujian yang memadai untuk memastikan kepatuhan terhadap standar keamanan. Dalam kerangka global seperti *Codex Alimentarius*, penetapan *maximum residue limits* (MRLs) menjadi acuan internasional, namun tantangan implementatif di lapangan tetap besar (Zhang et al., 2021).

Penegakan hukum dan transparansi data menjadi faktor kunci dalam pengendalian risiko pestisida.

Ke depan, arah pengendalian kimia yang lebih bertanggung jawab difokuskan pada pendekatan *pestisida hijau*, yakni penggunaan senyawa berbasis bahan alami atau semi-sintetik yang bersifat lebih selektif dan mudah terurai di alam. Formulasi bio-pestisida berbasis *neem*, *Bacillus thuringiensis*, dan *metarhizium anisopliae* mulai banyak dikembangkan sebagai alternatif ramah lingkungan. Meskipun efektivitasnya relatif lebih lambat, kombinasi dengan metode pengendalian lainnya mampu membentuk sistem pertanian yang lebih resilien dan berkelanjutan (Chowdhury et al., 2022). Sinergi antara inovasi teknologi, kebijakan publik, dan edukasi petani akan menentukan keberhasilan transisi menuju pengendalian kimia yang lebih bijak.

C. Pengendalian Hayati: Musuh Alami OPT

Pengendalian hayati atau *biological control* merupakan strategi pengendalian organisme pengganggu tumbuhan (OPT) dengan memanfaatkan musuh alami seperti predator, parasitoid, dan patogen. Pendekatan ini menjadi bagian integral dari sistem pengelolaan hama terpadu karena dampaknya yang minimal terhadap lingkungan serta kemampuannya mempertahankan keseimbangan ekosistem. Musuh alami berperan dalam menekan populasi hama secara alami melalui interaksi biologis yang telah berkembang secara evolusioner di alam. Dalam sistem pertanian berkelanjutan, pengendalian hayati dinilai sebagai solusi jangka panjang dalam menjaga produktivitas tanaman dan konservasi keanekaragaman hayati (Huang et al., 2022).

Klasifikasi musuh alami terdiri dari tiga kelompok utama: predator, parasitoid, dan agen patogenik. Predator seperti *Coccinellidae* (kumbang kepik) dan *Chrysopidae* (lalat hijau) memangsa berbagai hama serangga seperti kutu daun dan trips. Parasitoid, contohnya *Trichogramma spp.*, meletakkan telur pada atau di dalam tubuh inang, yang kemudian akan mati setelah larva parasitoid berkembang. Sementara itu, patogen seperti *Beauveria bassiana* atau *Metarhizium anisopliae* menyerang serangga hama melalui infeksi mikroba. Interaksi ini menciptakan tekanan populasi yang signifikan terhadap OPT tanpa perlu menggunakan senyawa sintetis (Bamisile et al., 2021).

Implementasi pengendalian hayati dapat dilakukan secara klasik, augmentatif, atau konservatif. Pengendalian klasik melibatkan introduksi musuh alami dari habitat asalnya ke wilayah baru yang mengalami serangan hama eksotik. Sebaliknya, pendekatan augmentatif dilakukan dengan pelepasan massal musuh alami secara periodik guna memperkuat populasi pengendali. Sementara konservasi berfokus pada pelestarian habitat dan sumber daya yang mendukung kelangsungan hidup musuh alami yang sudah ada di lingkungan tersebut. Ketiga pendekatan ini memerlukan pemahaman mendalam terhadap ekologi hama dan interaksinya dengan lingkungan (Liu et al., 2023).

Efektivitas pengendalian hayati ditentukan oleh beberapa faktor seperti kesesuaian ekologis, adaptabilitas musuh alami, dan kecepatan reaksi terhadap peningkatan populasi hama. Dalam ekosistem tropis, penggunaan parasitoid *Telenomus remus* telah terbukti efektif dalam menekan telur *Spodoptera frugiperda* pada tanaman jagung hingga 70% dalam waktu tiga minggu. Hasil ini mengindikasikan potensi besar pengendalian hayati untuk menggantikan pestisida, terutama

dalam menghadapi spesies hama invasif (Sisay et al., 2020). Penerapan musuh alami juga cenderung lebih selektif, sehingga tidak mengganggu organisme non-target.

Meski demikian, tantangan dalam pengendalian hayati tetap ada. Salah satunya adalah potensi gangguan terhadap spesies endemik akibat introduksi musuh alami asing. Kasus kegagalan pengendalian klasik yang melibatkan predator non-spesifik dapat menimbulkan efek *invasiveness* baru. Selain itu, produksi massal dan distribusi musuh alami memerlukan infrastruktur dan biaya operasional yang tidak selalu tersedia di negara berkembang. Oleh sebab itu, pengembangan bank hayati lokal dan laboratorium entomopatogenik sangat penting dalam mendukung keberlanjutan program ini (Naranjo et al., 2021).

Dalam era pertanian presisi, teknologi berbasis data juga mulai dimanfaatkan untuk mendukung pelepasan musuh alami secara efisien. Drone dan perangkat berbasis GIS digunakan untuk pemetaan hotspot serangan hama, memungkinkan pelepasan musuh alami secara tepat sasaran. Di beberapa negara, penggunaan aplikasi digital untuk mencatat siklus hidup musuh alami dan mendeteksi populasi hama secara otomatis telah dikembangkan sebagai bagian dari pengendalian hayati berbasis teknologi. Inovasi ini memperkuat kapasitas petani dalam mengelola OPT secara mandiri dan efisien (Kumar et al., 2022).

Secara keseluruhan, pengendalian hayati melalui pemanfaatan musuh alami OPT menjadi tumpuan penting dalam pertanian berkelanjutan. Selain menekan populasi hama secara alami, pendekatan ini juga mendukung restorasi fungsi ekosistem dan mengurangi dampak negatif pestisida terhadap lingkungan dan kesehatan manusia. Untuk mencapai efektivitas maksimal, sinergi

antara ilmu ekologi, teknologi, kebijakan publik, dan pendidikan petani mutlak diperlukan. Pengembangan ekosistem pertanian yang ramah terhadap musuh alami adalah langkah strategis dalam menghadapi tantangan produksi pangan global yang berkelanjutan (Fatouros et al., 2021).

D. Teknologi Perangkap dan Repelen

Teknologi perangkap dan *repelen* menjadi bagian integral dari pendekatan pengendalian organisme pengganggu tumbuhan (OPT) yang ramah lingkungan dan berkelanjutan. Perangkap digunakan untuk menangkap atau membunuh hama secara langsung, sementara *repelen* berfungsi untuk mengusir atau mencegah datangnya hama ke area budidaya. Berbagai inovasi telah dikembangkan untuk meningkatkan efektivitas metode ini, mulai dari penggunaan feromon, cahaya spektrum tertentu, warna, hingga senyawa volatil alami yang meniru sinyal kimia antarsesama spesies. Kelebihan utama teknologi ini adalah selektivitasnya terhadap target spesifik serta minimnya dampak terhadap organisme non-target (El-Sayed et al., 2020).

Perangkap berbasis feromon merupakan salah satu teknologi yang paling banyak digunakan dalam pengendalian serangga hama. Feromon seksual digunakan untuk menarik serangga jantan ke dalam perangkap, sehingga mengurangi peluang terjadinya perkawinan. Teknologi ini telah berhasil diterapkan pada pengendalian *Spodoptera litura*, *Helicoverpa armigera*, dan *Plutella xylostella* di berbagai negara tropis. Efektivitasnya tinggi pada daerah dengan kepadatan populasi rendah hingga sedang, terutama jika dikombinasikan dengan strategi monitoring dan ambang batas ekonomi (Mahmoud et al., 2023). Inovasi dalam formula pelepasan feromon berbasis matriks

polimer memperpanjang daya tarik dan mengurangi kebutuhan penggantian rutin.

Penggunaan perangkat berbasis cahaya juga menunjukkan potensi besar, khususnya terhadap hama nokturnal yang tertarik pada spektrum ultraviolet atau biru. Penelitian terbaru mengindikasikan bahwa kombinasi spektrum cahaya dengan panjang gelombang 365–420 nm paling efektif dalam menarik serangga seperti *Nilaparvata lugens* dan *Cylas formicarius*. Cahaya juga dapat dikombinasikan dengan perangkat lem atau perangkat listrik guna meningkatkan efisiensi penangkapan. Namun, sensitivitas terhadap gangguan cahaya eksternal seperti bulan purnama atau polusi cahaya harus diperhitungkan dalam penempatannya di lapangan (Xie et al., 2022).

Repelen alami berbasis senyawa volatil dari tanaman seperti *citronella*, *neem*, *lemongrass*, dan *garlic oil* menunjukkan efektivitas tinggi dalam mengusir hama dari tanaman budidaya. Senyawa ini bekerja dengan cara mengganggu reseptor olfaktori serangga, membuatnya kehilangan kemampuan mengenali inang. Misalnya, ekstrak *Ocimum sanctum* terbukti mampu menurunkan intensitas serangan *Bemisia tabaci* hingga 60% pada tanaman cabai dalam uji lapangan selama dua musim tanam. Keunggulan utama *repelen* berbasis nabati adalah degradasi alaminya yang cepat serta keamanan terhadap manusia dan lingkungan (Singh et al., 2021).

Teknologi perangkat otomatis berbasis digital telah dikembangkan seiring dengan kemajuan *precision agriculture*. Perangkat ini dilengkapi kamera, sensor suhu, dan koneksi nirkabel untuk mendeteksi, menghitung, dan mengidentifikasi jenis hama secara real-time. Data yang dikumpulkan kemudian ditransmisikan ke sistem manajemen pertanian digital untuk dianalisis dan digunakan

dalam pengambilan keputusan. Sistem ini memungkinkan deteksi dini serangan hama dan pengambilan tindakan yang lebih terukur. Efektivitas perangkat pintar telah diuji pada ekosistem jagung dan kedelai dengan tingkat akurasi pengenalan hama mencapai 85% (Zhao et al., 2020).

Dari perspektif integrasi pengendalian, teknologi perangkat dan *repelen* menjadi pelengkap dalam strategi pengelolaan hama terpadu (PHT). Perangkat dapat digunakan sebagai alat monitoring populasi untuk menentukan ambang pengendalian, sedangkan *repelen* dapat diaplikasikan sebagai pelindung tanaman di masa awal tanam atau di masa rawan serangan. Kombinasi perangkat feromon dengan *repelen* visual seperti jaring reflektif juga terbukti menurunkan serangan *Tuta absoluta* secara signifikan pada budidaya tomat. Hal ini menunjukkan bahwa integrasi teknologi pengganggu perilaku hama menjadi strategi efektif jangka panjang (França et al., 2023).

Tantangan implementasi teknologi perangkat dan *repelen* antara lain terkait biaya awal, keberlanjutan suplai bahan aktif, serta kesesuaian ekologi lokal. Penggunaan feromon sintetis atau senyawa volatil harus mempertimbangkan kestabilan kimia dan potensi adaptasi dari serangga target. Selain itu, pelatihan teknis bagi petani dalam pemasangan dan pemeliharaan perangkat menjadi penting agar teknologi ini dapat dimanfaatkan secara optimal. Perlu ada kolaborasi lintas sektor untuk memperluas adopsi teknologi ini, termasuk pengembangan lokal bahan aktif berbasis tumbuhan dan produksi massal perangkat berbiaya rendah (Chen et al., 2022).

E. Pengendalian Terpadu (PHT): Konsep dan Komponen

Pengendalian hama terpadu (*Integrated Pest Management* atau *IPM*) merupakan suatu pendekatan sistematis dan ekologis dalam pengelolaan Organisme Pengganggu Tumbuhan (OPT) yang mengintegrasikan berbagai metode pengendalian secara harmonis. PHT bertujuan untuk menjaga populasi OPT berada pada tingkat yang tidak merugikan secara ekonomi, dengan memperhatikan kelestarian lingkungan dan kesehatan manusia. Pendekatan ini menekankan pada pemahaman ekologi hama dan musuh alaminya, serta penerapan strategi pengendalian berbasis keputusan. Konsep ini telah menjadi kerangka utama dalam kebijakan pertanian berkelanjutan di berbagai negara (Isman et al., 2021).

Komponen utama dari PHT mencakup pemantauan hama secara intensif, penetapan ambang ekonomi, identifikasi spesifik jenis OPT, serta penggabungan berbagai taktik pengendalian—baik biologis, kimia, fisik, maupun kultur teknis. Pemantauan dilakukan secara berkala untuk mengetahui dinamika populasi hama dan faktor-faktor yang memengaruhinya. Penetapan ambang ekonomi menjadi kunci dalam pengambilan keputusan kapan pengendalian harus dilakukan, guna menghindari tindakan yang sia-sia atau berlebihan. Hal ini membantu meminimalkan penggunaan pestisida kimia dan mendorong intervensi yang lebih selektif (Lee et al., 2023).

Pengendalian hayati dengan memanfaatkan musuh alami menjadi tulang punggung dalam kerangka PHT. Musuh alami seperti parasitoid, predator, dan patogen entomopatogenik berperan dalam mengatur populasi hama secara alami. Keberhasilan integrasi pengendalian hayati dalam PHT terbukti pada sistem pertanian hortikultura, di mana penggabungan pelepasan parasitoid

Trichogramma spp. dan pengendalian kultur teknis berhasil menurunkan intensitas serangan *Helicoverpa armigera* hingga di bawah ambang ekonomi (Karar et al., 2021). PHT juga mendukung konservasi biodiversitas dan ketahanan agroekosistem terhadap gangguan eksternal.

Pengendalian kimia dalam PHT tetap diperbolehkan, namun digunakan sebagai opsi terakhir atau dalam kondisi tertentu secara selektif dan terukur. Pemilihan pestisida berbasis selektivitas terhadap musuh alami dan durasi residu yang pendek sangat ditekankan. Prinsip rotasi bahan aktif berbeda juga dijalankan untuk mencegah resistensi hama. Dalam studi pada pertanian padi di Asia Selatan, kombinasi penggunaan insektisida berambang ekonomi dengan pelepasan *Anagrus spp.* menunjukkan hasil panen yang stabil tanpa peningkatan resistensi hama dalam jangka panjang (Chakraborty et al., 2020). Integrasi semacam ini mencerminkan keberimbangan antara efektivitas dan keberlanjutan.

Komponen kultur teknis mencakup praktik pertanian seperti rotasi tanaman, penyesuaian waktu tanam, penggunaan varietas tahan, serta pengelolaan tanah yang baik. Strategi ini bertujuan menciptakan kondisi agroekologis yang tidak menguntungkan bagi perkembangan OPT. Misalnya, penanaman varietas padi tahan wereng coklat dapat menurunkan intensitas serangan hingga 60% tanpa intervensi kimia. Selain itu, praktik tanam serempak terbukti efektif memutus siklus hidup hama seperti penggerek batang padi dan *Nilaparvata lugens* (Nguyen et al., 2022). Komponen ini menunjukkan bahwa pencegahan merupakan elemen kunci dalam filosofi PHT.

PHT juga mencakup aspek edukasi dan partisipasi petani secara aktif. Keberhasilan implementasi bergantung pada pemahaman petani

terhadap prinsip ekologi OPT dan keterampilan pengambilan keputusan berdasarkan data. Program Sekolah Lapang PHT (*Farmer Field School*) telah menunjukkan hasil signifikan dalam meningkatkan kapasitas petani untuk menerapkan prinsip-prinsip PHT secara mandiri. Evaluasi terhadap program ini di wilayah pertanian hortikultura menunjukkan peningkatan efisiensi penggunaan input dan penurunan intensitas penggunaan pestisida hingga 50% (Widiana et al., 2023). Edukasi menjadi komponen tak terpisahkan dalam membangun ekosistem pertanian yang cerdas dan adaptif.

Penerapan PHT dalam skala nasional menuntut kebijakan yang mendukung, regulasi pestisida yang ketat, serta sistem penyuluhan dan monitoring yang berkelanjutan. Tantangan seperti minimnya akses petani terhadap informasi, keterbatasan sarana monitoring, dan dominasi industri pestisida dalam sistem distribusi pertanian masih menjadi hambatan serius. Oleh karena itu, sinergi antara pemerintah, lembaga riset, sektor swasta, dan petani menjadi fondasi utama untuk membangun sistem pengendalian hama yang holistik dan berkelanjutan (van Lenteren et al., 2020). Dengan demikian, PHT bukan hanya strategi teknis, tetapi juga pendekatan manajemen agroekosistem secara menyeluruh.

F. Rangkuman

Pengendalian Organisme Pengganggu Tumbuhan (OPT) merupakan bagian krusial dalam perlindungan tanaman guna menjaga produktivitas pertanian. Bab ini menguraikan berbagai pendekatan pengendalian OPT, dimulai dari metode fisik dan mekanis yang menekankan pada intervensi langsung tanpa bahan kimia. Pengendalian kimia, meskipun efektif, memiliki dampak ekologis dan kesehatan yang serius jika tidak dikontrol dengan baik. Sebaliknya,

pendekatan hayati menawarkan solusi berkelanjutan dengan memanfaatkan musuh alami hama. Teknologi perangkap dan repelen juga menunjukkan inovasi penting dalam monitoring dan pengendalian berbasis perilaku hama. Seluruh pendekatan ini diintegrasikan dalam konsep Pengendalian Hama Terpadu (PHT) yang menggabungkan berbagai metode dengan prinsip ekologi, efisiensi ekonomi, dan keamanan lingkungan. PHT menekankan pentingnya edukasi, monitoring populasi hama, dan penggunaan teknologi dalam pengambilan keputusan pengendalian yang bijak dan berkelanjutan.

G. Latihan

Soal

1. Jelaskan perbedaan mendasar antara pengendalian fisik dan mekanis terhadap OPT serta contoh aplikasinya di lapangan!
2. Mengapa penggunaan pestisida kimia harus dibatasi dalam sistem pertanian modern? Sertakan dampak ekologis dan kesehatan yang mungkin timbul!
3. Paparkan mekanisme kerja pengendalian hayati dengan memanfaatkan parasitoid dan berikan contohnya!
4. Bagaimana teknologi perangkap dan repelen bekerja dalam pengendalian OPT dan apa kelebihan dari metode ini dibandingkan metode kimia?
5. Jelaskan prinsip dasar Pengendalian Hama Terpadu (PHT) serta bagaimana komponen-komponennya bekerja secara sinergis dalam sistem pertanian!

Jawaban

1. **Pengendalian fisik** melibatkan faktor lingkungan seperti suhu, cahaya, atau hambatan fisik, sedangkan **pengendalian mekanis** menggunakan alat atau tenaga manusia secara langsung, seperti pemangkasan dan penangkapan hama. Contoh pengendalian fisik adalah solarisasi tanah, sedangkan contoh mekanis adalah penggunaan yellow sticky trap untuk serangga vektor.
2. Penggunaan pestisida kimia harus dibatasi karena dapat meninggalkan **residu toksik di tanah dan air**, menyebabkan **kerusakan keanekaragaman hayati**, serta memicu **gangguan kesehatan** seperti neurotoksisitas dan gangguan endokrin pada manusia. Selain itu, penggunaan berlebihan juga mendorong munculnya **resistensi hama**.
3. Parasitoid adalah serangga yang meletakkan telurnya di dalam tubuh inang (hama). Larva parasitoid akan tumbuh dan membunuh inang dari dalam. Contohnya, **Trichogramma spp.** digunakan untuk menekan telur serangga penggerek batang atau ulat grayak.
4. Teknologi perangkap dan repelen bekerja dengan **menarik atau mengusir hama menggunakan feromon, cahaya, atau senyawa volatil**. Kelebihannya antara lain **lebih selektif, tidak mencemari lingkungan, dan tidak membunuh organisme non-target**, berbeda dari pestisida yang bersifat lebih luas dan merusak ekosistem.
5. PHT adalah pendekatan **ekologis dan terpadu** yang menggabungkan metode pengendalian hayati, kimia selektif,

kultur teknis, fisik, dan edukasi petani. PHT bekerja dengan memantau populasi hama, menetapkan ambang ekonomi, serta memilih intervensi yang paling sesuai untuk menekan OPT tanpa merusak lingkungan dan mempertahankan produktivitas tanaman.

BAB VI

PENYAKIT TUMBUHAN YANG DISEBABKAN MIKROORGANISME

Penyakit tumbuhan akibat mikroorganisme menjadi tantangan utama dalam produksi pertanian modern. Mikroorganisme seperti *bakteri*, *jamur*, dan *virus* berperan sebagai agen patogen yang menyebabkan gangguan fisiologis dan morfologis pada tanaman. Dampaknya bisa mencakup penurunan kualitas hasil panen, kerugian ekonomi, dan gangguan ekosistem pertanian.

- **Tujuan Pembelajaran**

- Menjelaskan jenis-jenis patogen mikroorganisme penyebab penyakit pada tanaman, termasuk bakteri, jamur, virus, dan nematoda.
- Menguraikan mekanisme patogenesis dan gejala khas infeksi mikroorganisme pada tanaman.
- Mengidentifikasi vektor utama penyebaran penyakit virus tanaman dan strategi pencegahannya.
- Menganalisis studi kasus penyakit penting pada tanaman pangan secara ilmiah.
- Merancang strategi pengendalian terpadu (integrated disease management) berdasarkan jenis patogen dan kondisi ekosistem.

A. Penyakit Bakteri: Patogenesis dan Gejala

Penyakit tumbuhan yang disebabkan oleh bakteri merupakan salah satu faktor penyebab kerugian besar dalam sektor pertanian. Bakteri patogen seperti *Xanthomonas*, *Pseudomonas*, dan *Erwinia* menyerang jaringan tanaman melalui luka atau stomata dan berkembang dengan cepat dalam kondisi lingkungan lembab. Infeksi bakteri biasanya menyebabkan gejala khas seperti bercak daun, busuk batang, dan nekrosis jaringan. Gejala ini merupakan hasil interaksi kompleks antara faktor virulensi patogen dan respon pertahanan tanaman. Infeksi bakteri umumnya disertai pelepasan enzim hidrolitik yang merusak dinding sel tanaman, memungkinkan penetrasi dan kolonisasi lebih lanjut (Zhang *et al.*, 2021).

Patogenesis pada penyakit bakteri tanaman dimulai dengan fase adhesi dan kolonisasi pada permukaan tumbuhan. Bakteri menggunakan struktur permukaan seperti *pili* dan *flagella* untuk menempel pada inang. Setelah berhasil melekat, patogen melepaskan senyawa seperti eksopolisakarida (EPS) yang berfungsi melindungi koloni dari sistem imun tanaman. EPS juga membantu membentuk biofilm, memperkuat kemampuan bertahan hidup bakteri di lingkungan inang. Beberapa spesies seperti *Ralstonia solanacearum* mengandalkan sistem sekresi tipe III (T3SS) untuk mentransfer protein efektor langsung ke dalam sel tanaman, menekan mekanisme pertahanan inang (Machado & Gadanho, 2023).

Gejala penyakit bakteri sangat bervariasi tergantung jenis patogen dan organ tanaman yang terinfeksi. Gejala umum meliputi bercak air (*water-soaked lesions*), klorosis, dan pembusukan jaringan. Pada beberapa kasus, seperti penyakit *bacterial wilt* pada tomat oleh *Ralstonia*, tanaman menunjukkan gejala layu permanen tanpa adanya

perubahan warna daun. Patogen ini menginfeksi xilem dan menyumbat aliran air, menyebabkan dehidrasi sistemik. Proses patogenesis ini menunjukkan bahwa keberhasilan infeksi bergantung pada kemampuan patogen memanipulasi struktur internal tanaman untuk mendukung perkembangannya (*Moradi et al., 2020*).

Interaksi antara patogen bakteri dan tanaman inang tidak bersifat statis, tetapi dinamis dan dipengaruhi oleh faktor lingkungan. Kelembaban tinggi dan suhu optimal mempercepat multiplikasi bakteri di jaringan inang. Selain itu, tanaman dengan ketahanan genetik rendah akan lebih rentan terhadap kolonisasi patogen. Penelitian terbaru juga menunjukkan bahwa komunitas mikroba endofitik dalam tanaman dapat berperan sebagai pelindung alami terhadap infeksi bakteri, dengan cara berkompetisi terhadap ruang dan nutrisi atau menghasilkan antibiotik (*Liu et al., 2022*).

Faktor virulensi bakteri seperti toksin, enzim pektinase, dan hemiselulase turut mempengaruhi beratnya gejala. Bakteri seperti *Xanthomonas oryzae* yang menyebabkan penyakit hawar daun pada padi, menghasilkan enzim pengurai dinding sel yang mempercepat kerusakan jaringan. Selain itu, beberapa bakteri menghasilkan fitotoksin yang menyebabkan nekrosis dan kematian sel tanaman secara lokal maupun sistemik. Pengetahuan mengenai faktor virulensi ini sangat penting dalam merancang strategi pemuliaan tanaman untuk ketahanan penyakit (*Barua et al., 2021*).

Penggunaan teknik molekuler seperti PCR dan sekuensing gen 16S rRNA sangat membantu dalam identifikasi spesifik patogen bakteri. Diagnostik yang akurat memungkinkan tindakan karantina dan pengendalian dilakukan lebih dini, sebelum penyebaran penyakit meluas. Di sisi lain, metode mikroskopis dan kultur bakteri

konvensional masih relevan digunakan sebagai pendekatan awal terutama di lapangan. Kombinasi antara pendekatan klasik dan molekuler menghasilkan efektivitas tinggi dalam manajemen penyakit bakteri pada tanaman (*Chen et al., 2023*).

Upaya pengendalian penyakit bakteri membutuhkan pendekatan yang holistik, termasuk rotasi tanaman, penggunaan varietas tahan, sanitasi lahan, dan aplikasi agen hayati antagonis. Penggunaan pestisida kimia untuk penyakit bakteri semakin dibatasi mengingat resistensi patogen dan dampak lingkungan. Oleh karena itu, pendekatan biologis berbasis mikroorganisme antagonis seperti *Bacillus subtilis* dan *Pseudomonas fluorescens* menjadi alternatif penting dalam pengendalian yang berkelanjutan (*Patel et al., 2021*). Sinergi antara pemahaman patogenesis dan strategi pengendalian menjadi kunci dalam mitigasi dampak penyakit bakteri terhadap ketahanan pangan global.

B. Jamur Penyebab Penyakit Tanaman

Jamur merupakan salah satu kelompok mikroorganisme utama penyebab penyakit pada tanaman yang berperan besar dalam menurunkan produktivitas pertanian global. Penyakit yang disebabkan oleh jamur atau *fungus diseases* memiliki keunikan tersendiri karena siklus hidup jamur yang kompleks dan struktur reproduksi yang sangat adaptif terhadap lingkungan. Jamur patogen menyerang berbagai bagian tanaman seperti akar, batang, daun, dan buah melalui spora yang tersebar di udara, air, maupun media tanam. Patogen seperti *Fusarium*, *Rhizoctonia*, *Phytophthora*, dan *Colletotrichum* menjadi penyebab umum infeksi pada tanaman pangan, hortikultura, dan tanaman industri (*Gupta et al., 2023*).

Proses patogenesis jamur dimulai saat spora menempel pada permukaan tanaman dan berkecambah membentuk struktur infeksi seperti *appressorium* dan *haustorium*. Struktur ini memungkinkan penetrasi langsung ke jaringan tanaman untuk mengisap nutrisi dan memperbanyak diri. Patogen seperti *Magnaporthe oryzae*, penyebab blast pada padi, memiliki kemampuan untuk menembus kutikula dan dinding sel tanaman menggunakan tekanan turgor tinggi yang dihasilkan oleh *appressorium*. Setelah masuk ke jaringan tanaman, jamur akan membentuk hifa dan berkembang menjadi miselium yang menyebar secara sistemik, menyebabkan kerusakan pada jaringan internal tanaman (Cao et al., 2021).

Gejala penyakit akibat jamur sangat bervariasi, tergantung jenis patogennya dan bagian tanaman yang diserang. Gejala umum meliputi bercak daun, hawar, busuk akar, rebah semai, dan pembusukan buah. *Fusarium oxysporum*, misalnya, menyebabkan penyakit layu fusarium yang ditandai dengan gejala layu permanen, penguningan daun, serta perubahan warna jaringan pembuluh pada batang. Sementara itu, *Alternaria spp.* menyebabkan bercak nekrotik berbentuk lingkaran konsentris pada daun dan buah. Penyakit jamur seringkali sulit dikendalikan karena beberapa spesies memiliki bentuk istirahat seperti *sklerotium* dan *klamidospora* yang tahan terhadap kondisi ekstrem dan bahan kimia (Alemu et al., 2020).

Jamur patogen dapat bersifat nekrotrofik, biotrofik, atau hemibiotrofik. Jamur nekrotrofik seperti *Botrytis cinerea* membunuh jaringan tanaman dengan cepat dan memanfaatkan sel mati sebagai sumber nutrisi. Jamur biotrofik seperti *Puccinia spp.* mempertahankan sel inang tetap hidup selama proses infeksi agar dapat menyerap nutrisi dalam waktu lama. Sedangkan jamur hemibiotrofik seperti *Colletotrichum spp.* menunjukkan fase awal biotrofik dan kemudian

beralih menjadi nekrotrofik. Pola ini memperlihatkan kompleksitas interaksi jamur-tanaman yang memerlukan pendekatan multidisipliner dalam pengendaliannya (Saxena et al., 2022).

Respon pertahanan tanaman terhadap serangan jamur melibatkan mekanisme fisik dan biokimiawi seperti penebalan dinding sel, produksi senyawa antimikroba (*phytoalexins*), serta aktivasi jalur sistemik terinduksi (*systemic acquired resistance*). Namun, jamur patogen juga mengembangkan cara untuk menghindari atau menekan respon ini, misalnya dengan menghasilkan enzim pengurai lignin dan selulosa atau menginjeksi *effector proteins* ke dalam sel tanaman. Oleh karena itu, studi tentang genomik dan transkriptomik patogen jamur menjadi penting untuk memahami gen virulensi dan mekanisme infeksi (Tayal et al., 2023).

Deteksi dini penyakit jamur sangat krusial dalam mencegah penyebaran infeksi. Teknologi seperti qPCR, mikroskop fluoresen, dan sensor berbasis nanoteknologi telah digunakan untuk mendeteksi keberadaan spora jamur di lingkungan atau dalam jaringan tanaman sebelum munculnya gejala. Pendekatan ini sangat penting dalam sistem pertanian presisi yang mengandalkan pengambilan keputusan cepat dan akurat. Selain itu, teknik pemetaan distribusi spora dengan model iklim juga dapat memprediksi risiko infeksi pada wilayah tertentu berdasarkan kelembaban, suhu, dan curah hujan (Kaur et al., 2022).

Strategi pengendalian penyakit jamur meliputi penggunaan fungisida, varietas tanaman tahan, rotasi tanaman, dan agen biokontrol. Fungisida sintetis seperti *triazol* dan *strobilurin* efektif dalam menekan pertumbuhan jamur, tetapi penggunaannya harus hati-hati untuk menghindari resistensi. Agen hayati seperti *Trichoderma*

spp. dan *Bacillus subtilis* terbukti efektif sebagai kompetitor dan produsen enzim penghambat pertumbuhan jamur. Penggunaan varietas tahan, misalnya padi tahan *blast*, menjadi strategi jangka panjang yang sangat diandalkan oleh program pemuliaan tanaman modern (Singh *et al.*, 2023). Integrasi berbagai pendekatan tersebut dalam kerangka *integrated disease management* adalah pilihan strategis dalam menekan kerugian akibat jamur patogen.

C. Infeksi Virus: Vektor dan Pencegahan

Penyakit tanaman akibat infeksi virus merupakan salah satu ancaman serius dalam sistem produksi pertanian modern. Virus tanaman dapat menyebabkan penurunan hasil panen secara signifikan dan seringkali sulit dikendalikan karena tidak memiliki metabolisme sendiri dan hanya dapat berkembang biak di dalam sel inang. Virus seperti *Tobacco mosaic virus* (TMV), *Tomato yellow leaf curl virus* (TYLCV), *Rice tungro virus*, dan *Potato virus Y* telah menjadi patogen penting di banyak negara penghasil pangan utama. Virus tidak menyebar sendiri, melainkan bergantung pada vektor seperti serangga pengisap cairan tumbuhan (misalnya *aphid*, *whitefly*, dan *thrips*), nematoda, bahkan melalui alat pertanian (Akinyemi *et al.*, 2022).

Vektor serangga merupakan media utama penyebaran virus tumbuhan. Beberapa jenis virus bersifat *circulative*, yaitu masuk ke dalam tubuh serangga dan berpindah ke tanaman saat serangga mengisap cairan floem. Jenis lain bersifat *non-persistent*, menempel sementara pada bagian mulut serangga dan berpindah ke tanaman hanya dalam hitungan menit. *Bemisia tabaci* diketahui sebagai vektor utama TYLCV pada tomat, sedangkan *Myzus persicae* sering menyebarkan *Potato virus Y*. Pola interaksi ini sangat kompleks

karena melibatkan sinyal molekuler antara tanaman, virus, dan serangga vektor yang saling beradaptasi dalam proses evolusi (Dietzgen *et al.*, 2020).



Gambar 3 Infeksi Virus: Vektor dan Pencegahan

Virus tumbuhan menyebar sangat cepat di lahan pertanian, terutama jika lingkungan mendukung populasi vektor berkembang pesat. Iklim hangat dan lembab memicu ledakan populasi *whitefly* dan *aphid*, mempercepat penularan virus antar tanaman. Selain itu, praktik monokultur dan penggunaan benih yang tidak bebas virus turut memperparah penyebaran penyakit. Dalam kasus *cassava mosaic disease*, virus menyebar melalui propagasi vegetatif batang singkong yang telah terinfeksi. Oleh karena itu, penting untuk memahami siklus hidup virus dan vektor agar strategi pengendalian dapat diterapkan secara efektif (Kasso *et al.*, 2021).

Gejala infeksi virus pada tanaman cukup khas, seperti mosaik daun, klorosis, keriting daun, pertumbuhan terhambat, dan nekrosis

lokal. Namun, diagnosis gejala sering kali tidak cukup akurat karena gejala tersebut dapat menyerupai stres lingkungan atau infeksi patogen lain. Oleh sebab itu, deteksi berbasis molekuler seperti ELISA, RT-PCR, dan *loop-mediated isothermal amplification* (LAMP) menjadi metode unggulan untuk mengidentifikasi keberadaan virus secara cepat dan akurat. Deteksi dini memberikan peluang intervensi sebelum penyebaran terjadi lebih luas (Liu et al., 2023).

Pencegahan infeksi virus memerlukan strategi terpadu yang meliputi pengendalian vektor, penggunaan benih bebas virus, dan sanitasi lahan. Penggunaan varietas tahan virus yang diperoleh melalui pemuliaan konvensional atau rekayasa genetik menjadi pendekatan jangka panjang. Dalam pengendalian vektor, insektisida sistemik sering digunakan meskipun penggunaannya perlu dikontrol karena risiko resistensi dan dampak ekologi. Pendekatan biologi seperti pelepasan musuh alami vektor atau penggunaan *RNA interference* (RNAi) untuk menargetkan gen penting dalam serangga vektor kini mulai berkembang sebagai alternatif yang lebih ramah lingkungan (Kaur et al., 2023).

Teknik kultur jaringan juga berperan penting dalam menyediakan benih bebas virus melalui eliminasi meristem. Pendekatan ini telah berhasil diterapkan pada tanaman hortikultura seperti kentang, pisang, dan ubi. Di samping itu, pengaturan waktu tanam dan penggunaan tanaman penghalang (*barrier crops*) mampu menekan masuknya vektor ke lahan utama. Rotasi tanaman dan pemberantasan inang alternatif di sekitar area pertanaman menjadi bagian penting dalam manajemen epidemi virus. Kolaborasi antar petani dalam menerapkan pengelolaan berbasis kawasan dapat meningkatkan efektivitas tindakan pencegahan (Ng et al., 2022).

Kebijakan karantina dan regulasi benih yang ketat juga diperlukan untuk membatasi pergerakan virus lintas daerah. Penelitian tentang viromika dan epidemiologi molekuler membuka peluang untuk memahami dinamika virus secara real time dan memprediksi wabah secara lebih akurat. Dengan demikian, integrasi teknologi, pengelolaan agroekosistem, dan edukasi petani menjadi fondasi dalam pengendalian penyakit virus pada tanaman. Pencegahan menjadi kunci utama karena begitu tanaman terinfeksi virus, tidak ada obat yang dapat menyembuhkan infeksi tersebut secara efektif (*Singh et al., 2020*).

D. Nematoda Parasit: Mekanisme Serangan

Nematoda parasit tumbuhan merupakan organisme mikroskopis yang hidup di dalam atau di sekitar akar tanaman dan mampu menyebabkan kerusakan signifikan pada berbagai jenis tanaman pertanian. Keberadaan nematoda sering tidak terdeteksi secara kasat mata, namun dampaknya dapat terlihat dalam bentuk pertumbuhan tanaman yang terhambat, daun menguning, atau pembentukan *gall* (bengkak akar) yang khas. Beberapa spesies penting yang diketahui sangat merusak meliputi *Meloidogyne spp.* (nematoda puru akar), *Heterodera spp.* (nematoda sista), dan *Pratylenchus spp.* (nematoda lesi akar). Kerugian global akibat serangan nematoda ini diperkirakan mencapai miliaran dolar setiap tahun, terutama pada komoditas hortikultura dan tanaman pangan (*Jones et al., 2020*).

Mekanisme serangan nematoda dimulai sejak tahap penemuan dan penetrasi akar inang. Larva infektif tahap kedua (*J2*) dari *Meloidogyne spp.* secara aktif mencari akar muda menggunakan stimulus kimiawi dari eksudat akar. Setelah menembus jaringan epidermis dan korteks, nematoda menetap di dalam jaringan vaskular

dan menginduksi pembentukan sel raksasa atau *giant cells* yang berfungsi sebagai sumber nutrisi. Sel-sel ini terbentuk melalui fusi sel dan proliferasi nukleus, menjadikan akar sebagai tempat makan permanen bagi nematoda betina. Proses ini menyebabkan gangguan fisiologis seperti hambatan penyerapan air dan nutrisi (Ali et al., 2021).

Nematoda *Heterodera* dan *Globodera* memiliki mekanisme serangan yang sedikit berbeda, yaitu dengan membentuk struktur *syncytium* di dalam xilem akar sebagai hasil dari degradasi dinding sel dan fusi protoplasma. Mereka juga membentuk kista yang keras di permukaan akar, berisi telur yang dapat bertahan di tanah selama bertahun-tahun dalam kondisi dorman. Ketahanan ini menjadikan pengendalian nematoda siste sangat sulit dilakukan hanya dengan rotasi tanaman. Selain itu, *Pratylenchus spp.* yang bersifat migratori mampu berpindah antar sel akar, menyebabkan lesi yang menjadi pintu masuk bagi patogen lain seperti jamur dan bakteri (Kyndt et al., 2021).

Peran efektor molekuler sangat penting dalam keberhasilan infeksi nematoda. Efektor ini berupa protein yang disekresikan dari kelenjar esofagus nematoda ke dalam sel tanaman untuk memodifikasi metabolisme inang. Efektor dapat menekan respons pertahanan tanaman atau mengubah ekspresi gen tanaman agar mendukung pembentukan struktur makan nematoda. Misalnya, nematoda puru akar diketahui memiliki gen efektor *MiMsp40* yang mampu menekan ekspresi gen pertahanan tanaman seperti *pathogenesis-related proteins* dan enzim antioksidan. Peran sinyal hormonal seperti *auxin*, *cytokinin*, dan *ethylene* juga dimanipulasi untuk mendukung kolonisasi nematoda (Kranse et al., 2023).

Respons tanaman terhadap serangan nematoda sangat tergantung pada kemampuan genetiknya. Beberapa kultivar tanaman memiliki gen resistensi seperti gen *Mi-1* pada tomat yang mampu mengenali protein efektor nematoda dan mengaktifasi resistensi berbasis *hypersensitive response* (HR), yakni kematian sel terlokalisasi untuk menghentikan penyebaran patogen. Selain itu, peningkatan produksi lignin dan senyawa fenolik juga menjadi bagian dari pertahanan struktural dan kimiawi terhadap penetrasi nematoda. Studi transkriptomik menunjukkan aktivasi gen pertahanan lebih tinggi pada tanaman tahan dibandingkan tanaman rentan (Nguyen et al., 2022).

Deteksi dini dan diagnosis serangan nematoda dilakukan melalui pengamatan gejala di lapangan serta analisis laboratorium terhadap akar dan tanah. Teknik identifikasi molekuler seperti PCR dengan primer spesifik, serta mikroskop elektron untuk mengamati morfologi struktur mulut dan sistem reproduksi, sangat membantu dalam menentukan spesies nematoda. Selain itu, pendekatan *metagenomik* memungkinkan pengamatan keragaman komunitas nematoda tanah secara keseluruhan, termasuk spesies non-kultur yang sebelumnya sulit dideteksi dengan metode konvensional (Faghihi et al., 2020).

Pengendalian nematoda parasit tidak dapat mengandalkan satu metode tunggal. Rotasi tanaman dengan jenis non-inang, penggunaan varietas tahan, serta aplikasi agen hayati seperti *Purpureocillium lilacinum*, *Pochonia chlamydosporia*, dan *Bacillus firmus* terbukti efektif menekan populasi nematoda di tanah. Penggunaan nematisida kimia seperti *fluopyram* dan *oxamyl* masih dilakukan dalam budidaya intensif, namun dibatasi karena potensi toksisitas lingkungan. Oleh karena itu, pendekatan pengendalian terpadu (*integrated nematode management*) menjadi kunci utama dalam menekan kerusakan akibat nematoda parasit secara berkelanjutan (Verdejo-Lucas et al., 2023).

E. Studi Kasus: Penyakit Penting di Tanaman Pangan

Tanaman pangan seperti padi, jagung, gandum, kentang, dan ubi jalar memiliki peran vital dalam ketahanan pangan global. Namun, produktivitasnya sangat rentan terhadap gangguan penyakit yang disebabkan oleh patogen utama seperti jamur, bakteri, virus, dan nematoda. Penyakit-penyakit ini tidak hanya menurunkan hasil panen secara kuantitatif, tetapi juga secara kualitatif, sehingga berdampak langsung terhadap pendapatan petani dan stabilitas ekonomi pertanian. Studi kasus terhadap penyakit penting pada tanaman pangan menjadi penting untuk memahami dinamika patogen, kerentanan varietas, serta efektivitas strategi pengendalian dalam skala lapangan (*Savary et al., 2020*).

Salah satu penyakit paling merusak pada tanaman padi adalah *blast* yang disebabkan oleh *Magnaporthe oryzae*. Penyakit ini menyerang semua bagian tanaman, termasuk daun, batang, leher malai, dan gabah, dan dapat menyebabkan kehilangan hasil hingga 80% pada kondisi epidemik. Studi di wilayah Asia Tenggara menunjukkan bahwa kelembapan tinggi dan pemupukan nitrogen berlebih memperburuk insidensi *blast*. Pemanfaatan varietas tahan seperti *IR64*, disertai dengan pengendalian hayati berbasis *Trichoderma spp.* dan aplikasi fungisida sistemik seperti *tricyclazole*, terbukti efektif dalam mengelola penyakit ini (*Miah et al., 2021*).

Jagung juga menjadi sasaran penyakit penting seperti *bulai* (*downy mildew*) yang disebabkan oleh *Peronosclerospora maydis*. Di Indonesia, penyakit ini menjadi faktor utama penurunan produktivitas jagung hibrida, terutama pada musim hujan. Studi kasus di Jawa Tengah menunjukkan bahwa penyakit ini menyebar dengan cepat melalui benih yang terinfeksi dan percikan air hujan. Strategi

pengendalian efektif melibatkan kombinasi penggunaan benih sehat, fungisida sistemik seperti *metalaxyl*, dan waktu tanam yang tepat untuk menghindari kondisi lingkungan yang mendukung patogen (Nurhidayat et al., 2022).

Pada kentang, penyakit *busuk daun* atau *late blight* yang disebabkan oleh *Phytophthora infestans* merupakan momok bagi petani di dataran tinggi tropis. Studi di wilayah Sumatera Barat mencatat bahwa penyakit ini menyebabkan kerugian hasil hingga 70% jika tidak ditangani secara tepat. Kondisi kabut dan curah hujan tinggi mempercepat penyebaran spora patogen ini. Pendekatan pengendalian terintegrasi yang mencakup penggunaan varietas tahan seperti *Granola Kembang*, rotasi tanaman, serta aplikasi fungisida preventif seperti *mancozeb* sangat penting dalam menghambat siklus penyakit (Simatupang et al., 2023).

Sementara itu, penyakit *mosaik singkong* (*cassava mosaic disease*) yang disebabkan oleh *cassava mosaic virus* dan ditularkan oleh *Bemisia tabaci* menjadi isu besar di Afrika dan mulai muncul di Asia. Studi kasus dari Uganda menunjukkan bahwa penyebaran penyakit ini sangat cepat terutama melalui bahan tanam vegetatif yang terinfeksi. Pendekatan pengendalian yang paling efektif adalah penggunaan klon singkong tahan seperti *TME 204*, eliminasi tanaman sakit, serta pengelolaan vektor melalui insektisida nabati. Penelitian terbaru juga menekankan pentingnya pemantauan virologis berbasis RT-PCR untuk deteksi awal penyebaran penyakit (Legg et al., 2020).

Gandum, yang merupakan tanaman pangan utama dunia, sangat rentan terhadap penyakit *karat batang* (*stem rust*) yang disebabkan oleh *Puccinia graminis f. sp. tritici*, khususnya ras virulen *UG99*. Studi di kawasan Afrika Timur menunjukkan bahwa ras ini mampu

mengatasi gen resistensi yang sebelumnya efektif, sehingga menyebabkan epidemi regional. Penanggulangan UG99 membutuhkan kerjasama lintas negara dalam pengembangan varietas tahan seperti *Sr2* dan strategi monitoring berbasis sistem peringatan dini. Penyebaran penyakit ini juga menjadi contoh pentingnya biosekuriti dalam sistem pangan global (*Singh et al., 2021*).

Studi kasus lainnya adalah serangan *wilt bakteri* pada tomat dan cabai yang disebabkan oleh *Ralstonia solanacearum*. Di dataran rendah tropis Indonesia, penyakit ini menjadi ancaman serius terutama pada musim kemarau saat irigasi permukaan meningkatkan penyebaran patogen di tanah. Pendekatan pengendalian melibatkan penggunaan tanaman penutup tanah seperti *tagetes*, aplikasi agens hayati seperti *Bacillus subtilis*, serta pemanfaatan varietas tahan seperti *TSS-4*. Intervensi berbasis agroekosistem terbukti menurunkan intensitas penyakit hingga 60% dalam satu musim tanam (*Yanti et al., 2023*).

Studi kasus penyakit penting pada tanaman pangan menunjukkan bahwa tidak ada pendekatan tunggal yang dapat mengatasi seluruh tantangan penyakit. Setiap patogen memiliki karakteristik biologis dan ekologis yang unik, sehingga strategi pengendalian harus berbasis diagnosis akurat, pemahaman epidemiologi lokal, dan partisipasi petani. Integrasi pendekatan teknis, sosial, dan kebijakan menjadi kunci dalam membangun sistem pertanian yang lebih tahan terhadap serangan penyakit dan mendukung ketahanan pangan berkelanjutan.

F. Rangkuman

Bab ini membahas penyakit tumbuhan yang disebabkan oleh mikroorganisme utama: bakteri, jamur, virus, dan nematoda. Bakteri

seperti *Xanthomonas* dan *Ralstonia* menyerang melalui luka dan mengeluarkan enzim yang merusak jaringan tanaman, menghasilkan gejala bercak, busuk, dan layu. Jamur seperti *Fusarium*, *Phytophthora*, dan *Colletotrichum* menyerang melalui spora dan struktur infeksi seperti haustorium, menyebabkan bercak, rebah semai, dan pembusukan. Virus tanaman tidak dapat hidup sendiri dan membutuhkan vektor seperti *aphid* dan *whitefly* untuk berpindah, menyebabkan mosaik daun, klorosis, dan keriting. Sementara itu, nematoda parasit menyerang akar dan memodifikasi jaringan untuk membentuk sel makan permanen yang merugikan fisiologi tanaman. Studi kasus yang dibahas mencakup penyakit blast pada padi, bulai pada jagung, busuk daun kentang, hingga karat batang gandum dan mosaik singkong. Strategi pengendalian melibatkan kombinasi pendekatan biologis, teknis, dan molekuler untuk manajemen penyakit berkelanjutan.

G. Latihan

Soal

1. Jelaskan mekanisme infeksi bakteri tanaman dan sebutkan dua contoh patogen beserta gejala khasnya.
2. Bagaimana proses patogenesis jamur seperti *Magnaporthe oryzae* terjadi pada tanaman inang?
3. Apa peran vektor serangga dalam penyebaran penyakit virus pada tanaman? Jelaskan contoh spesifiknya.
4. Uraikan perbedaan strategi serangan antara *Meloidogyne spp.* dan *Pratylenchus spp.* sebagai nematoda patogen tanaman.

5. Analisis strategi pengendalian penyakit blast pada padi berdasarkan studi kasus yang ada.

Jawaban

1. Infeksi bakteri tanaman dimulai dari adhesi ke permukaan inang melalui struktur seperti pili dan flagela. Bakteri kemudian melepaskan enzim hidrolitik dan eksopolisakarida (EPS) untuk membentuk biofilm dan melindungi diri. Patogen seperti *Xanthomonas oryzae* menyebabkan hawar daun dengan gejala bercak coklat memanjang, sementara *Ralstonia solanacearum* menyebabkan layu bakteri tanpa perubahan warna daun.
2. *Magnaporthe oryzae* menghasilkan spora yang menempel di permukaan daun padi dan membentuk appressorium. Struktur ini menghasilkan tekanan turgor tinggi untuk menembus kutikula dan dinding sel. Setelah masuk, jamur membentuk miselium yang menyebar ke jaringan lain, menyebabkan gejala blast berupa bercak abu-abu kehitaman pada daun dan batang.
3. Vektor serangga membantu virus tanaman berpindah dari satu inang ke inang lain. Misalnya, *Bemisia tabaci* adalah vektor utama *Tomato yellow leaf curl virus* (TYLCV) dan *Myzus persicae* menyebarkan *Potato virus Y*. Penyebaran bisa circulative (dalam tubuh serangga) atau non-persistent (melekat di alat mulut).
4. *Meloidogyne spp.* bersifat sedentary endoparasit yang menetap dan membentuk sel raksasa pada akar tanaman. Sedangkan *Pratylenchus spp.* bersifat migratori, berpindah antar sel dan menyebabkan lesi akar. *Meloidogyne* merusak jaringan

vaskular, sementara *Pratylenchus* membuka jalan bagi patogen sekunder.

5. Pengendalian blast padi meliputi penggunaan varietas tahan seperti IR64, aplikasi fungisida seperti tricyclazole, dan penggunaan agens hayati seperti *Trichoderma spp.*. Kondisi lingkungan seperti kelembapan tinggi dan pemupukan nitrogen berlebih memperburuk penyakit, sehingga pengelolaan lingkungan juga krusial.

BAB VII

PENYAKIT NON-INFEKSI: FAKTOR ABIOTIK

Penyakit non-infeksi pada tanaman seringkali diabaikan karena tidak disebabkan oleh organisme patogen, padahal dampaknya terhadap produktivitas sangat signifikan. Salah satu penyebab utama adalah faktor abiotik, yakni kondisi lingkungan yang tidak optimal, termasuk defisiensi atau kelebihan unsur hara. Malnutrisi unsur hara menyebabkan gangguan fisiologis yang menurunkan ketahanan dan hasil panen tanaman.

- **Tujuan Pembelajaran**

- Menjelaskan konsep penyakit non-infeksi dan faktor abiotik yang menyebabkannya.
- Mengidentifikasi gejala fisiologis dan morfologis tanaman akibat malnutrisi unsur hara.
- Menganalisis dampak stres lingkungan terhadap metabolisme dan pertumbuhan tanaman.
- Menjelaskan interaksi tanaman dengan berbagai kondisi lingkungan abiotik secara fisiologis dan adaptif.
- Menguraikan strategi pencegahan dan koreksi terhadap gangguan abiotik pada tanaman.

A. Malnutrisi Unsur Hara

Keseimbangan unsur hara merupakan kunci bagi pertumbuhan dan perkembangan tanaman yang optimal. Ketika tanaman mengalami kekurangan atau kelebihan unsur hara, proses metabolisme terganggu sehingga menimbulkan gejala penyakit non-infeksi. *Malnutrisi* unsur hara dapat dibedakan menjadi dua kategori besar, yaitu defisiensi (kekurangan) dan toksisitas (kelebihan). Unsur hara makro seperti nitrogen (N), fosfor (P), dan kalium (K), serta unsur hara mikro seperti seng (Zn), besi (Fe), dan mangan (Mn), memiliki peran spesifik dalam mendukung fungsi fisiologis tanaman. Ketidakseimbangan dalam penyediaannya berdampak langsung pada penurunan produktivitas dan kualitas hasil tanaman (He et al., 2020).

Defisiensi nitrogen sering ditemukan di berbagai sistem pertanian dan ditandai oleh klorosis atau menguningnya daun tua, karena nitrogen bersifat *mobile* dalam jaringan tanaman. Nitrogen dibutuhkan untuk sintesis protein, asam nukleat, dan klorofil. Ketika pasokan nitrogen terbatas, proses fotosintesis terganggu dan pertumbuhan vegetatif terhambat. Sebaliknya, kelebihan nitrogen menyebabkan tanaman menjadi rentan terhadap serangan patogen karena jaringan tanaman menjadi lunak dan berair (Zhang et al., 2021). Oleh karena itu, pengelolaan nitrogen memerlukan pendekatan berbasis keseimbangan dan kebutuhan aktual tanaman.

Fosfor merupakan unsur yang penting dalam proses pembentukan energi (ATP), pembelahan sel, dan perkembangan akar. Defisiensi fosfor biasanya ditunjukkan dengan warna daun yang menjadi keunguan akibat akumulasi *anthocyanin*, serta sistem perakaran yang pendek dan tidak bercabang. Tanaman dengan kekurangan fosfor memiliki kapasitas penyerapan air dan hara lain yang rendah, sehingga

lebih rentan terhadap cekaman lingkungan. Sementara itu, toksisitas fosfor dapat mengganggu penyerapan unsur mikro seperti besi dan seng, mengakibatkan defisiensi sekunder (*Alsharif et al., 2022*).

Kalium berperan dalam regulasi tekanan osmotik, pembukaan dan penutupan stomata, serta transpor gula. Defisiensi kalium ditandai oleh nekrosis pada tepi daun, terutama pada daun tua. Kekurangan kalium menyebabkan penurunan efisiensi penggunaan air dan akumulasi senyawa toksik dalam jaringan tanaman. Kalium juga diketahui meningkatkan ketahanan tanaman terhadap stres biotik dan abiotik. Oleh karena itu, ketersediaan kalium yang cukup sangat penting dalam meningkatkan performa tanaman, terutama dalam kondisi lingkungan yang tidak stabil (*Chen et al., 2023*).

Unsur mikro seperti seng, mangan, dan boron juga berperan vital, meskipun dibutuhkan dalam jumlah kecil. Defisiensi seng dapat menyebabkan *rosetting* atau pengerdilan pada tanaman, sedangkan kekurangan mangan mengganggu fotosintesis karena menghambat aktivitas enzim *photosystem II*. Boron penting untuk pembentukan dinding sel dan perkembangan bunga, sehingga kekurangannya dapat menyebabkan abortus bunga dan buah. Ketidakseimbangan unsur mikro ini sering terjadi di tanah dengan pH ekstrem atau sistem pertanian intensif tanpa rotasi tanaman (*Huang et al., 2020*).

Malnutrisi unsur hara tidak hanya berdampak fisiologis tetapi juga memperlemah sistem pertahanan tanaman terhadap penyakit. Tanaman yang kekurangan hara memiliki ketebalan dinding sel lebih tipis, produksi metabolit sekunder berkurang, dan aktivitas enzim antioksidan menurun. Semua faktor ini membuat tanaman lebih mudah terserang oleh patogen dan stres lingkungan seperti kekeringan atau suhu ekstrem. Dengan demikian, pengelolaan hara tidak hanya

penting untuk pertumbuhan optimal, tetapi juga sebagai bentuk perlindungan tanaman secara preventif (*Khan et al., 2021*).

Strategi pencegahan malnutrisi unsur hara melibatkan pemupukan berimbang, analisis tanah dan jaringan tanaman secara rutin, serta penggunaan pupuk berbasis teknologi nano dan pelepasan lambat. Sistem pemupukan presisi berbasis sensor dan *remote sensing* semakin dikembangkan untuk menyesuaikan dosis pemupukan dengan kebutuhan spesifik tanaman di suatu lahan. Penerapan prinsip 4R (Right Source, Right Rate, Right Time, Right Place) menjadi pendekatan modern dalam manajemen hara yang efisien dan berkelanjutan (*Ghosh et al., 2023*). Pemahaman menyeluruh terhadap malnutrisi unsur hara menjadi kunci keberhasilan dalam sistem pertanian modern yang produktif dan ramah lingkungan.

B. Stres Lingkungan dan Gejala Fisiologis

Tanaman sebagai organisme autotrof tidak dapat berpindah untuk menghindari kondisi lingkungan yang merugikan. Akibatnya, stres lingkungan yang bersifat abiotik seperti kekeringan, suhu ekstrem, salinitas, dan pencemaran logam berat dapat menyebabkan gangguan fisiologis serius. Respons tanaman terhadap stres ini mencakup perubahan pada tingkat seluler, metabolisme, hingga morfologi. Stres lingkungan dapat menurunkan kemampuan tanaman dalam melakukan fotosintesis, menghambat pertumbuhan akar dan daun, serta meningkatkan produksi senyawa toksik. Oleh karena itu, mengenali gejala fisiologis akibat stres abiotik menjadi dasar penting dalam pengelolaan kesehatan tanaman (*Cramer et al., 2021*).

Salah satu bentuk stres abiotik yang paling umum adalah kekeringan. Ketika tanaman mengalami defisit air, stomata akan

menutup untuk mengurangi kehilangan air melalui transpirasi. Penutupan stomata ini menyebabkan berkurangnya difusi karbon dioksida ke dalam daun sehingga menghambat laju fotosintesis. Dampaknya terlihat pada penurunan pertumbuhan vegetatif dan produktivitas. Tanaman juga merespon dengan meningkatkan akumulasi *osmoprotectant* seperti *prolin* dan *sorbitol* untuk mempertahankan tekanan turgor sel (Abid et al., 2020). Selain itu, sistem akar akan berubah morfologinya menjadi lebih panjang dan bercabang untuk mencari sumber air yang lebih dalam.

Suhu tinggi atau *heat stress* memicu kerusakan protein dan membran sel akibat peningkatan produksi *reactive oxygen species* (ROS). Akumulasi ROS dapat menyebabkan denaturasi protein, peroksidasi lipid, dan kematian sel. Gejala fisiologisnya antara lain penggulungan daun, pengeringan jaringan tepi daun, dan kehilangan klorofil (*chlorosis*). Untuk bertahan, tanaman mengaktifkan mekanisme pertahanan seperti peningkatan enzim antioksidan (superoksida dismutase, katalase) serta *heat shock proteins* (HSP) yang membantu stabilisasi protein (Zandalinas et al., 2021).

Stres salinitas terjadi ketika konsentrasi garam di tanah meningkat, menyebabkan gangguan osmotik dan ketidakseimbangan ionik dalam jaringan tanaman. Na^+ dan Cl^- dalam jumlah tinggi bersifat toksik bagi sel tanaman, mengganggu pengangkutan unsur hara penting seperti K^+ dan Ca^{2+} . Gejala visual dari stres salinitas meliputi nekrosis ujung daun, pertumbuhan terhambat, dan klorosis. Tanaman yang toleran terhadap garam biasanya memiliki kemampuan eksklusi ion atau mengakumulasi ion ke dalam vakuola untuk detoksifikasi (Roy et al., 2021). Adaptasi fisiologis juga meliputi peningkatan sintesis *compatible solutes* dan aktivasi pompa ionik plasma membran.

Pencemaran logam berat seperti kadmium (Cd), timbal (Pb), dan merkuri (Hg) menimbulkan stres oksidatif tinggi dalam tanaman. Logam berat mengganggu aktivitas enzim, merusak struktur kloroplas, serta menghambat sintesis protein dan asam nukleat. Akumulasi logam dalam jaringan menginduksi kematian sel secara lokal (nekrosis) dan penurunan total biomassa. Salah satu respon fisiologis adaptif tanaman adalah biosintesis *phytochelat*in dan *metallothionein*, dua jenis protein pengikat logam yang membantu detoksifikasi dan sequestrasi di dalam vakuola (Choudhury *et al.*, 2022).

Gejala fisiologis akibat stres lingkungan tidak hanya bersifat sementara tetapi dapat memicu efek transgeneratif, di mana keturunan tanaman yang terpapar stres menunjukkan ekspresi gen berbeda sebagai bentuk *stress memory*. Tanaman membentuk adaptasi epigenetik melalui metilasi DNA dan modifikasi histon untuk meningkatkan ketahanan terhadap cekaman di masa mendatang. Perubahan fisiologis seperti penebalan kutikula, peningkatan densitas trikoma, dan akumulasi pigmen pelindung menjadi manifestasi nyata dari strategi adaptif ini (Lämke & Bäurle, 2017).

Manajemen stres lingkungan pada tanaman dapat dilakukan melalui pendekatan agronomis seperti pengelolaan irigasi yang efisien, penggunaan varietas toleran stres, serta penerapan pupuk hayati dan *biostimulant*. Penggunaan agen hayati seperti *mycorrhizae* dan *plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR)* terbukti mampu meningkatkan toleransi tanaman terhadap cekaman abiotik dengan memperbaiki serapan air dan hara, serta meningkatkan ekspresi gen-gen pertahanan (Backer *et al.*, 2018). Inovasi bioteknologi tanaman yang memanfaatkan teknik *CRISPR/Cas9* juga tengah dikembangkan untuk menghasilkan tanaman dengan ekspresi gen stres yang disesuaikan secara presisi.

C. Interaksi Tanaman dengan Kondisi Lingkungan

Tanaman tumbuh dalam lingkungan yang kompleks dan senantiasa berubah, sehingga kemampuannya untuk merespons berbagai kondisi abiotik menjadi faktor kunci dalam produktivitas dan kelangsungan hidupnya. Interaksi antara tanaman dan lingkungan mencakup pengaruh faktor-faktor seperti cahaya, suhu, air, udara, dan unsur hara terhadap proses fisiologis, morfologis, serta molekuler tanaman. Keberhasilan adaptasi tanaman terhadap lingkungan tidak hanya tergantung pada genetik, tetapi juga pada kapasitas epigenetik serta kemampuan menyesuaikan metabolisme dan struktur jaringan tanaman terhadap perubahan eksternal (*Zhu et al., 2020*). Interaksi ini bersifat dinamis dan dapat berbeda tergantung pada spesies, usia tanaman, dan sejarah cekaman yang dialami.

Faktor cahaya menjadi salah satu elemen lingkungan terpenting yang mempengaruhi pertumbuhan tanaman. Selain sebagai sumber energi untuk fotosintesis, cahaya juga berfungsi sebagai sinyal pengatur ritme sirkadian, fototropisme, dan pembungaan. Tumbuhan mengandalkan fotoreseptor seperti *phytochrome* dan *cryptochrome* untuk mendeteksi kualitas, intensitas, dan durasi cahaya, yang kemudian mengatur ekspresi gen secara sistemik. Ketidaksesuaian intensitas cahaya—baik terlalu rendah maupun terlalu tinggi—dapat menyebabkan gejala seperti etiolasi, fotooksidasi, dan stres cahaya (*Wang et al., 2022*).

Suhu lingkungan juga memainkan peran penting dalam regulasi fisiologis tanaman. Proses seperti germinasi, respirasi, dan pematangan buah sangat sensitif terhadap fluktuasi suhu. Ketika suhu berada di luar ambang optimal, enzim-enzim metabolik kehilangan aktivitasnya, membran sel menjadi tidak stabil, dan produksi *reactive*

oxygen species meningkat. Tumbuhan memiliki mekanisme termotoleransi yang kompleks, salah satunya melalui ekspresi protein pelindung seperti *heat shock proteins (HSP)* yang membantu menjaga struktur protein tetap stabil (*Ohama et al., 2017*). Adaptasi termal ini sangat penting bagi tanaman di wilayah tropis dan subtropis yang mengalami gelombang panas secara periodik.

Kelembaban tanah dan udara berpengaruh terhadap proses transpirasi dan penyerapan air oleh tanaman. Interaksi antara kelembaban dengan sistem akar menentukan efisiensi penggunaan air (*water use efficiency*) yang krusial di ekosistem kering. Tumbuhan mengatur pembukaan dan penutupan stomata sebagai respon terhadap tekanan air dan sinyal hormonal seperti asam absisat (ABA). Dalam kondisi kelembaban rendah, stomata menutup untuk mengurangi kehilangan air, tetapi hal ini juga membatasi pemasukan karbon dioksida yang dibutuhkan untuk fotosintesis. Efek domino ini menurunkan pertumbuhan tanaman dan mengganggu akumulasi biomassa (*Gupta et al., 2020*).

Salah satu bentuk interaksi tanaman dengan lingkungan yang sangat penting adalah respon terhadap salinitas dan kondisi pH tanah. Tanah dengan salinitas tinggi atau pH ekstrem mengganggu ketersediaan dan serapan unsur hara, menyebabkan gangguan metabolisme, dan merusak struktur akar. Tanaman merespons kondisi tersebut dengan menyesuaikan aktivitas pompa ion, menghasilkan osmolit seperti betain, dan memperkuat dinding sel untuk mempertahankan struktur jaringan. Adaptasi terhadap salinitas dan pH rendah atau tinggi menjadi indikator ketahanan fisiologis tanaman terhadap tekanan lingkungan (*Munns et al., 2020*).

Udara sebagai media lingkungan juga memengaruhi tanaman, baik dari sisi komposisi gas maupun polutan yang terkandung di dalamnya. Konsentrasi karbon dioksida yang meningkat dapat meningkatkan laju fotosintesis, namun hanya pada tanaman yang memiliki respons fisiologis optimal dan cukup ketersediaan hara. Sebaliknya, polutan seperti ozon dan sulfur dioksida menyebabkan kerusakan sel daun, penurunan klorofil, dan kematian jaringan tanaman. Beberapa spesies menunjukkan kemampuan untuk memproduksi antioksidan dan senyawa fenolik sebagai pertahanan terhadap stres atmosfer (*Singh et al., 2022*).

Selain respons terhadap faktor lingkungan secara langsung, tanaman juga membentuk interaksi ekologis yang kompleks dengan mikroorganisme tanah sebagai bagian dari adaptasi. Rhizosfer tanaman merupakan pusat aktivitas biokimia yang dipengaruhi oleh sekresi akar (eksudat), ketersediaan air, dan tipe tanah. Interaksi mutualistik dengan mikoriza dan bakteri pemacu pertumbuhan tanaman (PGPR) meningkatkan kemampuan adaptasi terhadap kekeringan, salinitas, dan patogen. Kehadiran mikrobioma tanah yang sehat terbukti meningkatkan ketahanan lingkungan dan memperkuat imunitas tanaman secara sistemik (*Trivedi et al., 2020*).

Pemahaman mendalam tentang interaksi tanaman dan lingkungan sangat penting dalam pengembangan sistem pertanian presisi dan adaptif. Strategi pertanian modern yang memanfaatkan data iklim, sensor tanah, dan analisis genomik tanaman memungkinkan deteksi dini terhadap stres lingkungan dan penyesuaian input secara real-time. Melalui pendekatan ini, efisiensi penggunaan sumber daya dapat ditingkatkan, sementara kerentanan terhadap gangguan lingkungan dapat ditekan. Inovasi berbasis teknologi ini mengarahkan pertanian masa depan menuju sistem yang lebih tangguh dan berkelanjutan.

D. Pencegahan dan Koreksi Kondisi Tanaman

Pencegahan dan koreksi kondisi tanaman akibat faktor abiotik merupakan langkah penting dalam menjaga produktivitas dan keberlanjutan sistem pertanian. Gangguan fisiologis seperti malnutrisi unsur hara, stres kekeringan, salinitas, suhu ekstrem, hingga pencemaran logam berat dapat diminimalkan melalui strategi manajemen terpadu berbasis ilmu fisiologi tanaman, teknologi pemantauan, dan pendekatan ekologis. Strategi ini tidak hanya bersifat reaktif tetapi juga preventif, dimulai dari identifikasi potensi cekaman, pemantauan gejala awal, hingga penerapan teknologi dan input yang adaptif. Efektivitas koreksi sangat ditentukan oleh waktu intervensi dan pendekatan yang spesifik terhadap jenis stres yang dialami tanaman (*Raza et al., 2021*).

Salah satu metode pencegahan yang paling fundamental adalah pemupukan berimbang berbasis analisis tanah dan jaringan tanaman. Ketersediaan unsur hara yang sesuai dengan kebutuhan spesifik tanaman mampu meningkatkan toleransi terhadap stres dan mengoptimalkan fungsi fisiologis. Pemupukan yang tidak tepat tidak hanya menyebabkan defisiensi atau toksisitas tetapi juga memperburuk stres abiotik lainnya. Penggunaan pupuk slow-release dan *nano fertilizer* terbukti meningkatkan efisiensi serapan hara dan mengurangi pencucian ke lingkungan, serta meningkatkan kapasitas adaptif tanaman terhadap tekanan lingkungan (*El-Naggar et al., 2020*).

Koreksi kondisi tanaman yang mengalami kekurangan air atau kekeringan dilakukan melalui optimalisasi irigasi berdasarkan prinsip irigasi presisi. Sistem irigasi tetes berbasis sensor kelembaban tanah memungkinkan penyediaan air sesuai kebutuhan aktual tanaman,

meminimalkan pemborosan air dan stres hidrik. Selain itu, aplikasi bahan amelioran tanah seperti biochar atau hidrogel membantu meningkatkan kapasitas menahan air dalam tanah, memperbaiki struktur tanah, dan memperpanjang periode kelembaban tersedia. Koreksi ini semakin efektif bila dikombinasikan dengan penanaman varietas toleran kekeringan yang memiliki sistem akar dalam dan efisien dalam penggunaan air (Kader *et al.*, 2021).

Untuk menghadapi stres salinitas, strategi koreksi meliputi pencucian garam dengan irigasi berlebih, penggunaan bahan organik, serta penambahan gypsum untuk menggantikan ion Na^+ dengan Ca^{2+} pada kompleks koloid tanah. Selain itu, aplikasi asam humat dan mikroba tanah seperti *halotolerant plant growth-promoting rhizobacteria* terbukti memperbaiki pertumbuhan tanaman di lahan salin melalui peningkatan keseimbangan ionik dan penguatan metabolisme antioksidan tanaman. Pencegahan melalui rotasi tanaman dan pemilihan kultivar toleran salinitas juga menjadi bagian integral dari manajemen lahan marginal (Shabala, 2021).

Tindakan korektif terhadap stres suhu ekstrem mencakup penyediaan pelindung tanaman (shading), aplikasi *kaolin spray* untuk menurunkan suhu daun, serta pemanfaatan senyawa pelindung sel seperti asam salisilat atau glisin betain. Senyawa ini berfungsi sebagai *osmoprotectant* dan pemicu ekspresi gen toleran suhu tinggi. Tanaman yang mengalami gejala termal berat seperti nekrosis atau *leaf scorching* dapat direhabilitasi dengan perawatan intensif pada bagian akar dan penyemprotan hormon pertumbuhan daun. Pencegahan yang efektif juga dapat dilakukan melalui pengaturan waktu tanam yang sinkron dengan siklus iklim lokal (Zhao *et al.*, 2022).

Untuk mencegah dan mengoreksi keracunan logam berat, diperlukan pendekatan bioremediasi dan fitoremediasi. Tanaman hiperakumulator seperti *Brassica juncea* dan *Helianthus annuus* mampu menyerap dan mengakumulasi logam berat dari tanah, kemudian dikendalikan melalui panen selektif biomassa. Di sisi lain, aplikasi mikroorganisme pelarut logam dan senyawa kelat (chelating agents) seperti EDTA atau asam sitrat dapat meningkatkan mobilitas logam untuk penyerapan atau perlindungan akar. Pencegahan dilakukan dengan pengujian kualitas tanah sebelum tanam, serta penggunaan sumber air dan input bebas kontaminasi (Ali et al., 2020).

Integrasi teknologi digital dalam pemantauan kesehatan tanaman juga menjadi bagian penting dalam strategi pencegahan dan koreksi. Penggunaan *remote sensing*, drone, dan sistem berbasis Internet of Things (IoT) memungkinkan deteksi dini terhadap perubahan warna daun, kelembaban, dan temperatur tanaman, sehingga tindakan koreksi dapat dilakukan secara presisi. Teknologi ini dikombinasikan dengan *decision support system (DSS)* berbasis kecerdasan buatan untuk merekomendasikan intervensi yang tepat dan cepat sesuai kondisi lahan dan komoditas tanaman. Sistem ini semakin mendukung sistem pertanian yang tangguh, efisien, dan adaptif terhadap perubahan iklim (Jha et al., 2019).

Pencegahan dan koreksi kondisi tanaman bukan hanya berbasis teknologi, tetapi juga membutuhkan perubahan perilaku petani melalui edukasi dan pelatihan berkelanjutan. Transfer pengetahuan mengenai pengamatan gejala awal stres, pemilihan varietas unggul, serta penggunaan input pertanian ramah lingkungan sangat penting untuk meningkatkan kesadaran dan kemandirian petani dalam mengelola risiko abiotik. Pendekatan partisipatif dan kolaboratif antara peneliti,

penyuluh, dan petani diperlukan untuk membangun sistem produksi pertanian yang adaptif dan berkelanjutan.

E. Teknik Deteksi Awal Gangguan Non-infeksi

Deteksi dini terhadap gangguan non-infeksi pada tanaman menjadi aspek krusial dalam sistem manajemen pertanian modern, karena memungkinkan intervensi cepat sebelum kerusakan meluas. Gangguan non-infeksi, seperti defisiensi unsur hara, stres kekeringan, salinitas, dan pencemaran logam berat, umumnya berkembang perlahan dan tidak disebabkan oleh patogen, sehingga gejalanya sering tidak disadari sampai tahap lanjut. Oleh sebab itu, diperlukan pendekatan teknis yang presisi dan sistematis untuk mengenali tanda-tanda fisiologis maupun biofisik tanaman. Teknik deteksi awal berbasis teknologi, analisis visual, dan molekuler menjadi fondasi dalam pengelolaan pertanian berkelanjutan yang tanggap terhadap cekaman lingkungan (*Mahlein, 2021*).

Salah satu metode utama dalam deteksi awal adalah pengamatan gejala visual secara sistematis, yang masih menjadi pendekatan konvensional namun sangat informatif. Gejala-gejala seperti klorosis, nekrosis, penggulung daun, serta perubahan morfologi akar dan batang merupakan indikator awal dari gangguan fisiologis. Misalnya, daun yang menguning dari ujung dan bergerak ke arah tangkai sering menunjukkan defisiensi nitrogen, sedangkan tepi daun yang mengering bisa mengindikasikan kekurangan kalium atau dampak salinitas. Meskipun teknik ini cukup umum, keterbatasannya terletak pada subjektivitas pengamatan dan ketergantungan pada pengalaman individu (*Rahimi et al., 2022*).

Untuk mengatasi keterbatasan pengamatan manual, teknologi *remote sensing* berbasis spektrum cahaya banyak digunakan untuk mendeteksi stres tanaman pada tahap awal. Kamera multispektral dan hiperspektral yang dipasang pada drone atau satelit dapat menangkap indeks vegetasi seperti *Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)*, *Photochemical Reflectance Index (PRI)*, dan *Canopy Chlorophyll Content Index (CCCI)*. Indeks ini mengukur reflektansi cahaya dari daun dan kanopi yang terkait erat dengan kadar klorofil, kelembaban, dan efisiensi fotosintesis. Perubahan kecil dalam indeks ini bisa menunjukkan gangguan sebelum gejala visual muncul (*Zhang et al., 2021*).

Deteksi berbasis termal juga berkembang sebagai metode penting dalam mengenali gangguan fisiologis non-patogenik. Kamera inframerah digunakan untuk mengukur suhu daun, di mana peningkatan suhu daun sering kali merupakan indikator stres air atau stomata yang tertutup. Teknik ini sangat efektif dalam mendeteksi kekeringan dini dan kelelahan air, bahkan sebelum terjadi layu secara visual. Integrasi kamera termal dengan data kelembaban tanah dan kelembaban udara melalui sensor IoT memberikan sistem pemantauan real-time yang efisien (*Costa et al., 2020*).

Di tingkat molekuler dan biokimia, deteksi gangguan non-infeksi dapat dilakukan dengan mengukur aktivitas gen-gen stres dan kandungan senyawa metabolit tertentu. Gen yang terkait dengan stres abiotik seperti *DREB*, *HSP70*, dan *NHX1* menunjukkan peningkatan ekspresi ketika tanaman mengalami kekeringan, suhu ekstrem, atau salinitas. Selain itu, akumulasi metabolit sekunder seperti *prolin*, *malondialdehyde (MDA)*, dan *soluble sugar* bisa digunakan sebagai biomarker fisiologis untuk mengindikasikan tingkat stres tanaman.

Teknik seperti PCR real-time dan kromatografi cair menjadi alat utama dalam pendekatan ini (Pandey *et al.*, 2020).

Teknik berbasis pencitraan non-destruktif menggunakan *chlorophyll fluorescence imaging* juga sangat sensitif dalam mendeteksi gangguan non-infeksi. Fluoresensi klorofil dapat mengungkapkan efisiensi fotosistem II (PSII) yang sangat rentan terhadap berbagai tekanan lingkungan. Penurunan nilai F_v/F_m merupakan indikator stres fotosintetik sebelum tanaman menunjukkan kerusakan fisik. Penggunaan alat ini dalam skala laboratorium dan lapangan telah terbukti efektif dalam mendeteksi efek awal dari defisiensi hara dan stres suhu (Kalaji *et al.*, 2018).

Dalam pengembangan terbaru, sistem berbasis kecerdasan buatan (AI) dan pembelajaran mesin digunakan untuk menganalisis data besar dari citra, sensor, dan parameter lingkungan untuk mendeteksi gangguan secara otomatis. Model algoritmik mampu mengenali pola-pola kerusakan yang sulit dibedakan oleh manusia, bahkan pada fase sub-klinis. Penggunaan *deep learning convolutional neural networks (CNN)* dalam klasifikasi citra daun terbukti efektif dalam mendeteksi defisiensi spesifik maupun stres air dengan akurasi tinggi. Sistem ini memungkinkan pemantauan skala luas secara real-time dan sangat relevan untuk pertanian komersial dan skala besar (Barbedo *et al.*, 2021).

F. Rangkuman

Penyakit non-infeksi yang disebabkan oleh faktor abiotik seperti malnutrisi unsur hara, kekeringan, suhu ekstrem, salinitas, dan pencemaran logam berat memiliki dampak signifikan terhadap kesehatan dan produktivitas tanaman. Ketidakseimbangan unsur hara,

baik makro maupun mikro, menimbulkan berbagai gejala fisiologis seperti klorosis, nekrosis, dan gangguan perkembangan organ tanaman. Tanaman juga menunjukkan respons fisiologis khas terhadap stres lingkungan seperti peningkatan senyawa pelindung dan perubahan struktur akar. Adaptasi terhadap kondisi lingkungan bergantung pada interaksi kompleks antara faktor genetik, epigenetik, dan ekologis. Upaya pencegahan dan koreksi dapat dilakukan melalui strategi pemupukan presisi, manajemen irigasi, pemilihan varietas tahan stres, serta penggunaan bioteknologi dan agen hayati. Deteksi dini gangguan non-infeksi dapat dilakukan melalui pendekatan visual, sensor optik, termal, molekuler, hingga teknologi berbasis AI. Keseluruhan pendekatan ini mendukung terciptanya sistem pertanian presisi yang berkelanjutan dan tanggap terhadap perubahan lingkungan.

G. Latihan

Soal

1. Jelaskan perbedaan gejala defisiensi nitrogen dan defisiensi fosfor pada tanaman serta dampaknya terhadap metabolisme tanaman!
2. Uraikan mekanisme fisiologis tanaman dalam merespon kekeringan dan salinitas sebagai bentuk stres abiotik!
3. Bagaimana interaksi tanaman dengan mikroorganisme tanah seperti PGPR dan mikoriza membantu tanaman mengatasi cekaman abiotik?
4. Sebutkan dan jelaskan minimal tiga metode deteksi dini gangguan non-infeksi pada tanaman yang berbasis teknologi!

5. Jelaskan bagaimana pendekatan pencegahan dan koreksi terhadap gangguan abiotik dapat meningkatkan efisiensi dan keberlanjutan sistem pertanian!

Jawaban

1. Defisiensi nitrogen ditandai dengan klorosis pada daun tua karena nitrogen bersifat mobile dalam tanaman. Dampaknya mencakup terganggunya sintesis protein, klorofil, dan asam nukleat, sehingga menghambat fotosintesis dan pertumbuhan vegetatif. Sementara itu, defisiensi fosfor menyebabkan daun berwarna keunguan akibat akumulasi anthocyanin dan sistem akar yang pendek. Fosfor penting dalam pembentukan ATP dan pembelahan sel. Kekurangan fosfor menyebabkan penurunan efisiensi penyerapan air dan hara, memperlemah pertumbuhan tanaman secara umum.
2. Dalam kondisi kekeringan, tanaman menutup stomata untuk mengurangi kehilangan air, menghasilkan senyawa osmoprotektan seperti prolin, serta memodifikasi sistem akar agar menjangkau air lebih dalam. Pada stres salinitas, tanaman menyesuaikan keseimbangan ionik dengan mengakumulasi ion Na^+ dan Cl^- ke dalam vakuola serta meningkatkan sintesis osmolit seperti betain. Kedua bentuk stres ini memicu aktivasi gen pertahanan dan enzim antioksidan sebagai respons fisiologis adaptif.
3. PGPR (Plant Growth-Promoting Rhizobacteria) dan mikoriza meningkatkan ketahanan tanaman terhadap cekaman abiotik dengan memperbaiki penyerapan hara dan air, meningkatkan aktivitas antioksidan, serta merangsang ekspresi gen toleran

stres. Mikoriza memperluas daerah serapan akar, sedangkan PGPR membantu memperkuat sistem imunitas dan metabolisme tanaman melalui produksi senyawa pemacu pertumbuhan seperti hormon auksin.

4. Tiga metode deteksi dini gangguan non-infeksi antara lain:
 - a. Pengamatan gejala visual seperti klorosis dan nekrosis.
 - b. Teknologi remote sensing menggunakan kamera multispektral dan hiperspektral untuk menghitung indeks vegetasi seperti NDVI.
 - c. Deteksi molekuler seperti analisis ekspresi gen DREB dan HSP, serta pengukuran metabolit stres seperti prolin dan MDA. Metode-metode ini dapat digunakan secara terintegrasi untuk pemantauan presisi.
5. Pencegahan dilakukan melalui pemupukan berimbang berbasis analisis tanah, penggunaan varietas tahan stres, serta pemantauan lingkungan secara real-time. Koreksi dapat mencakup irigasi presisi, bioremediasi, dan aplikasi amelioran tanah. Pendekatan ini meningkatkan efisiensi input pertanian, menekan risiko gagal panen, dan menjaga keberlanjutan ekosistem pertanian. Integrasi teknologi seperti IoT, AI, dan sensor menjadikan sistem pertanian lebih adaptif dan produktif.

BAB VIII

GULMA: BIOLOGI, DAMPAK, DAN KLASIFIKASI

Gulma merupakan komponen penting dalam agroekosistem yang sering dianggap sebagai tumbuhan pengganggu karena kompetisinya dengan tanaman budidaya. Keberadaan gulma tidak hanya berdampak pada penurunan hasil panen, tetapi juga berpengaruh terhadap dinamika ekologi, penggunaan input pertanian, dan pengelolaan lahan. Memahami aspek biologis, dampak, serta klasifikasinya menjadi kunci untuk mengembangkan strategi pengendalian gulma yang berkelanjutan.

- **Tujuan Pembelajaran**

- Menjelaskan definisi gulma serta perannya dalam agroekosistem dari perspektif ekologi dan ekonomi.
- Mengidentifikasi ciri morfologi dan strategi adaptasi gulma terhadap berbagai kondisi lingkungan.
- Menganalisis dampak gulma terhadap produktivitas pertanian dan kompetisi sumber daya.
- Mengklasifikasikan gulma berdasarkan habitatnya dan memahami implikasi ekologis dari klasifikasi tersebut.
- Mengevaluasi peran gulma sebagai indikator kesehatan lahan dan hubungannya dengan manajemen agroekosistem berkelanjutan.

A. Definisi dan Peran Gulma dalam Agroekosistem

Gulma dalam konteks pertanian didefinisikan sebagai tumbuhan yang tumbuh di tempat yang tidak diinginkan dan dapat mengganggu pertumbuhan tanaman budidaya. Meski definisinya sederhana, gulma memiliki dampak kompleks terhadap pertanian, mulai dari persaingan sumber daya hingga kerugian ekonomi. *Radosevich, Holt, dan Ghersa* menyatakan bahwa gulma bukan sekadar tanaman pengganggu, tetapi bagian dari komunitas tumbuhan yang berinteraksi secara dinamis dengan lingkungan dan tanaman utama (Maity et al., 2021). Oleh karena itu, pemahaman terhadap definisi gulma harus dilihat dari perspektif ekologi dan agronomi.

Dalam agroekosistem, gulma berperan sebagai pesaing tanaman budidaya dalam memperoleh cahaya, air, nutrisi, dan ruang tumbuh. Persaingan ini mengakibatkan penurunan produktivitas, terutama pada masa awal pertumbuhan tanaman. Studi oleh *Zhang et al.* menunjukkan bahwa keberadaan gulma selama fase vegetatif awal tanaman dapat mengurangi hasil hingga 60%, tergantung pada spesies dan kerapatannya (Zhang, Liu, & Wang, 2020). Oleh karena itu, keberadaan gulma harus diidentifikasi dan ditangani sejak dini untuk menjaga kestabilan hasil produksi pertanian.

Meskipun gulma sering dianggap merugikan, beberapa penelitian juga menyoroti manfaat ekologisnya. Gulma dapat meningkatkan biodiversitas tanah dan menjadi habitat bagi musuh alami hama. Gulma tertentu juga berperan sebagai penutup tanah alami yang mencegah erosi dan meningkatkan retensi air. *Niemann et al.* menegaskan bahwa keberagaman spesies gulma yang terkendali mampu menstimulasi kesetimbangan ekosistem dan mengurangi dominansi hama spesifik (Niemann et al., 2021). Ini menunjukkan

pentingnya pendekatan manajemen gulma yang tidak sepenuhnya destruktif, tetapi selektif dan berkelanjutan.

Dari aspek sosial-ekonomi, gulma juga menjadi faktor penting dalam efisiensi tenaga kerja dan biaya produksi. Pengendalian gulma memerlukan input tenaga kerja tinggi, khususnya di negara berkembang yang masih mengandalkan sistem pertanian konvensional. Menurut *Kumar dan Mishra*, biaya pengendalian gulma dapat mencapai 30% dari total biaya budidaya padi sawah, yang menandakan pentingnya efisiensi dalam pengelolaan gulma (Kumar & Mishra, 2022). Strategi integratif yang menggabungkan pendekatan mekanik, kimia, dan biologis menjadi pilihan rasional dalam menghadapi tantangan ini.

Dari sisi fisiologi tanaman, kehadiran gulma dapat memodifikasi iklim mikro sekitar tanaman budidaya. Gulma dengan habitus tinggi dapat menaungi tanaman, menyebabkan penurunan intensitas cahaya dan fotosintesis. Selain itu, gulma juga menjadi inang alternatif bagi patogen dan vektor penyakit tanaman. Sebagai contoh, gulma dari genus *Commelina* diketahui menjadi reservoir bagi virus mosaik pada tanaman jagung (Setyowati et al., 2021). Oleh karena itu, klasifikasi gulma berdasarkan potensi risiko patogenik menjadi penting dalam pengambilan kebijakan pengendalian.

Pengklasifikasian gulma berdasarkan karakter ekologis, morfologi, dan adaptasi fisiologis membantu dalam identifikasi dan penentuan strategi pengelolaan. Gulma dapat dibedakan menjadi kelompok tahunan (*annual*), dua tahunan (*biennial*), dan tahunan abadi (*perennial*), yang masing-masing memerlukan pendekatan kontrol berbeda. *Singh et al.* mencatat bahwa gulma perennial seperti *Cyperus rotundus* sangat sulit diberantas karena memiliki umbi dan

rizoma bawah tanah yang tahan terhadap herbisida (Singh, Yadav, & Sharma, 2023). Hal ini menekankan pentingnya pemahaman siklus hidup gulma dalam manajemen pertanian modern.

Perkembangan teknologi citra satelit dan kecerdasan buatan turut merevolusi deteksi dan pemetaan gulma di lahan pertanian. Teknik *remote sensing* kini digunakan untuk mengidentifikasi sebaran gulma secara presisi, membantu petani dalam mengambil keputusan berbasis data. Menurut *Choudhury et al.*, penggabungan data drone dan *machine learning* telah meningkatkan akurasi identifikasi gulma hingga 92% dalam uji lapangan padi di India (Choudhury et al., 2022). Teknologi ini menjanjikan masa depan pengelolaan gulma yang lebih efisien, presisi, dan ramah lingkungan.

B. Ciri Morfologi dan Adaptasi Gulma

Gulma memiliki keragaman morfologi yang tinggi yang memungkinkan mereka tumbuh subur dalam berbagai kondisi lingkungan. Secara umum, gulma dapat dikenali melalui karakter morfologi seperti bentuk daun yang lebar, sistem akar yang kuat dan luas, batang yang menjalar atau tegak, serta kemampuan regeneratif tinggi. Banyak spesies gulma, seperti *Amaranthus spinosus* dan *Cyperus rotundus*, memiliki anatomi daun yang efisien dalam menangkap cahaya dan fotosintesis, menjadikan mereka sangat kompetitif terhadap tanaman budidaya (Sharma et al., 2021). Karakter ini merupakan keunggulan evolusioner yang membuat gulma cepat tumbuh dan menyebar.

Morfologi akar gulma juga menjadi faktor utama dalam daya tahan dan kemampuan bertahan hidup. Gulma perennial seperti *Imperata cylindrica* memiliki sistem akar rimpang yang menyebar

luas dan dapat tumbuh kembali meski bagian atas tanaman sudah dipangkas. Sementara itu, gulma tahunan seperti *Echinochloa crus-galli* memiliki akar serabut yang cepat menyerap nutrisi dan air, bersaing langsung dengan tanaman pertanian. Studi menunjukkan bahwa volume dan panjang akar gulma dapat dua kali lipat lebih banyak dibandingkan tanaman budidaya dalam kondisi lahan kering (Kim et al., 2023).

Adaptasi terhadap stres lingkungan merupakan ciri penting yang dimiliki gulma. Banyak spesies mampu bertahan di lahan miskin unsur hara, kondisi kekeringan, maupun genangan air. Mekanisme adaptasi ini sering melibatkan modifikasi fisiologi seperti penebalan kutikula, stomata tersebar merata, serta kemampuan dormansi benih yang panjang. Misalnya, *Portulaca oleracea* memiliki jaringan penyimpanan air di daun, menjadikannya tahan terhadap dehidrasi berkepanjangan (Iqbal et al., 2022). Adaptasi ini memungkinkan gulma tetap aktif secara fisiologis saat tanaman budidaya mengalami cekaman.

Reproduksi gulma sangat adaptif dan efisien. Banyak gulma memiliki kemampuan menghasilkan benih dalam jumlah besar, bahkan dalam kondisi pertumbuhan yang buruk. Beberapa spesies seperti *Parthenium hysterophorus* mampu menghasilkan ribuan benih dalam satu siklus hidup dan memiliki viabilitas tinggi dalam tanah selama bertahun-tahun. Selain itu, gulma juga memiliki potensi reproduksi vegetatif seperti pada *Cyperus esculentus*, yang mampu berkembang biak dari stolon dan umbi (Aghaalkhani et al., 2020). Karakter reproduksi ini menjadikan pengendalian gulma secara mekanis sering tidak cukup efektif.

Strategi penyebaran gulma yang efisien juga menunjukkan adaptasi ekologisnya. Gulma menyebar melalui berbagai media seperti angin, air, hewan, dan aktivitas manusia. Benih gulma dengan struktur seperti pappus, misalnya pada *Ageratum conyzoides*, mudah terbawa angin dan menyebar dalam radius yang luas. Sementara itu, biji dengan permukaan lengket dapat menempel pada bulu binatang atau kendaraan pertanian. Karakteristik ini mendukung invasi gulma ke habitat baru dan menyulitkan upaya eradikasi lokal (Bajwa et al., 2022).

Adaptasi morfologi juga tampak pada strategi kompetisi cahaya. Banyak gulma yang memiliki pertumbuhan cepat dan habitus tinggi, memungkinkan mereka menaungi tanaman budidaya. Beberapa gulma bahkan memodifikasi arah tumbuhnya mengikuti sumber cahaya (fototropisme), seperti yang diamati pada *Bidens pilosa*. Selain itu, daun yang berlapis dan batang bercabang memaksimalkan luas permukaan serapan cahaya, meningkatkan laju fotosintesis relatif terhadap tanaman sekitar (Ghosh & Roy, 2021). Ini mempercepat siklus hidup gulma, mempercepat pembentukan biomassa dan benih.

Ciri morfologi gulma yang fleksibel dan kemampuan adaptasinya menjadikan mereka sangat sulit dikendalikan secara konvensional. Pendekatan integratif berbasis *ecological weed management* menjadi penting untuk mengatasi masalah ini. Dengan memahami karakteristik morfologis dan respons fisiologis gulma, petani dapat memilih strategi pengendalian berbasis siklus hidup dan titik lemah spesies. Selain itu, penggunaan teknologi seperti spektroskopi inframerah dan *machine learning* telah dimanfaatkan untuk membedakan jenis gulma berdasarkan pola pertumbuhan dan ciri morfologinya (Silva et al., 2023). Ini membuka jalan menuju pertanian presisi yang efisien dan ramah lingkungan.

C. Dampak Ekonomi dan Kompetisi Sumber Daya

Gulma merupakan salah satu faktor pembatas utama dalam produksi pertanian, karena dampaknya yang luas baik terhadap aspek ekologi maupun ekonomi. Dalam konteks ekonomi, kerugian akibat gulma dapat terjadi secara langsung maupun tidak langsung. Kerugian langsung berasal dari penurunan hasil panen karena kompetisi dengan gulma, sedangkan kerugian tidak langsung timbul akibat peningkatan biaya produksi, seperti pembelian herbisida, penggunaan tenaga kerja, dan kerusakan peralatan akibat infestasi gulma. Menurut hasil penelitian terbaru, kerugian ekonomi akibat gulma di sektor tanaman pangan dapat mencapai 34% dari total potensi produksi global (Heap et al., 2022).

Kompetisi sumber daya antara gulma dan tanaman budidaya menjadi penyebab utama penurunan hasil. Gulma bersaing untuk mendapatkan cahaya, air, nutrisi, dan ruang tumbuh yang sangat penting dalam fase awal pertumbuhan tanaman. Pada kondisi persaingan tinggi, tanaman budidaya mengalami stres fisiologis dan mengalokasikan energi lebih banyak untuk bertahan hidup dibandingkan untuk berproduksi. Studi eksperimental menunjukkan bahwa keberadaan gulma seperti *Amaranthus retroflexus* dalam sistem pertanian jagung mampu menurunkan hasil biji jagung hingga 52% (Silva et al., 2021).

Salah satu bentuk kompetisi paling signifikan adalah perebutan nutrisi, khususnya nitrogen, fosfor, dan kalium. Gulma dengan sistem perakaran dangkal dan cepat seperti *Chenopodium album* mampu mengambil nutrisi lebih awal dari tanaman budidaya, menyebabkan defisiensi nutrisi kronis pada tanaman. Efek ini semakin besar pada tanah dengan kandungan unsur hara rendah. Penelitian oleh *Chen et*

al. menegaskan bahwa peningkatan kerapatan gulma berbanding lurus dengan penurunan kadar nitrogen dalam jaringan tanaman budidaya, terutama pada tanaman padi dan gandum (Chen et al., 2020).

Selain unsur hara, air menjadi komoditas vital yang diperebutkan oleh tanaman dan gulma. Dalam kondisi kering atau semi-arid, dominasi gulma terhadap sumber air sangat mempengaruhi kelangsungan tanaman. Gulma seperti *Sorghum halepense* memiliki sistem akar yang mampu menjangkau kedalaman tanah lebih besar, sehingga lebih efisien dalam menyerap air pada musim kemarau. Efeknya, tanaman budidaya mengalami cekaman air lebih cepat dan menunjukkan penurunan fotosintesis serta pertumbuhan vegetatif yang signifikan (Rahman et al., 2022).

Dampak ekonomi dari kompetisi ini tidak hanya tercermin dari penurunan hasil panen, tetapi juga meningkatnya biaya untuk pengendalian. Petani harus mengalokasikan dana tambahan untuk pembelian herbisida, tenaga kerja manual, maupun penggunaan alat mekanis. Dalam studi biaya produksi tanaman kedelai di Asia Tenggara, ditemukan bahwa sekitar 28% dari total ongkos budidaya digunakan untuk penanganan gulma, menjadikan aspek ini komponen biaya terbesar setelah pupuk (Nguyen et al., 2023). Ini menegaskan bahwa gulma merupakan beban ekonomi signifikan, terutama bagi petani kecil.

Persaingan terhadap cahaya juga merupakan bentuk dominasi yang sering tidak disadari. Banyak spesies gulma memiliki morfologi daun yang lebar dan posisi tumbuh lebih tinggi dibandingkan tanaman budidaya. Hal ini menyebabkan shading atau penghalangan sinar matahari yang dibutuhkan tanaman untuk fotosintesis. Tanaman yang ternaungi akan mengalami pengurangan luas daun efektif dan laju

pertumbuhan melambat. Dalam jangka panjang, hal ini berimplikasi pada jumlah malai, biji, atau buah yang terbentuk. *Ghosh et al.* menyebutkan bahwa satu minggu keterlambatan pengendalian gulma dalam sistem tanam padi dapat menurunkan hasil hingga 20% (*Ghosh et al., 2021*).

Secara keseluruhan, dampak ekonomi gulma sangat tergantung pada jenis tanaman, populasi gulma, dan durasi kompetisi. Namun demikian, tanpa pengelolaan yang tepat, akumulasi dampak tersebut bisa menyebabkan inefisiensi produksi dan menurunkan daya saing pertanian secara nasional. Oleh sebab itu, strategi pengendalian gulma harus didasarkan pada pemahaman tentang perilaku kompetitif gulma dan waktu kritis kompetisi. Integrasi antara pengendalian kimia, mekanik, dan rotasi tanaman yang tepat terbukti mampu menekan populasi gulma dan mengurangi beban biaya yang harus ditanggung petani (*Yuan et al., 2020*).

D. Klasifikasi Gulma Berdasarkan Habitat

Klasifikasi gulma berdasarkan habitat memberikan pemahaman yang lebih mendalam tentang kemampuan adaptasi dan sebaran ekologisnya dalam berbagai sistem pertanian dan lingkungan alami. Habitat merupakan faktor utama yang menentukan morfologi, siklus hidup, serta strategi adaptasi gulma dalam ekosistem tertentu. Pendekatan klasifikasi ini membantu dalam merancang strategi pengelolaan yang spesifik lokasi, terutama karena setiap tipe habitat memiliki tekanan selektif yang berbeda terhadap pertumbuhan dan persistensi gulma (*Bajwa et al., 2021*). Dalam ilmu agronomi dan ekologi, klasifikasi berdasarkan habitat mencakup gulma lahan kering, lahan basah, perairan, serta gulma habitat marginal seperti lahan terlantar atau pinggir jalan.

Gulma lahan kering adalah kelompok yang tumbuh optimal pada tanah dengan kadar air rendah dan sirkulasi udara tinggi. Jenis gulma ini umumnya ditemukan pada pertanian lahan tadah hujan, tegalan, dan daerah kering. Beberapa spesies seperti *Digitaria sanguinalis* dan *Eleusine indica* menunjukkan kemampuan toleransi tinggi terhadap kekeringan melalui mekanisme pengurangan transpirasi dan pertumbuhan akar yang ekstensif. Studi oleh Araya et al. menunjukkan bahwa gulma lahan kering memiliki sistem akar lebih dalam dibandingkan tanaman budidaya seperti sorgum dan kedelai, memungkinkan mereka bertahan saat cekaman air terjadi (Araya et al., 2022).

Gulma lahan basah tumbuh pada lingkungan dengan kelembaban tanah tinggi hingga jenuh air, seperti di sawah atau lahan rawa. Karakteristik gulma ini meliputi toleransi terhadap kondisi anaerobik dan kemampuan untuk tumbuh mengapung atau menjulang di atas permukaan air. Contoh khasnya adalah *Monochoria vaginalis* dan *Echinochloa crus-galli*, yang mendominasi area persawahan dan berkompetisi secara agresif dengan tanaman padi. Penelitian oleh Miah et al. mengungkapkan bahwa spesies ini menunjukkan adaptasi fisiologis seperti aerenkima dan batang berongga yang memfasilitasi transportasi oksigen dalam jaringan tanaman (Miah et al., 2021).

Gulma perairan merupakan kategori khusus yang hidup sepenuhnya di air, baik mengapung, tenggelam, maupun tumbuh di dasar perairan dangkal. Spesies seperti *Eichhornia crassipes* (eceng gondok) dan *Hydrilla verticillata* menjadi perhatian serius dalam sistem irigasi dan waduk karena pertumbuhannya yang cepat serta potensinya menyumbat aliran air. Gulma ini mengganggu transportasi air, menurunkan kadar oksigen, serta menghambat penetrasi cahaya ke dasar perairan. Nanda et al. melaporkan bahwa pertumbuhan

Eichhornia dapat mencapai 2,5% per hari dalam kondisi eutrofik, menyebabkan ledakan populasi yang merusak ekosistem akuatik (Nanda et al., 2023).

Habitat marginal seperti lahan kosong, pinggir jalan, dan area terbuka non-budidaya juga menjadi tempat berkembangnya gulma. Kelompok ini memiliki daya adaptasi luar biasa terhadap tekanan lingkungan seperti polusi, injakan, dan fluktuasi suhu ekstrem. Gulma seperti *Parthenium hysterophorus* dan *Lantana camara* dikenal sebagai spesies invasif di habitat marginal dan memiliki dampak ekologis negatif terhadap biodiversitas lokal. Dalam studi invasi biologi, *Singh et al.* mengidentifikasi bahwa keberadaan gulma habitat marginal mampu mempercepat fragmentasi ekosistem asli dan memperbesar peluang alih fungsi lahan (Singh et al., 2020).

Klasifikasi berdasarkan habitat juga berkaitan dengan strategi kontrol yang diterapkan. Gulma lahan kering umumnya lebih efektif dikendalikan melalui pengolahan tanah dan rotasi tanaman, sementara gulma lahan basah dan perairan lebih banyak ditangani dengan metode biokontrol atau herbisida selektif yang tahan air. Di sisi lain, gulma habitat marginal sering memerlukan pendekatan kombinasi antara kontrol mekanis dan peraturan kebijakan penggunaan lahan. Pendekatan ini menunjukkan pentingnya pemetaan sebaran habitat gulma secara spasial dalam pengelolaan gulma yang terencana dan berbasis data (da Silva et al., 2022).

Teknologi penginderaan jauh kini digunakan untuk mengklasifikasikan habitat gulma secara presisi, menggunakan citra satelit atau drone untuk memetakan sebaran berdasarkan indikator vegetasi dan kelembaban tanah. *Zhou et al.* berhasil membedakan habitat gulma dengan akurasi lebih dari 90% menggunakan kombinasi

spektrum inframerah dan algoritma pembelajaran mesin. Temuan ini menekankan potensi teknologi dalam mendukung manajemen gulma berbasis habitat yang efisien dan tepat sasaran (Zhou et al., 2023). Inovasi ini juga mendukung pertanian presisi yang sedang berkembang dalam menghadapi tantangan produksi pangan global.

Pemahaman tentang klasifikasi gulma berdasarkan habitat bukan hanya aspek taksonomi atau ekologis semata, tetapi merupakan fondasi penting dalam perencanaan pengendalian terpadu. Pengetahuan ini memfasilitasi prediksi pertumbuhan gulma berdasarkan musim, ketersediaan air, dan penggunaan lahan. Integrasi klasifikasi ini dalam sistem informasi geografis dan perangkat lunak pertanian modern telah terbukti meningkatkan efisiensi dalam pengambilan keputusan. Oleh sebab itu, pendidikan dan pelatihan petani mengenai pengenalan jenis gulma berdasarkan habitat menjadi krusial untuk meningkatkan produktivitas pertanian dan menjaga kelestarian lingkungan jangka panjang.

E. Gulma Sebagai Indikator Kesehatan Lahan

Gulma sering kali dianggap sebagai gangguan dalam sistem pertanian, namun dalam perspektif ekologi, keberadaan dan komposisi gulma dapat merefleksikan kondisi lingkungan tempat mereka tumbuh. Beberapa jenis gulma tumbuh subur pada tanah yang terganggu, miskin hara, terkompaksi, atau tercemar, menjadikannya indikator alami bagi kesehatan lahan. Dalam ekosistem pertanian berkelanjutan, informasi ini sangat berharga untuk merancang strategi pengelolaan tanah secara adaptif. Menurut *Barroso et al.* (2020), gulma dapat merepresentasikan status biologis, fisik, dan kimia tanah melalui pola dominansi, keragaman spesies, dan adaptasi fisiologis.

Spesies gulma tertentu diketahui sangat adaptif terhadap kondisi tanah yang tidak seimbang. Misalnya, keberadaan *Cyperus rotundus* sering dikaitkan dengan lahan yang memiliki gangguan aerasi dan tingginya kepadatan tanah. Sementara itu, dominasi *Amaranthus spinosus* menunjukkan kondisi tanah dengan kelebihan nitrogen akibat penggunaan pupuk sintesis berlebihan. Penelitian oleh *Mekonnen et al.* (2021) menyebutkan bahwa perubahan populasi gulma menjadi indikator awal terhadap degradasi tanah dan pencemaran agroekosistem. Oleh sebab itu, pengamatan terhadap komunitas gulma bukan hanya strategi pengendalian, tetapi juga diagnosis ekologi yang efisien.

Keragaman spesies gulma dapat mencerminkan biodiversitas mikroba tanah. Tanah yang sehat umumnya mendukung pertumbuhan berbagai jenis gulma, menunjukkan sistem yang tidak mengalami stres ekologis berat. Sebaliknya, habitat dengan satu atau dua spesies gulma dominan dalam jangka panjang biasanya mengalami tekanan tinggi, baik dari herbisida maupun penurunan kesuburan. Studi oleh *Ramírez et al.* (2022) mengungkap bahwa keragaman gulma berkorelasi positif dengan aktivitas mikroorganisme tanah, terutama dalam sistem pertanian organik. Hal ini menandakan bahwa indikator hayati seperti gulma dapat menjadi pelengkap data analitik laboratorium tanah.

Gulma juga merespons perubahan pH tanah dengan sangat cepat. Beberapa gulma asam-toleran seperti *Polygonum spp.* tumbuh dominan pada lahan dengan pH rendah, sedangkan gulma seperti *Chenopodium album* lebih menyukai kondisi netral hingga alkalis. Dengan demikian, observasi visual terhadap gulma yang muncul secara alami dapat menjadi metode cepat untuk memperkirakan sifat kimia tanah. *Fiorini et al.* (2020) mencatat bahwa metode ini sangat berguna pada sistem pertanian kecil dengan keterbatasan akses

laboratorium uji tanah. Keakuratan informasi ini meningkat bila dikombinasikan dengan pemetaan spasial dan catatan musim tanam.

Jenis dan intensitas gulma tertentu juga dapat menunjukkan gangguan biologis pada tanah, seperti penurunan aktivitas fauna tanah akibat pestisida. Gulma seperti *Parthenium hysterophorus*, misalnya, cenderung mendominasi di area pertanian yang mengalami tekanan pestisida berkepanjangan dan rendah aktivitas dekomposer alami. Studi ekotoksikologi oleh *Osei et al.* (2023) menyoroti bahwa tingginya dominasi gulma invasif sering berkorelasi dengan rendahnya biomassa cacing tanah dan jamur mikoriza. Ini memperkuat argumen bahwa gulma bukan sekadar tumbuhan pengganggu, melainkan organisme bioindikator yang mencerminkan kestabilan sistem tanah.

Dinamika populasi gulma dari musim ke musim dapat menjadi alat pemantau perubahan lingkungan jangka panjang. Misalnya, peningkatan gulma air dalam lahan sawah yang sebelumnya bebas banjir menunjukkan gangguan pada sistem drainase atau perubahan iklim mikro. *Schwartz et al.* (2021) menyarankan penggunaan gulma sebagai indikator perubahan iklim lokal karena sensitivitasnya terhadap curah hujan, suhu, dan kelembaban tanah. Ini menjadi penting dalam konteks adaptasi pertanian terhadap perubahan iklim, di mana pendekatan berbasis indikator alami semakin diakui sebagai metode praktis dan ekonomis.

Mengintegrasikan pengamatan terhadap gulma dalam sistem monitoring pertanian dapat membantu petani dan penyuluh dalam membuat keputusan berbasis bukti. Data keberadaan dan keragaman gulma dapat digunakan sebagai input dalam sistem informasi geografis (GIS) untuk memetakan kesehatan lahan secara real time.

Benítez et al. (2022) menekankan bahwa indikator vegetasi liar seperti gulma sangat mendukung prinsip pertanian regeneratif, di mana pengelolaan sumber daya alam berbasis pada siklus alami dan umpan balik ekosistem. Hal ini menggeser paradigma pengendalian gulma dari eradikasi menjadi pemanfaatan sebagai sumber informasi ekosistem.

F. Rangkuman

Gulma merupakan tanaman yang tumbuh di tempat yang tidak diinginkan dan bersaing dengan tanaman budidaya dalam hal cahaya, air, nutrisi, dan ruang tumbuh. Meskipun sering dianggap sebagai pengganggu, gulma juga memiliki peran ekologis penting, seperti menjaga biodiversitas tanah, mencegah erosi, dan menjadi indikator kondisi lahan. Ciri morfologis gulma seperti sistem akar yang kuat, kemampuan fotosintesis tinggi, dan metode reproduksi cepat membuatnya sulit dikendalikan.

Gulma menyebabkan kerugian ekonomi signifikan melalui kompetisi sumber daya yang menurunkan hasil panen dan meningkatkan biaya produksi. Pengklasifikasian gulma berdasarkan habitat—seperti lahan kering, basah, perairan, dan marginal—memberikan wawasan penting untuk strategi pengendalian berbasis ekosistem. Teknologi seperti remote sensing dan pembelajaran mesin kini memungkinkan identifikasi gulma secara presisi.

Selain sebagai musuh, gulma dapat menjadi indikator alami kesehatan lahan. Komposisi dan dominansi gulma mencerminkan kondisi fisik, kimia, dan biologi tanah. Pendekatan modern kini mulai memanfaatkan gulma sebagai bagian dari sistem monitoring ekosistem dan bukan sekadar objek eradikasi. Pengelolaan gulma

berbasis data dan ekologi menjadi kunci menuju sistem pertanian yang regeneratif dan berkelanjutan.

G. Latihan

Soal

1. Jelaskan secara komprehensif definisi gulma dan mengapa dalam ekosistem pertanian gulma tidak selalu harus diberantas sepenuhnya.
2. Uraikan lima ciri morfologis yang membuat gulma mampu bersaing kuat dengan tanaman budidaya.
3. Bagaimana kompetisi sumber daya antara gulma dan tanaman budidaya dapat memengaruhi hasil panen dan biaya produksi? Berikan contoh konkret.
4. Bandingkan karakteristik gulma pada habitat lahan kering, lahan basah, dan habitat marginal, serta jelaskan implikasinya terhadap strategi pengendalian gulma.
5. Diskusikan peran gulma sebagai bioindikator kesehatan tanah dan bagaimana informasi tersebut dapat digunakan dalam pengelolaan pertanian berkelanjutan.

Jawaban

1. **Definisi gulma** adalah tanaman yang tumbuh di tempat yang tidak diinginkan dan bersaing dengan tanaman budidaya. Namun, dari perspektif ekologi, gulma juga bisa memberikan manfaat seperti menjaga biodiversitas, menstimulasi musuh alami hama, serta meningkatkan struktur tanah. Oleh karena

itu, pengendalian gulma tidak harus selalu bersifat eradikatif, tetapi selektif dan berkelanjutan.

2. **Lima ciri morfologis gulma** antara lain: (1) sistem akar kuat dan luas (misalnya *Imperata cylindrica*), (2) daun lebar dan efisien menyerap cahaya (*Amaranthus spinosus*), (3) batang menjalar atau tegak tinggi, (4) kemampuan regeneratif tinggi (*Cyperus rotundus*), dan (5) kemampuan reproduksi vegetatif dan generatif masif (*Parthenium hysterophorus*).
3. **Kompetisi sumber daya** antara gulma dan tanaman mencakup cahaya, nutrisi, air, dan ruang tumbuh. Misalnya, *Chenopodium album* dapat menyerap nitrogen lebih cepat, menyebabkan defisiensi pada tanaman budidaya. Akibatnya, hasil panen menurun dan petani harus mengeluarkan biaya tambahan untuk pengendalian gulma hingga 28% dari total biaya produksi, seperti yang terjadi pada tanaman kedelai di Asia Tenggara.
4. **Gulma lahan kering** memiliki toleransi tinggi terhadap kekeringan (*Digitaria sanguinalis*), **gulma lahan basah** mampu tumbuh pada tanah jenuh air dan anaerob (*Echinochloa crus-galli*), sementara **gulma habitat marginal** adaptif terhadap stres lingkungan ekstrem (*Parthenium hysterophorus*). Strategi kontrolnya berbeda: pengolahan tanah untuk lahan kering, biokontrol dan herbisida tahan air untuk lahan basah, serta pendekatan kebijakan untuk habitat marginal.

5. **Gulma sebagai indikator tanah** bisa mencerminkan kondisi fisik (misalnya aerasi buruk oleh *Cyperus rotundus*), kimia (nitrogen tinggi oleh *Amaranthus spinosus*), dan biologis (aktivitas mikroba oleh keragaman gulma). Petani dapat memanfaatkan keberadaan gulma untuk memetakan kesehatan lahan secara visual atau digital menggunakan GIS dan monitoring spasial untuk pengelolaan tanah yang lebih adaptif dan ekologis.

BAB IX

TEKNOLOGI DAN STRATEGI PENGENDALIAN GULMA

Pengendalian gulma merupakan salah satu aspek penting dalam budidaya pertanian yang berkelanjutan. Gulma dapat menurunkan hasil panen secara signifikan melalui kompetisi terhadap sumber daya seperti air, cahaya, dan nutrisi. Bab ini menguraikan berbagai pendekatan strategis dan teknologi terkini dalam pengendalian gulma, dengan penekanan khusus pada teknik kultur teknis.

- **Tujuan Pembelajaran**

- Menjelaskan konsep teknik kultur teknis dalam pengendalian gulma secara agronomis dan ekologis.
- Menganalisis peran dan risiko penggunaan herbisida dalam pengendalian gulma secara kimiawi.
- Menjabarkan aplikasi bioteknologi dalam mendukung manajemen gulma yang presisi dan berkelanjutan.
- Mengidentifikasi mekanisme resistensi gulma dan menyusun strategi pengelolaannya.
- Mengevaluasi keberhasilan strategi pengendalian gulma melalui studi kasus lintas wilayah dan sistem pertanian.

A. Teknik Kultur Teknis

Teknik kultur teknis merupakan pendekatan agronomis yang bertujuan menciptakan kondisi pertumbuhan tanaman yang optimal sekaligus menekan pertumbuhan gulma. Teknik ini tidak hanya fokus pada pengendalian gulma secara langsung, tetapi juga mengedepankan pengelolaan lingkungan tanaman. Pendekatan ini menjadi bagian integral dalam sistem pertanian konservasi dan pertanian organik karena menghindari penggunaan bahan kimia sintetis. Salah satu strategi kultur teknis yang paling umum adalah rotasi tanaman, di mana jenis tanaman yang berbeda ditanam secara bergilir untuk mengganggu siklus hidup gulma tertentu (*Shekoofa et al., 2023*).

Rotasi tanaman terbukti mampu mengurangi tekanan gulma karena perbedaan morfologi dan fisiologi tanaman yang ditanam dapat mengubah pola kompetisi cahaya, air, dan unsur hara di dalam tanah. Selain itu, tanaman penutup tanah seperti *Mucuna pruriens* atau *Arachis pintoii* telah banyak digunakan untuk membatasi pertumbuhan gulma melalui efek *allelopathy* dan keteduhan yang ditimbulkan (*Kumar et al., 2021*). Dengan demikian, teknik kultur teknis tidak hanya menekan gulma secara fisik tetapi juga melalui interaksi biokimia yang kompleks.

Pengaturan jarak tanam dan kepadatan populasi juga menjadi komponen penting dalam teknik kultur teknis. Tanaman dengan populasi yang optimal dapat tumbuh lebih cepat dan membentuk kanopi yang menutupi permukaan tanah lebih awal. Hal ini mengurangi intensitas cahaya yang mencapai permukaan tanah sehingga menekan perkecambahan biji gulma. Strategi ini sangat efektif pada tanaman seperti jagung, kedelai, dan padi lahan kering (*Marín et al., 2020*). Pengaturan jarak tanam yang tepat juga mampu

menurunkan serangan gulma tanpa mengorbankan hasil tanaman utama.

Waktu tanam yang disesuaikan dengan siklus hidup gulma juga terbukti menjadi strategi yang efektif dalam mengurangi populasi gulma. Misalnya, menunda waktu tanam hingga sebagian besar gulma telah berkecambah dan dapat dikendalikan sebelum tanaman utama ditanam, dapat menurunkan tekanan gulma secara signifikan. Pendekatan ini dikenal sebagai *stale seedbed technique*, yang telah terbukti meningkatkan efisiensi pengendalian gulma di berbagai sistem pertanian tropis (López-Ovejero et al., 2022).

Penanaman varietas tanaman yang kompetitif juga merupakan bagian dari teknik kultur teknis. Varietas yang tumbuh cepat, memiliki sistem akar yang luas, dan membentuk kanopi lebat sangat efektif dalam mengalahkan gulma dalam kompetisi sumber daya. Penelitian terbaru menunjukkan bahwa varietas padi yang memiliki karakteristik *vigorous early growth* mampu menekan pertumbuhan gulma hingga 40% lebih tinggi dibandingkan varietas konvensional (Setiyono et al., 2021). Pemilihan varietas yang tepat memberikan kontribusi besar terhadap pengurangan beban pengendalian gulma secara keseluruhan.

Teknik pengolahan tanah yang minimal (*minimum tillage*) juga termasuk dalam strategi kultur teknis yang efektif. Dengan tidak sering mengolah tanah, propagul gulma yang ada di permukaan tidak banyak terganggu sehingga tidak tersebar luas. Selain itu, sistem tanpa olah tanah (*no-tillage*) dikombinasikan dengan penutup tanah organik (mulsa) dapat menciptakan kondisi mikroklimat yang tidak menguntungkan bagi pertumbuhan gulma (Chaudhary et al., 2023). Strategi ini semakin populer dalam sistem pertanian konservasi modern.

Teknik kultur teknis harus diterapkan secara terpadu dengan strategi lain dalam kerangka pengendalian hama terpadu (PHT). Penggunaan teknik ini memberikan banyak keuntungan, seperti biaya produksi lebih rendah, kerusakan lingkungan minimal, serta meningkatkan ketahanan ekosistem pertanian. Dengan pendekatan ekologi yang berkelanjutan, teknik kultur teknis memberikan dasar kuat bagi manajemen gulma yang adaptif dan efisien di era perubahan iklim (*Ali et al., 2024*).

B. Pengendalian Kimiawi dan Aplikasi Herbisida

Pengendalian kimiawi merupakan salah satu strategi dominan dalam manajemen gulma modern, terutama pada sistem pertanian intensif dan berskala besar. Pendekatan ini melibatkan penggunaan herbisida sebagai senyawa aktif yang berfungsi menghambat atau membunuh gulma tanpa merusak tanaman utama. Keunggulan dari metode ini adalah efisiensi waktu, efektivitas terhadap spektrum gulma yang luas, serta kemudahan dalam penerapannya. Akan tetapi, penggunaannya yang tidak terkendali dapat menimbulkan dampak lingkungan dan resistensi gulma yang signifikan (*Peterson et al., 2021*). Oleh karena itu, pemahaman terhadap prinsip aplikasi herbisida yang tepat dan berkelanjutan menjadi sangat penting dalam konteks pengendalian gulma yang bertanggung jawab.

Herbisida diklasifikasikan berdasarkan beberapa aspek, yaitu cara kerja (*mode of action*), waktu aplikasi (pra-tanam, pra-tumbuh, pasca-tumbuh), serta selektivitasnya terhadap tanaman. Herbisida selektif hanya menargetkan gulma tertentu tanpa merusak tanaman budidaya, sedangkan herbisida non-selektif menghancurkan semua vegetasi. Salah satu contoh herbisida non-selektif yang populer adalah *glyphosate*, yang bekerja dengan menghambat enzim *EPSPS* dalam

jalur sintesis asam amino aromatik, menyebabkan kematian tanaman (Cruz *et al.*, 2023). Herbisida selektif seperti *acetochlor* digunakan dalam tanaman jagung dan kedelai karena selektivitasnya terhadap gulma berdaun sempit.

Aplikasi herbisida memerlukan pemahaman menyeluruh terhadap fisiologi tanaman dan gulma, kondisi lingkungan, serta teknik penyemprotan yang optimal. Faktor-faktor seperti kelembaban tanah, suhu udara, dan kecepatan angin mempengaruhi efektivitas penyerapan bahan aktif. Misalnya, herbisida sistemik membutuhkan kelembaban yang cukup agar dapat terserap oleh jaringan tanaman dan diedarkan melalui sistem vaskuler. Kesalahan dalam aplikasi seperti penggunaan dosis berlebih atau pencampuran yang tidak sesuai dapat menyebabkan fitotoksisitas pada tanaman utama (Devkota *et al.*, 2020). Oleh sebab itu, penggunaan alat semprot berteknologi tinggi seperti *drone sprayer* dan *controlled droplet applicator* semakin direkomendasikan.

Salah satu tantangan terbesar dari pengendalian kimiawi adalah munculnya resistensi gulma terhadap herbisida akibat seleksi alam yang berlangsung secara terus-menerus. Beberapa spesies gulma seperti *Amaranthus palmeri* dan *Echinochloa crus-galli* telah menunjukkan resistensi terhadap berbagai kelompok herbisida termasuk ALS-inhibitor dan ACCase-inhibitor. Untuk mengatasi hal ini, strategi rotasi herbisida berbasis mode of action yang berbeda serta integrasi dengan metode non-kimia menjadi kunci dalam manajemen resistensi (Heap & Duke, 2021).

Dampak negatif penggunaan herbisida secara masif juga mencakup kontaminasi tanah dan air, gangguan mikroorganisme tanah, serta residu pada hasil panen. Senyawa aktif herbisida dapat

bertahan dalam lingkungan dan mengalami akumulasi sehingga berisiko terhadap kesehatan manusia dan hewan. Studi ekotoksikologi menunjukkan bahwa residu *atrazine* dalam air tanah dapat mengganggu perkembangan amfibi dan biota akuatik lainnya (Liu *et al.*, 2022). Oleh karena itu, penerapan ambang batas maksimum residu (MRL) dan peraturan ketat dalam distribusi herbisida menjadi penting untuk menjamin keamanan pangan dan kelestarian ekosistem.

Penggunaan herbisida juga harus mempertimbangkan keberlanjutan jangka panjang. Konsep *herbicide stewardship* menekankan pentingnya tanggung jawab pengguna dalam memastikan efektivitas jangka panjang dan meminimalkan dampak lingkungan. Pelatihan petani dalam hal kalibrasi alat, waktu aplikasi yang tepat, dan penggunaan herbisida berbasis kebutuhan nyata lapangan sangat diperlukan. Penelitian terbaru juga mendorong pengembangan herbisida berbasis biologi atau formulasi berbasis bahan alami yang lebih ramah lingkungan, seperti ekstrak tumbuhan yang memiliki efek *allelopathy* terhadap gulma (Giorgi *et al.*, 2023).

Pengendalian kimiawi tidak dapat berdiri sendiri tanpa dukungan dari sistem pengelolaan terpadu. Dalam konteks pertanian berkelanjutan, herbisida sebaiknya digunakan sebagai salah satu komponen dalam pendekatan Pengendalian Hama Terpadu (PHT) yang melibatkan teknik kultur teknis, mekanis, hayati, dan pengawasan populasi gulma secara berkala. Kombinasi ini memungkinkan penggunaan herbisida secara rasional, mengurangi ketergantungan, serta menjaga efektivitas dan keberlanjutan produksi pertanian (Singh *et al.*, 2021).

C. Bioteknologi dalam Pengendalian Gulma

Bioteknologi telah memberikan terobosan signifikan dalam upaya pengendalian gulma melalui pendekatan berbasis genetika, molekuler, dan mikrobiologi yang lebih presisi, efisien, serta ramah lingkungan. Dalam konteks ini, bioteknologi berperan dalam mengembangkan tanaman transgenik toleran herbisida, agen hayati pemusnah gulma, dan metode baru yang memanfaatkan rekayasa genetik untuk mengganggu siklus hidup gulma. Perkembangan teknologi ini bertujuan mengurangi ketergantungan pada herbisida sintesis dan meningkatkan keberlanjutan produksi pertanian modern (*Chen et al., 2023*). Pendekatan bioteknologi juga mendukung sistem pertanian presisi melalui integrasi data molekuler dan ekofisiologis dalam pengendalian gulma berbasis spesies dan lokasi.

Salah satu aplikasi bioteknologi paling umum dalam pengendalian gulma adalah pengembangan tanaman transgenik tahan herbisida (*herbicide-tolerant crops*). Tanaman ini dimodifikasi untuk bertahan terhadap herbisida tertentu, memungkinkan petani mengaplikasikan senyawa tersebut untuk membasmi gulma tanpa merusak tanaman utama. Contoh paling terkenal adalah jagung dan kedelai transgenik yang tahan terhadap *glyphosate* maupun *glufosinate*. Ketahanan ini biasanya diperoleh melalui introduksi gen *cp4-EPSPS* dari *Agrobacterium tumefaciens*, yang membuat tanaman tidak terpengaruh oleh mekanisme herbisida tersebut (*Wang et al., 2022*). Teknologi ini tidak hanya meningkatkan efektivitas pengendalian gulma tetapi juga menghemat biaya tenaga kerja dan energi.

Selain itu, bioteknologi juga memfasilitasi produksi bioherbisida berbasis mikroorganisme yang secara spesifik menyerang gulma

target. Bioherbisida merupakan formulasi yang mengandung mikroba patogenik, seperti jamur atau bakteri, yang mampu menginfeksi gulma tanpa membahayakan tanaman budidaya. Contoh yang telah dikomersialisasi adalah *Colletotrichum gloeosporioides* f. sp. *aeschynomene*, yang digunakan untuk mengendalikan *Aeschynomene virginica* pada lahan kedelai (Fernandez et al., 2020). Bioherbisida juga dianggap lebih ramah lingkungan karena dapat terurai secara alami, meskipun tantangan utama dalam penggunaannya adalah stabilitas formulasi dan efektivitas di lapangan.

Rekayasa genetik juga memungkinkan pengembangan teknik baru untuk menghambat pertumbuhan gulma melalui pendekatan berbasis RNA interference (RNAi). Teknologi ini bekerja dengan menonaktifkan gen esensial dalam gulma menggunakan molekul RNA kecil yang dihasilkan oleh tanaman transgenik atau disemprotkan secara eksternal. Teknologi ini sangat menjanjikan untuk pengendalian spesifik-spesies tanpa membahayakan organisme non-target (Zhang et al., 2021). RNAi telah digunakan secara eksperimental untuk menghambat ekspresi gen vital dalam gulma seperti *Amaranthus palmeri*, memberikan alternatif yang sangat selektif dan potensial untuk menggantikan herbisida konvensional.

Bioteknologi juga mendukung pengembangan deteksi dini gulma berbasis biosensor dan penanda molekuler. Penelitian terbaru telah memanfaatkan teknik *metagenomics* dan *genotyping-by-sequencing* untuk mendeteksi resistensi gulma terhadap herbisida dalam tahap awal sebelum muncul secara fenotipik di lapangan. Deteksi dini ini membantu dalam menyusun strategi rotasi herbisida atau integrasi metode pengendalian lainnya sebelum populasi gulma menjadi tidak terkendali (Ortiz et al., 2023).

Pemanfaatan tanaman hasil pemuliaan berbasis *marker-assisted selection* (MAS) juga menjadi bagian penting dalam pengendalian gulma berbasis bioteknologi. Dengan teknik ini, varietas tanaman dapat dikembangkan untuk memiliki daya saing yang lebih tinggi terhadap gulma, seperti kemampuan membentuk kanopi lebih cepat, mengeluarkan senyawa *allelopathy*, atau memiliki sistem akar yang dominan. Hal ini memperkuat interaksi kompetitif tanaman terhadap gulma secara alami dan mengurangi ketergantungan terhadap input eksternal (Gao et al., 2020).

Penggunaan bioteknologi dalam pengendalian gulma memiliki prospek besar tetapi juga menimbulkan beberapa kontroversi dan tantangan. Isu keamanan hayati, regulasi ketat terhadap tanaman transgenik, resistensi baru, serta penerimaan publik menjadi faktor pembatas utama. Oleh karena itu, pemanfaatan bioteknologi harus dilakukan secara hati-hati, berbasis sains, dan dikombinasikan dengan pendekatan integratif seperti Pengendalian Gulma Terpadu (PGT). Ketika dikelola dengan tepat, bioteknologi mampu menjadi solusi jangka panjang yang efektif dalam menghadapi tantangan gulma pada pertanian modern (Li et al., 2023).

D. Gulma Resisten: Masalah dan Solusi

Resistensi gulma terhadap herbisida telah menjadi salah satu tantangan utama dalam pertanian modern. Resistensi ini terjadi ketika populasi gulma mengalami seleksi alam akibat paparan herbisida berulang, sehingga hanya individu yang memiliki gen resisten yang bertahan dan berkembang biak. Fenomena ini menurunkan efektivitas pengendalian kimiawi, meningkatkan biaya produksi, serta memicu ketergantungan terhadap herbisida dengan toksisitas lebih tinggi. Pada skala global, resistensi gulma telah tercatat pada lebih dari 260 spesies

dan berdampak pada berbagai komoditas strategis seperti padi, jagung, dan kedelai (*Heap & Wright, 2023*). Oleh karena itu, pemahaman menyeluruh mengenai mekanisme resistensi dan solusi pengelolaannya menjadi hal yang sangat krusial.

Mekanisme resistensi gulma terhadap herbisida diklasifikasikan ke dalam dua kategori utama, yaitu resistensi target-site dan non-target-site. Resistensi target-site terjadi ketika terdapat mutasi genetik pada enzim sasaran herbisida, sehingga herbisida tidak lagi efektif menghambat fungsi enzim tersebut. Misalnya, mutasi pada gen *ALS* (acetolactate synthase) membuat gulma tidak terpengaruh oleh herbisida golongan ALS-inhibitor. Sementara itu, resistensi non-target-site melibatkan peningkatan detoksifikasi herbisida atau pengurangan penyerapan herbisida ke dalam sel tanaman (*Yu et al., 2022*). Kombinasi dari dua mekanisme ini dapat mempercepat proses evolusi resistensi di lapangan.

Salah satu spesies gulma yang terkenal memiliki resistensi multipel adalah *Amaranthus palmeri*, yang diketahui mampu bertahan terhadap berbagai kelompok herbisida seperti glyphosate, PPO-inhibitor, dan ALS-inhibitor. Spesies ini mengalami duplikasi gen *EPSPS* secara masif, sehingga menghasilkan enzim target dalam jumlah berlebih dan menetralkan efek herbisida (*Gaines et al., 2021*). Studi lain mencatat bahwa *Echinochloa crus-galli* telah menunjukkan resistensi metabolik yang tinggi melalui peningkatan aktivitas enzim cytochrome P450, yang mempercepat degradasi herbisida dalam jaringan tanaman. Hal ini menunjukkan bahwa pendekatan pengendalian harus lebih kompleks dan tidak dapat bergantung pada satu jenis herbisida saja.

Strategi pengelolaan gulma resisten memerlukan pendekatan sistemik berbasis integrasi beberapa metode pengendalian. Rotasi herbisida berdasarkan *mode of action* yang berbeda merupakan strategi utama untuk memperlambat munculnya resistensi. Selain itu, rotasi tanaman dan penanaman varietas kompetitif juga dapat menurunkan tekanan seleksi terhadap gulma. Penggunaan herbisida pra-tumbuh yang berbeda dari herbisida pasca-tumbuh mampu memberikan efek ganda terhadap populasi gulma yang resisten (Nakka *et al.*, 2020). Penggabungan metode kultur teknis dan pengendalian mekanis memperkuat sistem pengelolaan terpadu dalam skema pengendalian gulma.

Deteksi dini terhadap resistensi juga menjadi aspek penting dalam mitigasi penyebaran gulma resisten. Teknologi seperti *molecular marker assay* dan *enzyme activity profiling* memungkinkan identifikasi individu gulma yang memiliki potensi resistensi sebelum mencapai dominansi populasi. Implementasi sistem pemantauan berbasis bioinformatika dan data lapangan secara real-time membantu dalam menyusun strategi adaptif dan site-specific (Pan *et al.*, 2021). Edukasi terhadap petani mengenai rotasi bahan aktif herbisida dan pencatatan riwayat aplikasi sangat penting untuk mencegah akumulasi tekanan seleksi.

Selain pendekatan konvensional, solusi jangka panjang untuk menghadapi gulma resisten adalah melalui pengembangan teknologi inovatif. Teknologi RNA interference (RNAi) dapat digunakan untuk menarget gen spesifik yang menyebabkan resistensi, sementara bioherbisida berbasis mikroba disiapkan sebagai alternatif pengendalian yang tidak memunculkan resistensi serupa. Penelitian terbaru juga mengembangkan tanaman transgenik yang mampu mengeluarkan senyawa *allelopathy* untuk menekan pertumbuhan

gulma secara biologis tanpa intervensi kimia (*Zhang et al., 2023*). Semua strategi ini membutuhkan sinergi lintas bidang dan dukungan kebijakan agraria yang tegas.

Resistensi gulma bukanlah masalah yang berdiri sendiri, melainkan bagian dari dinamika sistem pertanian intensif yang kurang adaptif. Untuk menjawab tantangan ini, diperlukan pergeseran paradigma dari ketergantungan pada input eksternal menuju manajemen berbasis ekosistem dan prinsip keberlanjutan. Hal ini mencakup adopsi sistem pertanian terpadu, peningkatan kapasitas petani dalam pemahaman biologis gulma, serta peran aktif lembaga riset dan penyuluhan dalam transfer teknologi. Dengan demikian, pengendalian gulma resisten tidak hanya menjadi tanggung jawab individual petani, melainkan komitmen kolektif menuju pertanian berketahanan jangka panjang (*Sharma et al., 2022*).

E. Studi Kasus: Strategi Sukses Pengendalian Gulma

Studi kasus menjadi instrumen penting dalam mengevaluasi keberhasilan strategi pengendalian gulma di berbagai ekosistem pertanian. Melalui pendekatan ini, dapat dianalisis praktik terbaik yang terbukti efektif secara teknis, ekonomis, dan ekologis dalam menekan populasi gulma. Strategi sukses umumnya mencakup kombinasi teknik pengendalian kimia, mekanik, hayati, dan kultur teknis yang terintegrasi dalam kerangka *Integrated Weed Management* (IWM). Keberhasilan ini tidak hanya ditentukan oleh teknologi yang digunakan, tetapi juga oleh partisipasi petani, dukungan kebijakan, serta adaptasi terhadap kondisi agroekologi lokal (*Chauhan et al., 2021*).

Salah satu studi kasus yang signifikan datang dari implementasi strategi pengendalian gulma di sistem pertanian konservasi di Brasil bagian selatan. Di sana, petani jagung dan kedelai menghadapi infestasi berat *Conyza bonariensis*, gulma yang resisten terhadap glyphosate. Pendekatan yang diterapkan melibatkan rotasi tanaman dengan gandum musim dingin, penggunaan herbisida pra-tumbuh berbasis saflufenacil, dan pelibatan teknik olah tanah minimal. Strategi ini terbukti menurunkan populasi gulma lebih dari 80% dalam dua musim tanam dan memperlambat evolusi resistensi (Correia et al., 2022).

Studi lain berasal dari India, khususnya di Punjab, yang menghadapi serangan serius dari *Phalaris minor* di lahan padi dan gandum. Pendekatan pengendalian dilakukan dengan mengubah waktu tanam gandum dari akhir November ke pertengahan November, penggunaan herbisida pre-emergence seperti pendimethalin, dan pengenalan varietas gandum yang lebih kompetitif. Petani juga diberikan pelatihan intensif mengenai pengamatan pertumbuhan gulma dan rotasi bahan aktif herbisida. Strategi ini menunjukkan peningkatan hasil panen sebesar 15% dan menurunkan kebutuhan herbisida sebesar 30% (Singh et al., 2020).

Di Australia, sistem pertanian gandum menghadapi ancaman serius dari *Lolium rigidum*, salah satu gulma dengan resistensi paling luas di dunia. Para peneliti dan petani mengembangkan sistem yang disebut *Harvest Weed Seed Control* (HWSC), yaitu teknologi yang menangkap atau menghancurkan benih gulma saat panen. Teknologi ini dipadukan dengan rotasi herbisida dan sistem tanam tanpa olah tanah. Hasilnya, dalam jangka waktu lima tahun, kepadatan benih gulma di tanah menurun drastis, dan resistensi herbisida dapat ditekan secara signifikan (Walsh et al., 2021).

Strategi berbasis bioteknologi juga menunjukkan hasil positif dalam studi kasus pengendalian gulma di Amerika Serikat. Petani menggunakan varietas jagung dan kapas transgenik yang tahan terhadap *dicamba* dan *2,4-D*, memungkinkan rotasi herbisida yang lebih variatif dan mengatasi resistensi *Amaranthus palmeri*. Namun, penerapan ini disertai dengan pengawasan ketat dari lembaga pengatur serta edukasi petani tentang teknik penyemprotan dan pengelolaan penyimpangan (off-target drift) untuk menghindari kerusakan tanaman non-target (Norsworthy et al., 2021).

Di sektor pertanian organik, studi kasus dari Prancis menunjukkan efektivitas pengendalian gulma melalui metode *living mulch* dan rotasi tanaman intensif. Petani menggunakan spesies penutup tanah seperti *Trifolium repens* dan *Vicia villosa* yang ditanam bersamaan dengan tanaman utama seperti brokoli dan wortel. Sistem ini memperkuat kompetisi terhadap gulma dan memperbaiki struktur tanah, tanpa penggunaan bahan kimia. Strategi ini memberikan hasil yang memuaskan dari sisi keberlanjutan dan efisiensi input, meskipun memerlukan pengelolaan agronomis yang lebih kompleks (Verret et al., 2023).

Analisis lintas kasus menunjukkan bahwa strategi pengendalian gulma yang berhasil selalu berbasis pada pemahaman ekologis yang mendalam dan adaptasi teknologi sesuai kebutuhan lokal. Tidak ada satu metode yang dapat diterapkan secara universal. Keberhasilan bergantung pada sinergi antara inovasi teknis, perubahan perilaku petani, dukungan kelembagaan, serta sistem monitoring yang efektif. Studi kasus ini menegaskan bahwa pengendalian gulma yang efektif dan berkelanjutan tidak hanya soal membunuh gulma, tetapi juga mengelola lanskap pertanian secara strategis dan adaptif (Jhala et al., 2022).

F. Rangkuman

Bab ini membahas berbagai pendekatan dalam pengendalian gulma yang efektif, adaptif, dan berkelanjutan. Pendekatan teknik kultur teknis menekankan manipulasi lingkungan tumbuh tanaman, seperti rotasi tanaman, penanaman varietas unggul, jarak tanam, dan teknik minimum tillage untuk menekan pertumbuhan gulma secara alami. Pengendalian kimiawi menggunakan herbisida selektif dan non-selektif, namun menghadapi tantangan berupa resistensi gulma dan dampak ekologis. Bioteknologi menawarkan inovasi melalui tanaman transgenik toleran herbisida, bioherbisida, dan teknologi RNAi yang memungkinkan pengendalian spesifik-spesies. Masalah resistensi gulma dijelaskan melalui dua mekanisme utama, serta strategi rotasi dan integrasi metode pengendalian. Studi kasus dari Brasil, India, Australia, Amerika Serikat, dan Prancis menunjukkan pentingnya pendekatan terpadu, adaptasi lokal, dan partisipasi petani dalam mengelola gulma secara efektif. Bab ini menegaskan bahwa pengendalian gulma tidak hanya bersifat teknis, tetapi juga menuntut pendekatan ekosistem yang adaptif dan kolaboratif.

G. Latihan

Soal

1. Jelaskan bagaimana teknik kultur teknis seperti rotasi tanaman dan penutup tanah dapat menghambat pertumbuhan gulma!
2. Bandingkan herbisida selektif dan non-selektif dari segi mekanisme kerja dan implikasinya terhadap tanaman budidaya!

3. Bagaimana teknologi RNA interference (RNAi) dapat digunakan dalam pengendalian gulma berbasis bioteknologi?
4. Uraikan dua mekanisme utama resistensi gulma terhadap herbisida dan berikan contoh spesifik!
5. Berdasarkan studi kasus di berbagai negara, apa saja faktor kunci keberhasilan strategi pengendalian gulma terpadu?

Jawaban

1. **Rotasi tanaman** mengganggu siklus hidup gulma dengan mengganti jenis tanaman yang memiliki kebutuhan sumber daya berbeda, sehingga menghambat adaptasi gulma. **Tanaman penutup tanah** seperti *Mucuna* dan *Arachis* menekan pertumbuhan gulma melalui efek alelopati dan keteduhan yang mengurangi cahaya pada permukaan tanah, menghambat perkecambahan gulma.
2. **Herbisida selektif** hanya menyerang jenis gulma tertentu dan aman bagi tanaman budidaya, contohnya acetochlor pada jagung. **Herbisida non-selektif**, seperti glyphosate, membunuh semua vegetasi yang disemprot sehingga harus digunakan dengan hati-hati agar tidak merusak tanaman utama.
3. **RNAi bekerja** dengan menghambat ekspresi gen penting dalam gulma melalui molekul RNA kecil. Molekul ini bisa disintesis oleh tanaman transgenik atau disemprotkan, menyebabkan kematian gulma secara spesifik tanpa mengganggu organisme lain. Ini memungkinkan pengendalian yang presisi dan ramah lingkungan.

4. Dua mekanisme resistensi:

- **Target-site resistance:** terjadi karena mutasi pada enzim sasaran herbisida, seperti mutasi pada gen ALS yang membuat herbisida ALS-inhibitor tidak efektif.
- **Non-target-site resistance:** mencakup peningkatan metabolisme detoksifikasi seperti peningkatan aktivitas enzim cytochrome P450. Contoh: *Echinochloa crus-galli* yang memiliki resistensi metabolik tinggi.

5. Faktor kunci keberhasilan:

- Integrasi berbagai teknik pengendalian (kimiawi, teknis, hayati).
- Adaptasi strategi terhadap kondisi agroekologi lokal.
- Pelatihan dan edukasi petani.
- Dukungan regulasi dan kebijakan pertanian.
- Monitoring dan evaluasi efektivitas pengendalian secara berkala.

BAB X

INOVASI DAN TEKNOLOGI MODERN DALAM PERLINDUNGAN TANAMAN

Perkembangan ilmu pengetahuan dan teknologi telah membawa perubahan signifikan dalam strategi perlindungan tanaman. Pendekatan konvensional yang berbasis pada bahan kimia sintetis kini mulai bergeser ke arah inovasi ramah lingkungan dan berkelanjutan. Bab ini membahas pemanfaatan teknologi modern, seperti biopestisida, agen hayati, sensor pintar, serta integrasi data berbasis digital dalam pengelolaan Organisme Pengganggu Tanaman (OPT).

- **Tujuan Pembelajaran**

- Menjelaskan konsep dan manfaat penggunaan biopestisida serta agen hayati dalam perlindungan tanaman.
- Menganalisis peran teknologi penginderaan jauh dan drone dalam sistem monitoring dan aplikasi perlindungan tanaman modern.
- Menguraikan sistem informasi pertanian berbasis data dan kontribusinya dalam manajemen Organisme Pengganggu Tanaman (OPT).
- Mengevaluasi penerapan Artificial Intelligence (AI) dan Machine Learning (ML) dalam Pengendalian Hama Terpadu (PHT).

A. Penggunaan Biopestisida dan Agen Hayati

Biopestisida dan agen hayati telah menjadi elemen penting dalam pendekatan *eco-friendly* dalam pengendalian hama dan penyakit tanaman. Biopestisida berasal dari mikroorganisme seperti *Bacillus thuringiensis*, jamur *Beauveria bassiana*, maupun senyawa metabolit sekunder dari tumbuhan. Keunggulannya terletak pada toksisitas rendah terhadap manusia dan lingkungan serta kemampuannya untuk menargetkan spesies OPT secara spesifik (Alavanja et al., 2022). Selain itu, biopestisida berperan dalam menurunkan risiko resistensi karena mekanisme kerjanya yang kompleks dan berbeda dari pestisida sintesis.

Dalam pengendalian penyakit tanaman, agen hayati seperti *Trichoderma spp.* dan *Pseudomonas fluorescens* berfungsi sebagai antagonis terhadap patogen tanah. Agen hayati mampu bersaing dalam ruang dan nutrisi, memproduksi antibiotik, serta menginduksi ketahanan sistemik pada tanaman inang (Rajput et al., 2023). Efektivitas agen hayati telah dibuktikan dalam berbagai sistem tanam, termasuk padi, sayuran, dan hortikultura. Penerapan mereka secara tepat waktu dan dosis yang sesuai merupakan kunci keberhasilan di lapangan.

Keunggulan dari penggunaan agen hayati juga terletak pada kontribusinya terhadap restorasi mikrobioma tanah. Studi terbaru menunjukkan bahwa aplikasi agen hayati dalam jangka panjang memperkaya keberagaman hayati di zona rizosfer, yang mendukung pertumbuhan tanaman secara keseluruhan (Zhang et al., 2020). Hal ini relevan dengan konsep pertanian regeneratif, yang berupaya menjaga keseimbangan ekosistem melalui intervensi biologis.

Biopestisida komersial terus mengalami peningkatan dalam hal formulasi dan stabilitas produk. Produk seperti *Neem oil*, *Spinosad*, dan *Azadirachtin* kini tersedia dalam bentuk yang lebih stabil terhadap sinar UV dan suhu tinggi. Perkembangan teknologi enkapsulasi memungkinkan pelepasan bahan aktif secara perlahan, sehingga efektivitasnya lebih tahan lama di lapangan (*Marban-Mendoza et al., 2021*). Formulasi modern ini meningkatkan kenyamanan aplikasi bagi petani dan mengurangi frekuensi penyemprotan.

Meski demikian, penggunaan biopestisida dan agen hayati masih menghadapi tantangan teknis dan sosial. Salah satu kendala utama adalah ketergantungan pada kondisi lingkungan seperti suhu dan kelembaban, yang dapat memengaruhi viabilitas mikroba dan stabilitas senyawa aktif (*Yadav et al., 2022*). Selain itu, keterbatasan akses terhadap informasi dan distribusi produk biopestisida berkualitas di tingkat petani kecil menjadi kendala penerapan masif di berbagai negara berkembang.

Pendekatan integratif melalui *Integrated Pest Management* (IPM) dapat mengoptimalkan peran biopestisida dan agen hayati. Dalam kerangka IPM, agen hayati digunakan secara strategis bersama rotasi tanaman, varietas tahan, dan teknik budidaya sehat. Dengan dukungan sistem pemantauan dan evaluasi berbasis data, efektivitasnya dapat ditingkatkan secara signifikan (*Sahoo et al., 2024*). Pelibatan petani dalam pelatihan dan penyuluhan berkelanjutan juga menjadi faktor krusial dalam meningkatkan adopsi teknologi ini.

Secara global, adopsi biopestisida mengalami tren kenaikan. Data dari pasar agrokimia menunjukkan bahwa permintaan biopestisida tumbuh sekitar 14% per tahun sejak 2019. Ini mencerminkan kesadaran akan pentingnya pendekatan berkelanjutan dalam sistem

produksi pertanian. Dukungan kebijakan dan insentif dari pemerintah menjadi katalisator penting agar teknologi biopestisida dan agen hayati menjadi bagian utama dalam sistem pertanian modern yang adaptif terhadap perubahan iklim dan tekanan ekologis (*Fernández-Pavía et al., 2023*).

B. Teknologi Penginderaan Jauh dan Drones

Teknologi *penginderaan jauh* dan penggunaan *drones* telah menjadi terobosan penting dalam sistem perlindungan tanaman modern. Melalui pendekatan ini, petani dan ahli agronomi mampu memantau kondisi pertanaman secara real-time, akurat, dan efisien di berbagai skala lahan. Sensor spektral yang terpasang pada drone atau satelit dapat mendeteksi anomali pertumbuhan tanaman yang mengindikasikan stres akibat serangan Organisme Pengganggu Tanaman (OPT), kekurangan unsur hara, atau gangguan abiotik. Penerapan teknologi ini mengurangi ketergantungan terhadap inspeksi manual yang cenderung memakan waktu dan kurang akurat di lahan berskala besar (*Tripathy et al., 2021*).

Teknologi multispektral dan hiperspektral yang dibawa oleh drone mampu mengidentifikasi gejala penyakit tanaman bahkan sebelum tampak secara visual. Pemetaan *Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)* memungkinkan analisis kesehatan tanaman berdasarkan intensitas pantulan cahaya dari daun. Citra yang dihasilkan memberikan data kuantitatif yang dapat dimanfaatkan untuk diagnosis awal serta pengambilan keputusan pengendalian hama yang lebih cepat dan terukur (*Zhang et al., 2023*). Melalui *machine learning*, pola penyakit atau infestasi hama dapat diprediksi berdasarkan dataset historis dan spasial.

Keunggulan utama dari drone dalam konteks pertanian presisi terletak pada fleksibilitas dan kemampuan manuvernya. Dengan kecepatan terbang rendah dan resolusi tinggi, drone mampu menjangkau area sulit seperti lereng, sawah terasering, atau ladang rawa. Drone juga memungkinkan penyemprotan target terhadap area terdampak saja, sehingga mengurangi penggunaan pestisida secara berlebihan (*Sankaran et al., 2022*). Pendekatan ini membantu menekan biaya produksi sekaligus mendukung keberlanjutan lingkungan pertanian.

Sistem drone modern kini juga dilengkapi dengan kemampuan *real-time kinematic (RTK)* untuk pemetaan presisi tinggi. RTK meningkatkan akurasi posisi drone hingga ke tingkat sentimeter, menjadikannya ideal untuk pemetaan detail blok pertanian atau zona serangan hama spesifik. Kolaborasi antara sensor RGB, termal, dan lidar memungkinkan identifikasi anomali fisiologis seperti kekeringan lokal atau serangan patogen berbasis panas yang sebelumnya sulit dideteksi oleh mata manusia (*Vanegas et al., 2020*).

Selain mendukung pemantauan, drone juga digunakan untuk aplikasi input secara presisi, seperti penyemprotan biopestisida atau pelepasan agen hayati. Teknologi ini mempercepat distribusi input ke titik-titik kritis yang telah dianalisis sebelumnya melalui data penginderaan jauh. Dalam studi lapangan terbaru di kawasan tropis, efisiensi aplikasi pestisida meningkat hingga 40% menggunakan drone dibanding metode konvensional (*López-Granados et al., 2023*). Ini menjadi solusi relevan bagi negara berkembang dengan keterbatasan tenaga kerja pertanian.

Kendala adopsi drone dalam sistem perlindungan tanaman terutama terletak pada biaya awal investasi, keterampilan teknis, serta

regulasi penerbangan sipil yang membatasi area operasional. Meski begitu, kolaborasi antara penyedia layanan agritech dengan koperasi petani mulai menjembatani hambatan ini melalui sistem *drone-as-a-service*. Model ini memungkinkan petani kecil mengakses teknologi mutakhir tanpa harus memiliki alat sendiri (Ramos et al., 2021). Pendidikan dan pelatihan menjadi elemen pendukung penting dalam transformasi ini.

Teknologi penginderaan jauh dan drone memberikan paradigma baru dalam pengelolaan pertanian berbasis data. Dengan keterhubungan data spasial, temporal, dan biologis, perlindungan tanaman kini beralih dari pendekatan reaktif menuju sistem prediktif dan preventif. Hal ini memungkinkan pemetaan risiko serangan OPT dan respons berbasis zona, bukan keseluruhan lahan. Sistem berbasis drone juga membuka potensi kolaborasi lintas sektor seperti meteorologi dan teknologi informasi guna menyusun sistem peringatan dini yang adaptif terhadap dinamika iklim dan musim tanam (Singh et al., 2023).

C. Sistem Informasi Pertanian Berbasis Data

Transformasi digital dalam sektor pertanian telah melahirkan sistem informasi berbasis data yang merevolusi cara petani, peneliti, dan pengambil kebijakan mengelola perlindungan tanaman. Sistem informasi pertanian ini mengintegrasikan berbagai sumber data seperti cuaca, kelembapan tanah, citra satelit, laporan OPT, hingga histori panen dalam satu platform digital yang dapat diakses secara daring maupun luring. Dengan dukungan *Internet of Things* (IoT) dan *cloud computing*, sistem ini memungkinkan pengambilan keputusan yang cepat, berbasis bukti, dan tepat sasaran untuk mencegah serta mengendalikan gangguan terhadap tanaman (Ahmed et al., 2021).

Sistem berbasis data sangat efektif dalam mendeteksi pola dan tren serangan hama atau penyakit tanaman. Dengan mengolah data historis dan real-time menggunakan *big data analytics*, pengguna dapat memetakan wilayah rawan serangan OPT, memprediksi waktu puncak serangan, dan menentukan tindakan mitigasi yang paling sesuai. Analisis prediktif ini memperkuat pendekatan preventif dalam perlindungan tanaman, sehingga mengurangi ketergantungan terhadap respons kimiawi yang bersifat reaktif (Roy et al., 2023). Pemetaan spasial yang dihasilkan juga sangat bermanfaat dalam pengelolaan sumber daya secara efisien.

Penerapan *Decision Support System* (DSS) dalam sistem informasi pertanian merupakan komponen utama yang mendukung perlindungan tanaman berbasis data. DSS menyediakan rekomendasi otomatis tentang penggunaan pestisida, rotasi tanaman, dan penjadwalan penyemprotan berdasarkan algoritma kecerdasan buatan yang terus belajar dari input lapangan. Dengan DSS, petani tidak hanya mengetahui kapan harus melakukan tindakan, tetapi juga mengapa suatu tindakan dibutuhkan. Hal ini mengedukasi petani dalam pengambilan keputusan yang lebih sadar risiko dan ramah lingkungan (Koirala et al., 2022).

Penggunaan aplikasi *mobile-based* yang terhubung ke sistem informasi pertanian turut mendorong inklusi digital petani kecil. Aplikasi semacam itu menyediakan notifikasi dini terhadap ancaman OPT, panduan perlakuan teknis, serta forum tanya jawab interaktif antara petani dan penyuluh pertanian. Di beberapa negara berkembang, sistem ini bahkan terintegrasi dengan data pasar, sehingga petani bisa mengaitkan keputusan teknis dengan pergerakan harga komoditas (Zhou et al., 2023). Digitalisasi ini menciptakan

ekosistem informasi yang holistik dan responsif terhadap dinamika sektor pertanian.

Keberhasilan sistem informasi pertanian berbasis data sangat bergantung pada kualitas dan kontinuitas data yang dikumpulkan. Penggunaan sensor lapangan yang terhubung secara real-time seperti *soil moisture sensors*, *leaf wetness sensors*, dan stasiun cuaca mikro sangat penting dalam menyediakan data granular. Sistem ini juga perlu dibangun dengan interoperabilitas tinggi, agar bisa mengakses dan mengolah data dari berbagai perangkat dan platform secara terpadu (Islam et al., 2022). Tantangan lainnya adalah memastikan keamanan siber dan perlindungan data pribadi pengguna.

Adopsi sistem informasi pertanian ini telah menunjukkan dampak positif dalam beberapa proyek percontohan. Misalnya, di India dan Afrika Timur, penggunaan *Agro-advisory system* berbasis data berhasil menurunkan kerugian panen akibat OPT sebesar 25–40% dalam tiga musim tanam. Di Eropa, proyek *SmartCrop* menggabungkan data satelit dengan model simulasi pertumbuhan tanaman untuk meningkatkan prediksi serangan penyakit seperti hawar daun kentang dan karat gandum (Müller et al., 2020). Data yang terstruktur juga memudahkan evaluasi kebijakan dan perencanaan produksi jangka panjang di tingkat nasional.

Ke depan, pengembangan sistem informasi pertanian berbasis data harus diarahkan pada keterbukaan dan partisipasi multi pihak. Konektivitas antara lembaga riset, pemerintah, pelaku industri agroteknologi, dan komunitas petani akan memperkuat pertukaran pengetahuan serta kolaborasi lintas sektor. Model *open data* dan *data commons* menjadi fondasi untuk inovasi berkelanjutan di bidang perlindungan tanaman. Dengan integrasi antara teknologi, data, dan

pemberdayaan manusia, sistem ini tidak hanya menjawab tantangan produktivitas tetapi juga menciptakan keadilan akses terhadap informasi pertanian modern (*Chen et al., 2023*).

D. Integrasi *Artificial Intelligence* (AI) dan *Machine Learning* (ML) dalam Pengendalian Hama Terpadu (PHT)

Integrasi teknologi *Artificial Intelligence* (AI) dan *Machine Learning* (ML) dalam sistem Pengendalian Hama Terpadu (PHT) telah menjadi tonggak penting dalam modernisasi perlindungan tanaman. PHT yang selama ini mengandalkan pengamatan visual dan pengalaman lapangan, kini didukung oleh sistem cerdas berbasis data yang mampu belajar, menyesuaikan, dan memprediksi ancaman secara otomatis. Teknologi AI dan ML mampu mengolah kumpulan data besar dari citra satelit, sensor tanah, laporan cuaca, hingga kamera lapangan untuk menghasilkan keputusan pengendalian yang presisi dan adaptif (*Naranjo et al., 2021*). Transformasi ini mendorong efisiensi operasional dan keberlanjutan ekologis.

Salah satu penerapan utama AI dalam PHT adalah identifikasi otomatis terhadap spesies hama dan penyakit tanaman. Sistem *deep learning* dapat dilatih untuk mengenali pola visual spesifik dari gejala serangan hama melalui citra daun, batang, atau buah. Model berbasis konvolusional (*Convolutional Neural Networks*) telah digunakan untuk mendeteksi gejala seperti bercak daun, embun jelaga, atau luka serangga dengan akurasi tinggi (*Raza et al., 2022*). Teknologi ini menggantikan proses manual yang memerlukan keahlian khusus dan memakan waktu, sehingga diagnosis menjadi lebih cepat dan objektif.

Selain identifikasi, AI juga digunakan untuk membangun model prediksi waktu dan lokasi serangan OPT. Dengan mengintegrasikan

variabel cuaca, kelembaban tanah, siklus hidup hama, serta data historis serangan, model ML seperti *Random Forest*, *Support Vector Machine*, dan *Long Short-Term Memory Networks* mampu memproyeksikan kapan dan di mana populasi hama akan mencapai ambang ekonomi. Hal ini memungkinkan tindakan pencegahan dilakukan lebih awal, sehingga mengurangi ketergantungan terhadap pestisida kimia (Sethy et al., 2023).

AI juga memperkuat pengambilan keputusan dalam manajemen hama berbasis zona atau wilayah. Melalui *geospatial clustering* dan *decision tree models*, sistem AI dapat menyarankan intervensi spesifik untuk setiap blok lahan berdasarkan tingkat tekanan hama, kondisi vegetasi, dan kapasitas intervensi lokal. Sistem ini mendukung prinsip PHT untuk menghindari pendekatan seragam terhadap seluruh lahan, dan menggantinya dengan strategi mikro-lokal yang lebih efisien dan ekonomis (Rahman et al., 2022). Dengan demikian, aplikasi pestisida dan agen hayati dapat diarahkan hanya pada area yang benar-benar membutuhkan.

Dalam praktik lapangan, AI telah diintegrasikan ke dalam berbagai alat pertanian cerdas seperti *smart sprayers*, *robot pemantau tanaman*, dan sistem drone berbasis navigasi mandiri. Alat-alat ini mampu menjalankan penyemprotan otomatis hanya pada tanaman yang terindikasi terserang hama, berdasarkan analisis visual secara real-time yang dilakukan oleh kamera dan AI *on-board*. Keunggulan sistem ini terletak pada efisiensi penggunaan input dan pengurangan residu pestisida di lingkungan (Wang et al., 2020). AI juga membantu dalam pengelolaan rotasi tanaman dan rekomendasi varietas tahan terhadap serangan spesifik.

Tantangan utama dalam penerapan AI-ML dalam PHT adalah kebutuhan akan data pelatihan berkualitas tinggi, infrastruktur digital yang memadai, dan keterampilan pengguna dalam mengoperasikan sistem. Di banyak daerah agraris, akses terhadap jaringan internet dan perangkat keras masih menjadi hambatan. Oleh sebab itu, pendekatan *edge computing* dan *offline AI modules* menjadi solusi alternatif yang memungkinkan sistem tetap berfungsi meski dalam keterbatasan koneksi (Yu et al., 2021). Inisiatif pelatihan digital bagi petani dan penyuluh menjadi krusial dalam menjembatani kesenjangan adopsi teknologi.

Integrasi AI dan ML dalam PHT menawarkan peluang besar untuk menciptakan sistem pertanian yang adaptif, presisi, dan berkelanjutan. Dengan kemampuan belajar dari waktu ke waktu, sistem ini mampu menyesuaikan rekomendasi berdasarkan perubahan iklim, evolusi resistensi hama, atau dinamika pasar pertanian. Kolaborasi antara ilmuwan data, ahli perlindungan tanaman, dan petani menjadi kunci dalam mengembangkan algoritma yang relevan secara agronomis dan kontekstual. Integrasi ini merupakan langkah strategis menuju pertanian masa depan yang cerdas dan resilien terhadap tantangan global (Zhang et al., 2023).

E. Pertanian Berkelanjutan dan Regeneratif: Masa Depan Perlindungan Tanaman

Pertanian berkelanjutan dan regeneratif telah menjadi paradigma utama dalam merespons krisis lingkungan, degradasi tanah, dan ancaman ketahanan pangan global. Pendekatan ini menekankan keseimbangan antara produktivitas lahan dan kelestarian ekosistem, dengan prinsip dasar bahwa perlindungan tanaman harus mendukung keberlanjutan agroekosistem secara holistik. Perlindungan tanaman

dalam konteks regeneratif bukan hanya sebatas pengendalian Organisme Pengganggu Tanaman (OPT), tetapi juga pemulihan kesuburan tanah, diversifikasi tanaman, dan penguatan sistem ekologi yang resilien terhadap gangguan biotik maupun abiotik (*Montenegro de Wit & Iles, 2021*).

Konsep regeneratif memperluas cakupan pertanian berkelanjutan dengan mengembalikan fungsi ekologi tanah yang terdegradasi melalui pendekatan biologis. Diversifikasi tanaman dengan pola *polyculture*, *crop rotation*, dan integrasi ternak mendukung peningkatan populasi musuh alami OPT, memutus siklus hidup hama, dan mengurangi ketergantungan terhadap input eksternal seperti pestisida sintesis. Sistem ini memanfaatkan dinamika ekosistem untuk menjaga kesehatan tanaman secara alami, yang pada akhirnya memperkuat daya tahan tanaman terhadap serangan hama dan penyakit (*LaCanne & Lundgren, 2022*).

Perlindungan tanaman dalam sistem regeneratif sangat bergantung pada mikroorganisme tanah dan biodiversitas. Komunitas mikrobial yang sehat, seperti *Trichoderma spp.*, *Bacillus spp.*, dan *Arbuscular Mycorrhizal Fungi* (AMF), memainkan peran penting dalam menghambat patogen, meningkatkan penyerapan nutrisi, dan merangsang sistem ketahanan tanaman (*de Souza et al., 2021*). Praktik seperti pengomposan, aplikasi pupuk organik, dan *mulching* mendukung populasi mikroorganisme ini serta mengoptimalkan fungsi biologis tanah sebagai barisan pertama perlindungan tanaman.

Salah satu aspek penting dalam perlindungan tanaman regeneratif adalah *ecological pest management* (EPM), yakni pengendalian hama berbasis ekologi. Pendekatan ini menekankan penciptaan habitat fungsional bagi predator alami dan parasitoid melalui penanaman jalur

bunga, pagar hijau, dan koridor ekosistem di sekitar lahan. Studi menunjukkan bahwa peningkatan keanekaragaman hayati di sekitar lahan dapat menurunkan populasi hama secara signifikan tanpa perlu intervensi kimia (Dainese et al., 2019). EPM juga memfasilitasi penyeimbangan populasi dalam rantai trofik pertanian yang stabil.

Dalam praktiknya, sistem pertanian regeneratif juga mengandalkan varietas lokal yang adaptif terhadap tekanan lingkungan dan memiliki ketahanan alami terhadap OPT. Benih lokal yang dikembangkan melalui seleksi alami atau *participatory breeding* memiliki daya saing lebih tinggi dalam sistem pertanian rendah input. Selain itu, praktik seperti olah tanah minimum, tanam penutup (*cover crop*), dan pengelolaan air berkelanjutan memperkuat kesehatan fisik tanah serta mengurangi peluang berkembangnya penyakit tular tanah (Basche et al., 2020). Semua praktik ini mendukung intervensi non-kimia dalam perlindungan tanaman secara sistemik.

Keberhasilan sistem regeneratif dalam perlindungan tanaman sangat ditentukan oleh pengetahuan lokal, partisipasi komunitas, dan pemantauan agroekologi berkelanjutan. Sistem ini bukan sekadar penerapan teknologi, melainkan transformasi cara pandang petani terhadap fungsi lahan dan hubungannya dengan alam. Pendidikan petani, pelibatan komunitas lokal, serta dukungan kelembagaan menjadi penentu dalam mendorong adopsi pertanian regeneratif secara luas (Giller et al., 2021). Kolaborasi lintas disiplin antara agronomi, ekologi, dan sosiologi sangat penting dalam membentuk strategi perlindungan tanaman yang kontekstual dan berdaya jangka panjang.

Pertanian regeneratif bukan hanya jalan keluar dari ketergantungan pestisida dan degradasi tanah, tetapi juga masa depan perlindungan tanaman yang berpihak pada keadilan ekologi dan

ketahanan pangan. Sistem ini menuntut pendekatan sistemik, jangka panjang, dan terintegrasi dengan dinamika sosial-ekonomi petani. Dengan memperkuat ekosistem pertanian sebagai pertahanan utama terhadap OPT, pertanian regeneratif mendorong munculnya lanskap pangan yang sehat, adil, dan resilien terhadap perubahan iklim global (Schreefel et al., 2022).

F. Rangkuman

Bab ini membahas perkembangan inovasi dalam perlindungan tanaman yang berfokus pada pendekatan ramah lingkungan dan berbasis teknologi. Penggunaan **biopestisida dan agen hayati** menawarkan solusi yang aman dan spesifik terhadap OPT serta meningkatkan kualitas mikrobioma tanah. Teknologi **penginderaan jauh dan drone** memberikan kemampuan pemantauan presisi dan aplikasi input berbasis data. Sistem **informasi pertanian berbasis data** mendukung pengambilan keputusan yang efisien dan prediktif melalui integrasi big data dan sensor. **AI dan Machine Learning** mengubah strategi PHT dari yang reaktif menjadi adaptif dan presisi melalui deteksi visual otomatis dan model prediktif. Akhirnya, pendekatan **pertanian regeneratif** menekankan prinsip ekologi dalam pengendalian OPT melalui diversifikasi tanaman, mikroorganisme tanah, dan praktik konservasi lahan yang holistik. Seluruh inovasi ini mendukung sistem pertanian berkelanjutan, adaptif terhadap perubahan iklim, dan berorientasi pada keadilan ekologis.

G. Latihan

Soal

1. Jelaskan keunggulan biopestisida dan agen hayati dibandingkan pestisida sintetis dalam sistem perlindungan tanaman modern!
2. Bagaimana teknologi drone dan sensor penginderaan jauh dapat meningkatkan efisiensi pengendalian OPT di lapangan?
3. Uraikan peran sistem informasi pertanian berbasis data dalam mendukung pengambilan keputusan preventif terhadap serangan OPT!
4. Deskripsikan bagaimana AI dan Machine Learning diintegrasikan dalam Pengendalian Hama Terpadu dan dampaknya terhadap efisiensi penggunaan input!
5. Apa yang dimaksud dengan pertanian regeneratif, dan bagaimana pendekatan ini memperkuat sistem perlindungan tanaman yang berkelanjutan?

Jawaban

1. **Biopestisida dan agen hayati** memiliki toksisitas rendah terhadap lingkungan dan manusia serta mampu menargetkan spesies OPT secara spesifik. Mereka juga memperkaya biodiversitas mikroba tanah dan mengurangi risiko resistensi, berbeda dengan pestisida sintetis yang sering bersifat non-spesifik dan berdampak negatif terhadap ekosistem.

2. **Teknologi drone dan sensor penginderaan jauh** memungkinkan pemantauan kondisi tanaman secara real-time dan presisi, mendeteksi gejala stres atau serangan OPT lebih awal melalui citra multispektral dan NDVI. Drone juga dapat digunakan untuk aplikasi input secara tepat sasaran, sehingga mengurangi pemborosan dan dampak lingkungan.
3. **Sistem informasi pertanian berbasis data** mengintegrasikan berbagai sumber informasi (cuaca, kelembaban tanah, citra satelit, histori OPT) ke dalam platform digital. Sistem ini menggunakan big data analytics dan Decision Support System untuk memberikan rekomendasi berbasis bukti dan meningkatkan ketepatan waktu tindakan perlindungan tanaman.
4. **AI dan Machine Learning** digunakan dalam PHT untuk mengenali pola gejala serangan hama secara otomatis melalui citra visual dan memprediksi waktu serta lokasi serangan berdasarkan data lingkungan. Ini memungkinkan tindakan pengendalian dilakukan secara presisi, hanya pada area yang membutuhkan, sehingga menghemat biaya dan mengurangi dampak negatif pestisida.
5. **Pertanian regeneratif** adalah pendekatan yang berfokus pada pemulihan ekosistem tanah dan keanekaragaman hayati untuk mendukung produktivitas tanaman secara berkelanjutan. Sistem ini mengandalkan mikroorganisme tanah, rotasi tanaman, habitat musuh alami OPT, dan konservasi lahan untuk menciptakan sistem perlindungan tanaman yang alami dan adaptif terhadap perubahan lingkungan.

DAFTAR PUSTAKA

- Ali, A., Ahmad, M., & Afzal, M. (2020). Classification and management strategies for insect pests in tropical cropping systems. *Journal of Asia-Pacific Entomology*, 23(4), 1011–1021. <https://doi.org/10.1016/j.aspen.2020.07.004>
- Ali, H., Ahmed, S., & Khan, K. A. (2020). Impact of synthetic pesticides on agricultural ecosystem and pest resistance: A review. *Journal of Environmental Management*, 265, 110508. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110508>
- Ali, H., Khan, E., & Ilahi, I. (2020). Environmental chemistry and ecotoxicology of hazardous heavy metals: Environmental persistence, toxicity, and bioaccumulation. *Journal of Chemistry*, 2020, 1–14. <https://doi.org/10.1155/2020/6730304>
- Ali, M. A., Afzal, M., & Jan, F. G. (2021). Root-knot nematode (*Meloidogyne* spp.): Mechanisms of parasitism and host defense strategies. *Plant Pathology Journal*, 37(4), 291–305. <https://doi.org/10.5423/PPJ.OA.02.2021.0038>
- Ali, R., Khan, M. A., Hussain, I., & Abbas, A. (2024). Role of cultural practices in sustainable weed management under climate change. *Agronomy for Sustainable Development*, 44(1), 14. <https://doi.org/10.1007/s13593-024-00907-z>
- Alsharif, W., Ahmad, P., & Hu, X. (2022). Phosphorus nutrition and abiotic stress tolerance in plants. *Plant Physiology and Biochemistry*, 171, 90–102. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2021.12.020>

- Alves, D. A., Pereira, R. A., & Silva, R. M. (2021). Fruit bat damage in tropical agroecosystems: Ecological trade-offs and mitigation strategies. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 313, 107380. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2021.107380>
- Andrade, E. C., dos Santos, C. A. B., & da Silva, M. M. (2022). *Impacts of global warming on insect pest dynamics: A modeling approach*. *Journal of Applied Entomology*, 146(3), 312–322. <https://doi.org/10.1111/jen.12952>
- Araya, H. T., Gashaw, T., & Mulu, H. (2022). Root system architecture of dryland weeds and their competitive advantage over crops. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 68(2), 231–243. <https://doi.org/10.1080/03650340.2021.1883623>
- Backer, R., Rokem, J. S., Ilangumaran, G., Lamont, J., Praslickova, D., Ricci, E., ... & Smith, D. L. (2018). Plant growth-promoting rhizobacteria: Context, mechanisms of action, and roadmap to commercialization of biostimulants for sustainable agriculture. *Frontiers in Plant Science*, 9, 1473. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.01473>
- Bahlai, C. A., Zipkin, E. F., & Landis, D. A. (2021). *Predicting insect phenology across geographic regions using degree day models*. *Ecological Modelling*, 440, 109379. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2020.109379>
- Bailey, S. E. R., Carvalho, G. R., & Ross, H. (2019). *The ecology and control of molluscan pests in tropical agriculture*. *Crop*

- Protection, **126**, 104919.
<https://doi.org/10.1016/j.cropro.2019.104919>
- Bajwa, A. A., Jabran, K., & Peerzada, A. M. (2022). Ecology, biology and management of *Ageratum conyzoides* (L.): A review. *Weed Research*, **62**(1), 1–14.
<https://doi.org/10.1111/wre.12509>
- Bajwa, A. A., Mahajan, G., & Chauhan, B. S. (2021). Understanding the habitat preferences of invasive weed species to manage their spread. *Plants*, **10**(8), 1524.
<https://doi.org/10.3390/plants10081524>
- Baker, K. F., Cook, R. J., & Mellano, V. J. (2020). Soil solarization and integrated management of soilborne pests: Recent advances and innovations. *Crop Protection*, **133**, 105149.
<https://doi.org/10.1016/j.cropro.2020.105149>
- Bamisile, B. S., Dash, C. K., Akutse, K. S., Keppanan, R., & Wang, L. (2021). Sustainable use of entomopathogenic fungi in integrated pest management: Advances and perspectives. *Microbiological Research*, **242**, 126595.
<https://doi.org/10.1016/j.micres.2020.126595>
- Barbedo, J. G. A., Koenigkan, L. V., & Santos, T. T. (2021). Automatic detection of nutrient deficiencies in soybean plants using CNNs. *Computers and Electronics in Agriculture*, **180**, 105862. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105862>
- Barber, N. A., Maron, J. L., & Kessler, A. (2022). Chemical control and its unintended effects on ecosystem services. *Ecological Applications*, **32**(1), e02489. <https://doi.org/10.1002/eap.2489>

- Barrera, L. A., Gómez-Rodríguez, C., & Castillo, F. (2022). Bioformulations in crop protection: A sustainable alternative to synthetic pesticides. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 70(12), 3546–3560. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.1c07035>
- Barros, R., Alvarez, J. M., & Chocobar, J. A. (2023). Invasive species in agroecosystems: The global spread of *Tuta absoluta*. *Crop Protection*, 168, 106564. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2023.106564>
- Barroso, J., Fernández-Quintanilla, C., & Dorado, J. (2020). Weed species composition as an indicator of soil management effects in Mediterranean cereal systems. *Agronomy*, 10(3), 343. <https://doi.org/10.3390/agronomy10030343>
- Barua, D., Bose, S., & Chattopadhyay, A. (2021). Host-pathogen interaction and virulence factor-based defense strategy in bacterial leaf blight of rice. *Archives of Phytopathology and Plant Protection*, 54(11–12), 913–930. <https://doi.org/10.1080/03235408.2021.1882752>
- Basche, A. D., Kaspar, T. C., & Archontoulis, S. V. (2020). Soil health and ecosystem services: Lessons from long-term agroecosystem experiments. *Agricultural Systems*, 184, 102902. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2020.102902>
- Baur, B., Rueda, A., & Hatteland, B. A. (2023). *Biological control of terrestrial molluscs: Current status and future prospects*. *Pest Management Science*, 79(1), 45–56. <https://doi.org/10.1002/ps.7143>

- Bebber, D. P., Holmes, T., & Gurr, S. J. (2021). The global spread of crop pests and pathogens with international trade. *Global Change Biology*, 27(5), 1005–1015. <https://doi.org/10.1111/gcb.15485>
- Belles, X. (2021). *Insect metamorphosis: From natural history to regulation of development and evolution*. Annual Review of Entomology, 66, 277–296. <https://doi.org/10.1146/annurev-ento-031620-090413>
- Benítez, A., Santín-Montanyá, M. I., & Torralba, M. (2022). Weeds as indicators of land health in regenerative farming systems. *Agricultural Systems*, 195, 103299. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2021.103299>
- Bennett, A. J., Bianchi, F. J. J. A., & Schellhorn, N. A. (2022). Harnessing biodiversity to manage pests and enhance resilience in agricultural systems. *Biological Reviews*, 97(2), 555–577. <https://doi.org/10.1111/brv.12813>
- Berthier, K., Chapuis, M. P., & Simpson, S. J. (2022). *Desert locust invasions: Physiology, ecology, and control implications*. Current Opinion in Insect Science, 50, 100885. <https://doi.org/10.1016/j.cois.2022.100885>
- Bhandari, G., Atreya, K., Yang, X., Fan, L., & Geissen, V. (2020). Factors affecting pesticide safety behaviour among smallholder farmers in Nepal. *Environmental Research*, 185, 109095. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.109095>
- Bianchi, F. J. J. A., van der Werf, W., & Werf, J. H. J. (2020). Loss of natural enemies due to land use change increases pest

outbreak risk. *Ecological Applications*, 30(3), e02070.
<https://doi.org/10.1002/eap.2070>

Cao, Y., Wang, J., & Liu, H. (2021). Appressorium-mediated infection and virulence in *Magnaporthe oryzae*. *Molecular Plant Pathology*, 22(2), 155–167.
<https://doi.org/10.1111/mpp.13011>

Chakraborty, A., Roy, S., & Banerjee, S. (2020). Synergistic use of insecticides and parasitoids for integrated pest management in rice. *Crop Protection*, 132, 105106.
<https://doi.org/10.1016/j.cropro.2020.105106>

Chapman, A. D. (2022). *Structure and function of insect anatomy: Implications for pest management*. *Entomological Research*, 52(4), 210–223. <https://doi.org/10.1111/1748-5967.12523>

Chaudhary, S., Jat, M. L., Sapkota, T. B., & Stirling, C. (2023). Conservation agriculture and weed suppression: A global meta-analysis. *Field Crops Research*, 297, 108923.
<https://doi.org/10.1016/j.fcr.2023.108923>

Chen, G., Liu, X., & Zhao, L. (2020). Effects of increasing weed density on nutrient uptake by rice and wheat in co-cultivation systems. *Field Crops Research*, 250, 107775.
<https://doi.org/10.1016/j.fcr.2020.107775>

Chen, H., Chen, L., & Gao, Y. (2022). Low-cost mass production and field deployment of behavioral traps in integrated pest management: A review. *Agricultural Systems*, 197, 103364.
<https://doi.org/10.1016/j.agsy.2021.103364>

- Chen, H., Zhang, Y., & Zhao, W. (2023). Application of artificial intelligence in plant protection: From identification to decision support. *Computers and Electronics in Agriculture*, 206, 107617. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2023.107617>
- Chen, J., Zhang, C., & Gao, Y. (2023). Open data platforms in agriculture: A systematic review and framework. *Computers and Electronics in Agriculture*, 204, 107463. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2023.107463>
- Chen, L., Li, J., & Zhou, Q. (2020). Avian pest deterrent technologies in cereal crops: Efficacy and environmental implications. *Crop Protection*, 137, 105311. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2020.105311>
- Chen, Q., Li, H., & Sun, C. (2022). CRISPR/Cas9 for the development of disease-resistant crops: Recent advances and future prospects. *Frontiers in Plant Science*, 13, 897638. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.897638>
- Chen, X., Wang, L., & Zhang, H. (2023). Biotechnology applications in plant disease management: Resistance genes and genome editing. *Frontiers in Plant Science*, 14, 1187310. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1187310>
- Chen, Y., Zhang, J., Zhou, H., & Liu, Y. (2023). Advances in biotechnological approaches for weed management in crops. *Biotechnology Advances*, 63, 108099. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2023.108099>
- Chen, Y., Zhu, Y., & Xu, L. (2023). Integrated diagnosis of plant bacterial diseases using 16S rRNA gene sequencing and

traditional methods. *Plant Disease*, 107(5), 1330–1339. <https://doi.org/10.1094/PDIS-08-22-1884-RE>

Chen, Z., Wu, Q., Zhang, Z., Liu, Z., & Yang, C. (2023). Potassium nutrition and plant stress tolerance: Functions and mechanisms. *Plant Physiology and Biochemistry*, 197, 107581. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2023.107581>

Cho, Y., Park, J., & Lee, H. (2021). Predator loss and trophic cascade effects in managed agroecosystems. *Journal of Applied Ecology*, 58(2), 287–296. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.13731>

Choudhury, R. A., Roy, S., & Das, D. (2022). A drone and machine learning-based precision weed management system for rice fields. *Computers and Electronics in Agriculture*, 197, 106939. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2022.106939>

Choudhury, S., Panda, S. K., & Khan, M. H. (2022). Role of phytochelatin and metallothionein in metal stress tolerance in plants: Current perspectives. *Plant Cell Reports*, 41, 1371–1387. <https://doi.org/10.1007/s00299-022-02888-0>

Chowdhury, S., Basak, R., & Goswami, A. (2022). Neem-based formulations and their synergism with biocontrol agents in pest management. *Environmental Science and Pollution Research*, 29, 4567–4579. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-15799-6>

Correia, N. M., Santos, J. B., & Oliveira, R. S. (2022). Weed management strategies in glyphosate-resistant *Conyza* spp.

- Weed Science*, 70(3), 329–337.
<https://doi.org/10.1017/wsc.2022.26>
- Costa, J. M., Grant, O. M., & Chaves, M. M. (2020). Thermography to explore plant–environment interactions. *Journal of Experimental Botany*, 71(13), 3937–3948.
<https://doi.org/10.1093/jxb/eraa204>
- Cramer, G. R., Urano, K., Delrot, S., Pezzotti, M., & Shinozaki, K. (2021). Effects of abiotic stress on plants: A systems biology perspective. *BMC Plant Biology*, 21, 238.
<https://doi.org/10.1186/s12870-021-03061-y>
- Cruz, R. A., Silva, L. A., & Costa, M. A. (2023). Environmental and toxicological impacts of glyphosate: A critical review. *Science of the Total Environment*, 886, 163804.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.163804>
- da Silva, R. R., Souza, G. D., & Viana, R. S. (2022). Spatial distribution and classification of weed habitats using remote sensing and GIS. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 110, 102798.
<https://doi.org/10.1016/j.jag.2022.102798>
- Dainese, M., Martin, E. A., Aizen, M. A., et al. (2019). A global synthesis reveals biodiversity-mediated benefits for crop production. *Science Advances*, 5(10), eaax0121.
<https://doi.org/10.1126/sciadv.aax0121>
- de Boer, I. M., Wilting, H. C., & Stehfest, E. (2021). Sustainability of plant protection: A social and economic assessment.

Agricultural Systems, 187, 103019.
<https://doi.org/10.1016/j.agsy.2020.103019>

De Oliveira, C. M., Lopes, R. B., & Silva, R. A. (2023). *Behavioral ecology of insect herbivores: Applications for pest control in agroecosystems*. *Journal of Pest Science*, **96**(2), 423–437.
<https://doi.org/10.1007/s10340-023-01577-0>

De Palma, A., Kuhlmann, F., & Roberts, S. P. M. (2022). Ecology and conservation of natural enemies in changing agricultural landscapes. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 330, 107889. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2022.107889>

de Souza, R., Ambrosini, A., & Passaglia, L. M. P. (2021). Plant growth-promoting bacteria as inoculants in agricultural soils. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 295, 106841. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2020.106841>

Deutsch, C. A., Tewksbury, J. J., Tigchelaar, M., Battisti, D. S., Merrill, S. C., Huey, R. B., & Naylor, R. L. (2022). Increase in crop losses to insect pests in a warming climate. *Science*, 361(6405), 916–919. <https://doi.org/10.1126/science.aat3466>

Devkota, P., Norsworthy, J. K., & Barber, L. T. (2020). Influence of temperature and soil moisture on herbicide efficacy and crop safety. *Weed Technology*, 34(4), 580–590. <https://doi.org/10.1017/wet.2020.35>

Dietzgen, R. G., Mann, K. S., & Johnson, K. N. (2020). Plant virus–insect vector interactions: Current and potential future research directions. *Viruses*, 12(2), 123. <https://doi.org/10.3390/v12020123>

- Dwiastuti, S., Nurcahyo, D., & Suryanto, H. (2022). Ecological competition among rodent species in rice-based farming systems. *Journal of Pest Science*, 95(3), 845–856. <https://doi.org/10.1007/s10340-021-01435-9>
- Early, R., González-Moreno, P., & Lobo, J. M. (2021). Climate change and the future distribution of agricultural pests. *Global Ecology and Biogeography*, 30(8), 1562–1576. <https://doi.org/10.1111/geb.13314>
- El-Naggar, A., Lee, S. S., Rinklebe, J., Farooq, M., Song, H., Sarmah, A. K., ... & Tsang, D. C. W. (2020). Biochar application to low fertility soils: A review of current status, and future prospects. *Geoderma*, 337, 536–554. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.09.034>
- El-Sayed, A. M., Suckling, D. M., & Wearing, C. H. (2020). Development of pheromone and kairomone-based trapping strategies for insect pest management. *Journal of Chemical Ecology*, 46, 847–865. <https://doi.org/10.1007/s10886-020-01183-4>
- Faghihi, J., Ferris, H., & Westerdahl, B. B. (2020). Integrated molecular and morphological approaches to the identification of plant parasitic nematodes. *Nematology*, 22(3), 267–278. <https://doi.org/10.1163/15685411-00003353>
- Fatouros, N. E., Cusumano, A., Danchin, E. G. J., & Colazza, S. (2021). Prospects of herbivore egg-killing plant defenses for sustainable crop protection. *Ecological Applications*, 31(6), e02347. <https://doi.org/10.1002/eap.2347>

- Fernandes, R. B., Costa, F., & Oliveira, J. T. (2023). Conservation challenges of reptiles in agricultural landscapes. *Conservation Science and Practice*, 5(4), e12972. <https://doi.org/10.1111/csp2.12972>
- Fernandez, J. A., Charudattan, R., & Bauske, E. M. (2020). Commercialization of bioherbicides: Challenges and opportunities. *Pest Management Science*, 76(4), 1178–1184. <https://doi.org/10.1002/ps.5686>
- Fernández-Pavía, S. P., Guzmán-Franco, A. W., & García-Sánchez, L. (2023). Biopesticides in sustainable agriculture: Challenges and perspectives. *Journal of Environmental Management*, 336, 117611. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.117611>
- Fernando, E. S., Javier, J. C., & Lim, A. (2023). Community-based owl breeding program and its impact on rice pest control in Southeast Asia. *Biological Control*, 185, 105137. <https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2023.105137>
- Fiorini, A., Gerhards, R., & Walter, A. (2020). Rapid assessment of soil acidity through weed indicator species in smallholder farming systems. *Ecological Indicators*, 111, 105976. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.105976>
- França, B. M., Almeida, J. F., & Silva, D. V. (2023). Combining visual repellents and pheromone traps to manage *Tuta absoluta*. *Crop Protection*, 166, 106347. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2022.106347>
- Furlong, M. J., Wright, D. J., & Dossall, L. M. (2023). Managing resistance in agricultural pests: Challenges and opportunities.

- Annual Review of Entomology*, 68, 1–22.
<https://doi.org/10.1146/annurev-ento-021922-094158>
- Gaines, T. A., Duke, S. O., Morran, S., Rigon, C. A. G., Tranel, P. J., Küpper, A., & Dayan, F. E. (2021). Mechanisms of evolved herbicide resistance. *Journal of Biological Chemistry*, 296, 100010. <https://doi.org/10.1074/jbc.REV120.013572>
- Gao, J., Wang, R., Chen, L., & Sun, C. (2020). Marker-assisted selection in weed-competitive rice breeding: Progress and prospects. *Crop Science*, 60(4), 1965–1974. <https://doi.org/10.1002/csc2.20185>
- García-Robledo, C., Kuprewicz, E. K., & Kress, W. J. (2022). *Morphological and molecular tools for rapid insect pest identification in tropical agroecosystems*. *Biological Control*, **168**, 104873. <https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2022.104873>
- Ghosh, R., & Roy, B. (2021). Leaf architecture and growth advantage of *Bidens pilosa* under interspecific competition. *Plant Physiology Reports*, 26(1), 129–137. <https://doi.org/10.1007/s40502-020-00544-4>
- Ghosh, S., Das, R., & Senapati, P. (2022). Asynchronous planting as an ecological strategy for vertebrate pest suppression. *Ecological Indicators*, 136, 108656. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2022.108656>
- Ghosh, S., Kumar, R., & Dutta, S. (2021). Impact of delayed weed management on rice yield under SRI practices. *Agricultural*

Research, 10(4), 541–549. <https://doi.org/10.1007/s40003-020-00505-5>

Ghosh, S., Sarkar, S., & Rakshit, A. (2023). Role of precision nutrient management in sustainable crop production. *Sustainable Agriculture Reviews*, 61, 27–45. https://doi.org/10.1007/978-3-030-98937-0_2

Giller, K. E., Witter, E., Corbeels, M., & Tittonell, P. (2021). Conservation agriculture and smallholder farming in Africa: The heretics' view. *Field Crops Research*, 261, 108034. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2020.108034>

Giorgi, V., Oliva, M., & Domínguez-Valencia, A. (2023). Allelopathic plants and their secondary metabolites as natural herbicides: Current trends and perspectives. *Journal of Environmental Management*, 337, 117709. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.117709>

González-Cabrera, J., Herrero, S., & Farinós, G. P. (2021). *Gut physiology of Spodoptera frugiperda and its relevance to Bt toxin action and resistance*. *Insect Biochemistry and Molecular Biology*, 135, 103590. <https://doi.org/10.1016/j.ibmb.2021.103590>

González-Miqueo, L., Rivas, F., & García, A. (2022). Transitioning to ecological pest management: Policy frameworks and farmer adoption. *Environmental Science & Policy*, 128, 110–119. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2021.11.013>

Grzywacz, D., Rossbach, A., & Leach, M. (2023). Landscape management for pest control: Integrating agroecological

- practices. *Agronomy for Sustainable Development*, 43, 27.
<https://doi.org/10.1007/s13593-023-00847-1>
- Gupta, A., Singh, R. B., & Yadav, V. (2021). Plant-pathogen interactions and disease resistance mechanisms: Recent advances. *Frontiers in Plant Science*, 12, 672532.
<https://doi.org/10.3389/fpls.2021.672532>
- Gupta, B., Huang, B., & Khan, M. I. R. (2020). Water stress-induced changes in stomatal behavior and photosynthesis. *Physiology and Molecular Biology of Plants*, 26, 1395–1403.
<https://doi.org/10.1007/s12298-020-00831-1>
- Gupta, R., Pandey, B. K., & Singh, P. K. (2023). Emerging fungal diseases and their impact on global food security. *Current Fungal Infection Reports*, 17(1), 45–59.
<https://doi.org/10.1007/s12281-023-00422-9>
- Gurr, G. M., Wratten, S. D., & Snyder, W. E. (2022). Time in pest management: Integrating temporal dimensions in IPM models. *Trends in Ecology & Evolution*, 37(1), 3–13.
<https://doi.org/10.1016/j.tree.2021.08.007>
- Handika, R. A., Suhartono, D., & Arifin, B. (2021). Enhancing owl populations through artificial nests for sustainable pest control in rice fields. *Sustainability*, 13(17), 9805.
<https://doi.org/10.3390/su13179805>
- Harper, J. M., Jones, K. A., & Patel, R. (2021). Sensory-based deterrents for avian pests: Insights into predator mimicry. *Pest Management Science*, 77(10), 4645–4653.
<https://doi.org/10.1002/ps.6404>

- Harrison, R. D., Gibson, J., & Power, A. G. (2020). Ecological approaches to sustainable pest management: Lessons from tropical agroecosystems. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 51, 125–147. <https://doi.org/10.1146/annurev-ecolsys-012420-092252>
- He, Y., Zhang, Y., & Chen, Y. (2020). Macronutrient and micronutrient interactions and their effects on plant health and development. *Frontiers in Plant Science*, 11, 600556. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.600556>
- Heap, I., & Duke, S. O. (2021). Overview of herbicide-resistant weeds worldwide. *Pest Management Science*, 77(7), 3029–3035. <https://doi.org/10.1002/ps.6370>
- Heap, I., & Wright, T. R. (2023). Global trends in herbicide resistance and implications for agriculture. *Crop Protection*, 168, 106582. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2023.106582>
- Heap, I., Duke, S. O., & Powles, S. B. (2022). Global economic impact of herbicide-resistant weeds. *Pest Management Science*, 78(4), 1245–1254. <https://doi.org/10.1002/ps.6789>
- Hokkanen, H. M. T., Menzler-Hokkanen, I., & Hajek, A. E. (2021). Conceptual models of pest damage: From triangle to pentagon. *Integrated Pest Management Reviews*, 26(3), 281–294. <https://doi.org/10.1007/s11892-021-09480-5>
- Hu, X., Lu, Y., & Wu, K. (2022). *Chemical ecology of rice planthoppers: Semiochemical-mediated host location and mate finding*. *Pest Management Science*, 78(2), 543–551. <https://doi.org/10.1002/ps.6615>

- Huang, X., Zhang, Z., & Zhang, Q. (2020). Nutrient management strategies in response to microelement deficiencies in soil. *Soil and Tillage Research*, 199, 104581. <https://doi.org/10.1016/j.still.2020.104581>
- Huang, Y., Zhang, Z., & Li, Z. (2022). Biological control in agroecosystems: The role of predator-prey interactions. *Biological Control*, 169, 104901. <https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2022.104901>
- Hughes, A. C., Van Bodegom, P. M., & Liang, Z. (2023). Pesticide-induced trophic cascades in agroecosystems. *Environmental Pollution*, 320, 121006. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.121006>
- Iqbal, N., Khan, M. I. R., & Ashraf, M. (2022). Physiological adaptations of *Portulaca oleracea* to water stress: Implications for weed-crop competition. *Journal of Plant Physiology*, 275, 153752. <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2022.153752>
- Islam, M. M., Hasan, M. M., & Li, X. (2022). IoT-based smart agriculture: A review and future directions. *Computer Standards & Interfaces*, 82, 103612. <https://doi.org/10.1016/j.csi.2022.103612>
- Isman, M. B., Grieneisen, M. L., & Lu, Z. (2021). Integrated pest management (IPM): Current status and future prospects. *Pest Management Science*, 77(5), 2145–2154. <https://doi.org/10.1002/ps.6302>

- Jacob, J., Singleton, G. R., & Herawati, N. A. (2021). Resistance of rodents to anticoagulant rodenticides: A growing challenge. *Pest Management Science*, 77(12), 5826–5833. <https://doi.org/10.1002/ps.6555>
- Jallow, M. F. A., Albano, J., & Fadamiro, H. Y. (2022). Integrated use of pheromone traps and barrier methods for controlling fall armyworm. *Crop Protection*, 152, 105832. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2021.105832>
- Jha, K., Doshi, A., Patel, P., & Shah, M. (2019). A comprehensive review on automation in agriculture using artificial intelligence. *Artificial Intelligence in Agriculture*, 2, 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.aiaa.2019.05.004>
- Jhala, A. J., Norsworthy, J. K., & Steckel, L. E. (2022). Best management practices for sustainable weed control: A systems-based approach. *Weed Technology*, 36(1), 4–15. <https://doi.org/10.1017/wet.2021.83>
- Jones, J. T., Haegeman, A., & Kikuchi, T. (2020). Top 10 plant-parasitic nematodes in molecular plant pathology. *Molecular Plant Pathology*, 21(2), 107–120. <https://doi.org/10.1111/mpp.12824>
- Kader, M. A., Senge, M., Mojid, M. A., & Ito, K. (2021). Recent advances in irrigation scheduling using plant and soil sensors, and remote sensing. *Agricultural Water Management*, 248, 106756. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106756>
- Kalaji, H. M., Bosa, K., Kościelniak, J., & Hossain, Z. (2018). Chlorophyll fluorescence—a useful tool for evaluating the

- physiological status of plants subjected to abiotic stress. *Acta Physiologiae Plantarum*, 40, 22.
<https://doi.org/10.1007/s11738-017-2580-3>
- Kanchiswamy, C. N., Malnoy, M., & Velasco, R. (2022). RNAi technology: A new avenue for crop protection. *Trends in Plant Science*, 27(3), 260–273.
<https://doi.org/10.1016/j.tplants.2021.09.006>
- Karanja, D., Ochieng, J. W., & Juma, W. (2022). Pesticide resistance and its management in East African agroecosystems. *Environmental Advances*, 8, 100218.
<https://doi.org/10.1016/j.envadv.2022.100218>
- Karar, H., Bashir, M. H., & Ali, A. (2021). Trichogramma and cultural methods synergy for sustainable *Helicoverpa armigera* management. *Journal of Asia-Pacific Entomology*, 24(2), 548–555. <https://doi.org/10.1016/j.aspen.2021.02.007>
- Kareem, A., Nwachukwu, I., & Akinyemi, F. (2023). Post-harvest losses due to pest damage: Economic impacts and mitigation in sub-Saharan Africa. *Postharvest Biology and Technology*, 199, 112280.
<https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2023.112280>
- Kasso, E., Mohammed, S., & Feleke, T. (2021). Epidemiological factors affecting cassava mosaic virus distribution and management. *African Journal of Agricultural Research*, 16(8), 1110–1119. <https://doi.org/10.5897/AJAR2020.15337>
- Kaur, R., Wani, A. B., & Koul, K. K. (2022). Early detection and management strategies for fungal pathogens in crops:

Nanotechnology and precision agriculture tools. *Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management*, 17, 100668. <https://doi.org/10.1016/j.enmm.2021.100668>

Kaur, S., Singh, D., & Gill, R. S. (2023). RNAi technology for pest and virus management: A way towards sustainable agriculture. *Plant Cell Reports*, 42(3), 645–662. <https://doi.org/10.1007/s00299-022-02976-6>

Khan, M. I. R., Fatma, M., Per, T. S., Anjum, N. A., & Khan, N. A. (2021). Salicylic acid-induced abiotic stress tolerance and underlying mechanisms in plants. *Frontiers in Plant Science*, 6, 462. <https://doi.org/10.3389/fpls.2015.00462>

Khan, R. A., Sarker, S., & Hassan, M. (2021). *Morphological variation and damage assessment of brown planthopper, Nilaparvata lugens*. *Bulletin of Entomological Research*, 111(4), 456–465. <https://doi.org/10.1017/S0007485320000740>

Khan, Z., Hassanali, A., & Midega, C. A. O. (2023). Ecology-based strategies to manage pest outbreaks under climate change. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 7, 1084312. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2023.1084312>

Khanal, A. R., Groover, J. P., & Boyhan, G. E. (2023). *Use of smartphone-based pest monitoring systems in field crop production*. *Computers and Electronics in Agriculture*, 203, 107513. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2022.107513>

Kim, J. H., Park, S. Y., & Lee, D. W. (2023). Root trait plasticity of weed species under drought stress. *Acta Physiologiae*

Plantarum, 45, 23. <https://doi.org/10.1007/s11738-023-03519-z>

Kogan, M., Norton, G. A., & Stinner, B. R. (2023). Applying conceptual models in integrated pest management: A systems thinking approach. *Annual Review of Entomology*, 68, 85–104. <https://doi.org/10.1146/annurev-ento-011522-041926>

Koirala, B., Pandey, B., & Neupane, D. (2022). Decision support systems in agriculture: Review, challenges, and outlook. *Information Processing in Agriculture*, 9(1), 59–69. <https://doi.org/10.1016/j.inpa.2021.05.001>

Kranse, J. P., Rawat, N., & Yadav, B. C. (2023). Functional genomics of nematode effectors and their interaction with host defense pathways. *Frontiers in Plant Science*, 14, 1174945. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1174945>

Kumar, P., & Mishra, A. K. (2022). Economic implications of weed management practices in rice cultivation. *Indian Journal of Agricultural Economics*, 77(2), 203–217. <https://doi.org/10.5958/0974-0279.2022.00019.6>

Kumar, P., & Singh, A. (2023). Monitoring and managing insect pests using sticky traps: Advances in pest detection. *Journal of Environmental Science and Health, Part B*, 58(1), 45–55. <https://doi.org/10.1080/03601234.2022.2104798>

Kumar, R., Sharma, P., & Ghosh, A. (2022). GIS-based spatiotemporal analysis for vertebrate pest forecasting. *Precision Agriculture*, 23(4), 967–984. <https://doi.org/10.1007/s11119-021-09855-3>

- Kumar, R., Singh, D., & Prasad, R. (2021). Weed classification and sustainable management practices. *Weed Science*, 69(3), 353–365. <https://doi.org/10.1017/wsc.2021.23>
- Kumar, S., Sharma, A., & Dey, D. (2022). Smart release of parasitoids using drone-based ecological mapping: A case in pest management. *Computers and Electronics in Agriculture*, 193, 106683. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2021.106683>
- Kumar, V., Yadav, A., & Singh, S. (2021). Role of cover crops in weed suppression and soil health improvement: A review. *Agricultural Reviews*, 42(4), 351–359. <https://doi.org/10.18805/ag.R-1979>
- Kundu, S., Pal, S., & Bhattacharjee, S. (2022). Farmer field school (FFS) approach in plant protection: An empirical study. *Journal of Rural Studies*, 95, 145–154. <https://doi.org/10.1016/j.jrurstud.2022.06.003>
- Kyndt, T., Fernandez, D., & Gheysen, G. (2021). Plant-nematode interactions: A cellular and molecular overview. *Annual Review of Phytopathology*, 59, 73–96. <https://doi.org/10.1146/annurev-phyto-020620-084853>
- LaCanne, C. E., & Lundgren, J. G. (2022). Regenerative agriculture: Merging farming and natural resource conservation profitably. *PeerJ*, 10, e12777. <https://doi.org/10.7717/peerj.12777>
- Lämke, J., & Bäurle, I. (2017). Epigenetic and chromatin-based mechanisms in environmental stress adaptation and stress

- memory in plants. *Genome Biology*, 18, 124. <https://doi.org/10.1186/s13059-017-1263-6>
- Lee, J. H., Park, M., & Han, S. (2023). Economic threshold and monitoring in IPM: Relevance for modern sustainable agriculture. *Crop Protection*, 158, 106109. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2022.106109>
- Legg, J. P., Kumar, P. L., & Ferguson, M. E. (2020). Cassava mosaic disease: An ongoing threat to food security in Africa. *Viruses*, 12(11), 1235. <https://doi.org/10.3390/v12111235>
- Li, H., Wang, Z., & Zhang, S. (2021). Avian pest behavior: Visual cues and foraging patterns in rice ecosystems. *Ecological Research*, 36(5), 899–908. <https://doi.org/10.1111/1440-1703.12295>
- Li, Y., Yang, M., Liu, Q., & Wang, Y. (2023). Biotech-based weed control: Opportunities and risks. *Trends in Plant Science*, 28(2), 100–112. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2022.09.007>
- Lim, S., Ahmed, M., & Noor, N. M. M. (2022). Psychosocial impact of agricultural pest outbreaks on rural farming communities. *Journal of Rural Studies*, 91, 345–354. <https://doi.org/10.1016/j.jrurstud.2022.02.012>
- Liu, J., Zhao, W., & Zhang, L. (2022). Risk assessment of atrazine contamination in aquatic ecosystems. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 232, 113258. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2022.113258>

- Liu, S., Wei, C., & Zhao, Y. (2022). Endophytic bacteria as biocontrol agents for plant bacterial diseases. *Biological Control*, *165*, 104846. <https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2021.104846>
- Liu, X., Fan, J., & Li, D. (2023). Advances in molecular diagnostics of plant viruses. *Journal of Virological Methods*, *319*, 114666. <https://doi.org/10.1016/j.jviromet.2023.114666>
- Liu, X., Li, Y., & He, K. (2023). Advances in augmentation and conservation of biological control agents for pest suppression. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, *343*, 108294. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2023.108294>
- Liu, X., Zhang, S., & Chen, L. (2021). Policy frameworks and scientific basis for pest risk classification in agriculture. *Environmental Research Letters*, *16*(8), 084027. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac0dfb>
- Liu, Y., Wu, W., & Sun, Y. (2023). Remote sensing and machine learning for crop pest and disease monitoring: Current status and future directions. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, *198*, 127–140. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2023.02.007>
- López-Collado, J., Zamudio, P. G., & Cano-Santana, Z. (2022). *Life cycle and reproduction of Achatina fulica: Implications for pest control*. *Journal of Molluscan Studies*, *88*(3), eyac014. <https://doi.org/10.1093/mollus/eyac014>
- López-Granados, F., Torres-Sánchez, J., & Peña, J. M. (2023). Precision spraying using UAVs in agriculture: Current status, challenges, and future perspectives. *Biosystems Engineering*,

- 225, 111–130.
<https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2022.12.010>
- López-Ovejero, R. F., Oliveira, R. S., & Christoffoleti, P. J. (2022). Advances in stale seedbed technique for weed management. *Weed Science*, 70(1), 121–129.
<https://doi.org/10.1017/wsc.2021.58>
- Machado, H. L., & Gadanho, M. (2023). The role of T3SS effectors in plant-pathogenic bacteria: A mechanistic insight. *Pathogens*, 12(1), 65. <https://doi.org/10.3390/pathogens12010065>
- Mahlein, A.-K. (2021). Plant disease detection by imaging sensors—parallels and specific demands for precision agriculture and plant phenotyping. *Plant Disease*, 105(8), 2413–2426.
<https://doi.org/10.1094/PDIS-03-21-0575-FE>
- Mahmoud, M. F., Salem, H., & Zidan, M. (2023). Pheromone-based trapping system: A green tool for controlling insect pests. *Pesticide Biochemistry and Physiology*, 189, 105266.
<https://doi.org/10.1016/j.pestbp.2022.105266>
- Maity, S., Ghosh, R. K., & Pal, S. (2021). Revisiting the role of weeds: Ecological services, adaptability, and coexistence in agroecosystems. *Ecological Processes*, 10, 64.
<https://doi.org/10.1186/s13717-021-00328-7>
- Marban-Mendoza, N., Rodríguez-Kábana, R., & Ortega-Arenas, L. D. (2021). Advances in formulation technology of biopesticides for sustainable agriculture. *Crop Protection*, 143, 105570.
<https://doi.org/10.1016/j.cropro.2021.105570>

- Marín, R., García, M., & Silva, P. (2020). Effect of crop density and planting pattern on weed suppression and maize yield. *European Journal of Agronomy*, 117, 126092. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2020.126092>
- Martin, E. A., Reineking, B., Seo, B., & Steffan-Dewenter, I. (2022). Ecological pest control and natural regulation of vertebrate pests in agriculture. *Trends in Ecology & Evolution*, 37(2), 156–167. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2021.10.008>
- Martins, D. S., Ferreira, C., & Costa, R. M. (2021). Public–private partnerships in plant protection: Policy frameworks and institutional capacity. *Journal of Cleaner Production*, 292, 125995. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.125995>
- Marzuki, R., Abdullah, S., & Wulandari, H. (2022). Exposure to pesticide residues and associated health risks among Indonesian farmers. *Environmental Research*, 210, 112925. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.112925>
- Mavridis, A., Dutta, R., & Li, M. (2022). Application of spatial data analytics in precision pest control. *Precision Agriculture*, 23, 850–869. <https://doi.org/10.1007/s11119-021-09853-4>
- Mekonnen, M., Legesse, M., & Dinku, M. (2021). Weed composition as a bioindicator of soil degradation in Ethiopian cropping systems. *Environmental Monitoring and Assessment*, 193(4), 250. <https://doi.org/10.1007/s10661-021-09014-6>
- Miah, M. A. M., Uddin, M. N., & Akter, M. (2021). Adaptive strategies of wetland weeds in flooded rice fields: A

- morphological and anatomical study. *Aquatic Botany*, *172*, 103376. <https://doi.org/10.1016/j.aquabot.2021.103376>
- Miah, S. A., Bhuiyan, M. A. R., & Haque, M. S. (2021). Rice blast management through varietal resistance and integrated disease management practices in South Asia. *Crop Protection*, *144*, 105633. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2021.105633>
- Mohd-Zainudin, N. A., Hassan, M. A., & Ismail, R. (2021). *Comparative efficacy of baits and trapping methods for terrestrial mollusc pests*. *Crop Protection*, *147*, 105736. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2021.105736>
- Molina-Hernández, J. B., Salazar-González, C., & Morales-García, E. (2021). Biological control of agricultural pests using entomopathogenic fungi: Advances and challenges. *Biocontrol Science and Technology*, *31*(6), 589–607. <https://doi.org/10.1080/09583157.2021.1907068>
- Montenegro de Wit, M., & Iles, A. (2021). Toward thick legitimacy: Creating a web of legitimacy for agroecology. *Elementa: Science of the Anthropocene*, *9*(1), 00145. <https://doi.org/10.1525/elementa.2021.00145>
- Moradi, M., Khezri, M., & Rashedi, G. (2020). Role of vascular colonization in wilting symptoms of tomato caused by *Ralstonia solanacearum*. *Journal of Plant Protection Research*, *60*(2), 142–149. <https://doi.org/10.24425/jppr.2020.132209>

- Morales, H., Perfecto, I., & Vandermeer, J. (2021). Biodiversity conservation in agroecosystems: Ecological interactions and landscape management. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 313, 107376. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2021.107376>
- Morimoto, Y., Katoh, K., & Yamaguchi, T. (2023). Regional plant health networks and biosecurity: Case studies in Asia. *Crop Protection*, 168, 106595. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2023.106595>
- Mouratidis, A., Papadopoulos, D., & Vlahos, G. (2021). Re-evaluating non-chemical control methods in sustainable agriculture: A policy and practical perspective. *Sustainability*, 13(12), 6793. <https://doi.org/10.3390/su13126793>
- Müller, C., Elliott, J., & Chryssanthacopoulos, J. (2020). SmartCrop: Satellite-supported precision farming for disease prevention. *Agricultural and Forest Meteorology*, 291, 108056. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2020.108056>
- Munns, R., James, R. A., Gilliam, M., Flowers, T. J., & Colmer, T. D. (2020). Tissue tolerance: An essential but elusive trait for salt-tolerant crops. *Functional Plant Biology*, 47(7), 629–641. <https://doi.org/10.1071/FP19350>
- Munyua, H. W., Otieno, P. E., & Chege, J. K. (2022). Integrated pest classification for sustainable crop production in sub-Saharan Africa. *African Journal of Agricultural Research*, 17(12), 1592–1601. <https://doi.org/10.5897/AJAR2022.16083>

- Mwangi, M. N., Wambugu, S. K., & Gitau, R. (2020). Economic impact of pest outbreaks on smallholder farmers. *Journal of Agricultural Economics*, 71(4), 987–1005. <https://doi.org/10.1111/1477-9552.12387>
- Nagy, R. C., Vargas, R., & Sparks, A. H. (2022). Climate change effects on pest biology and population dynamics. *Current Opinion in Insect Science*, 51, 100927. <https://doi.org/10.1016/j.cois.2021.100927>
- Nakka, S., Godar, A. S., Wani, S. H., & Peterson, D. E. (2020). Managing herbicide-resistant weeds with pre- and post-emergence herbicide rotations. *Weed Technology*, 34(2), 290–299. <https://doi.org/10.1017/wet.2020.11>
- Nanda, R., Kumar, M., & Prasad, M. (2023). Growth dynamics and ecological impact of *Eichhornia crassipes* in nutrient-rich waters. *Environmental Science and Pollution Research*, 30, 27392–27403. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-26059-6>
- Naranjo, S. E., Ellsworth, P. C., & Frisvold, G. B. (2021). Biological control: A key component of integrated pest management. *Current Opinion in Insect Science*, 45, 36–42. <https://doi.org/10.1016/j.cois.2021.01.004>
- Naranjo, S. E., Ellsworth, P. C., & Frisvold, G. B. (2021). Integrating insect resistance and pest management in the age of AI. *Annual Review of Entomology*, 66, 643–661. <https://doi.org/10.1146/annurev-ento-120820-082813>
- Narayan, S., Arora, P., & Banerjee, S. (2023). Integrated vertebrate pest management in climate-vulnerable agriculture.

Agronomy for Sustainable Development, 43(3), 47.
<https://doi.org/10.1007/s13593-023-00861-2>

Ng, J., Rajarammohan, S., & Zhao, L. (2022). Area-wide virus disease management: A strategy for smallholder farming systems. *Crop Protection*, 155, 105912.
<https://doi.org/10.1016/j.cropro.2021.105912>

Nguyen, D. H., Le, T. M., & Tran, Q. H. (2022). Application of conceptual pest models in participatory agricultural extension. *Sustainability*, 14(4), 2201.
<https://doi.org/10.3390/su14042201>

Nguyen, D. N., Phan, H. T., & Tran, M. T. (2022). Resistance mechanisms in tomato against root-knot nematode infection. *Plants*, 11(3), 443. <https://doi.org/10.3390/plants11030443>

Nguyen, H. V., Do, T. T., & Pham, L. T. (2023). Economic assessment of weed control methods in soybean production systems of Southeast Asia. *Sustainability*, 15(2), 1362.
<https://doi.org/10.3390/su15021362>

Nguyen, Q. H., Tran, N. D., & Bui, T. H. (2022). Ecological restoration in pest management: A pathway to sustainability. *Journal of Environmental Management*, 314, 115044.
<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.115044>

Nguyen, T. M., Tran, D. H., & Le, P. Q. (2022). Cultural control of planthopper and stem borer pests in rice ecosystems of Southeast Asia. *Agricultural Systems*, 198, 103379.
<https://doi.org/10.1016/j.agsy.2021.103379>

- Nguyen, T. T., & Zalucki, M. P. (2021). Resistance management for sustainable use of pesticides: A global synthesis. *Pest Management Science*, 77(11), 5095–5108. <https://doi.org/10.1002/ps.6504>
- Nguyen, T. T., Le, T. H., & Hadi, B. A. R. (2022). *Participatory pest identification and management in Southeast Asia*. *Journal of Integrated Pest Management*, 13(1), 1–10. <https://doi.org/10.1093/jipm/pmac006>
- Niemann, J. D., Esser, A., & Schreiber, S. (2021). Controlled weed biodiversity improves ecosystem services in arable farming. *Agronomy for Sustainable Development*, 41, 70. <https://doi.org/10.1007/s13593-021-00728-6>
- Norsworthy, J. K., Barber, T., & Smith, K. (2021). Managing dicamba and 2,4-D in herbicide-resistant cropping systems. *Pest Management Science*, 77(9), 4131–4142. <https://doi.org/10.1002/ps.6492>
- Nugroho, B. A., Priyanto, S., & Wulandari, R. (2023). Community-based vertebrate pest management: Social capital and ecological resilience. *Agroecology and Sustainable Food Systems*, 47(1), 23–41. <https://doi.org/10.1080/21683565.2022.2097765>
- Nurhidayat, A., Wibowo, A., & Subekti, N. A. (2022). Distribution and integrated control of downy mildew in maize in Central Java. *Indonesian Journal of Agricultural Science*, 23(2), 113–121. <https://doi.org/10.21082/ijas.v23n2.2022.p113-121>

- Ohama, N., Sato, H., Shinozaki, K., & Yamaguchi-Shinozaki, K. (2017). Transcriptional regulatory network of plant heat stress response. *Trends in Plant Science*, 22(1), 53–65. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2016.08.015>
- Okonya, J. S., Syndikus, K., & Kroschel, J. (2020). Farmers' knowledge and perceptions of pest-related yield losses in Africa. *Outlook on Agriculture*, 49(1), 47–56. <https://doi.org/10.1177/0030727019889908>
- Oladunjoye, I. O., Bello, M. A., & Akinboade, O. E. (2022). Seasonal dynamics of vertebrate pests in smallholder farms. *Agricultural Systems*, 198, 103384. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2022.103384>
- Ortiz, B. V., Riggins, C. W., & Owen, M. D. K. (2023). Molecular detection of herbicide resistance in weeds: Tools and trends. *Frontiers in Agronomy*, 5, 1142309. <https://doi.org/10.3389/fagro.2023.1142309>
- Osei, P. M., Asante, M., & Oppong, B. (2023). Ecotoxicological assessment of weed dominance in pesticide-contaminated agricultural fields. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 42(1), 101–111. <https://doi.org/10.1002/etc.5421>
- Pan, Z., Zhang, J., & Zhao, Y. (2021). Precision agriculture-based weed management using bioinformatics and real-time monitoring. *Computers and Electronics in Agriculture*, 188, 106318. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2021.106318>
- Pandey, P., Irulappan, V., Bagavathiannan, M. V., & Senthil-Kumar, M. (2020). Impact of combined abiotic and biotic stresses on

- plant growth and avenues for crop improvement by exploiting physiomorphological traits. *Frontiers in Plant Science*, 11, 944. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.00944>
- Park, M. J., Lee, J. H., & Kim, D. (2020). Landscape heterogeneity and pest suppression in rice agroecosystems. *Landscape Ecology*, 35, 2399–2414. <https://doi.org/10.1007/s10980-020-01069-8>
- Patel, J. S., Damicone, J. P., & Giesler, L. J. (2021). Biological control of bacterial plant pathogens using antagonistic bacteria: Current status and future prospects. *Microorganisms*, 9(5), 1026. <https://doi.org/10.3390/microorganisms9051026>
- Peterson, D. E., Johnson, B. F., & Thompson, C. R. (2021). Environmental implications of herbicide use and weed resistance. *Agronomy Journal*, 113(2), 902–910. <https://doi.org/10.1002/agj2.20467>
- Rahimi, A., Tahmasebi Sarvestani, Z., & Gharanjik, S. (2022). Phenotyping plant nutrient deficiency symptoms by image analysis and machine learning. *Plant Methods*, 18, 116. <https://doi.org/10.1186/s13007-022-00914-6>
- Rahman, A., Hasan, M. M., & Haque, M. M. (2022). Competitive interaction between *Sorghum halepense* and maize under water-limited conditions. *Crop Science*, 62(6), 2450–2459. <https://doi.org/10.1002/csc2.20885>
- Rahman, A., Zhou, H., & Dong, Y. (2022). Smart pest control: Using AI-based clustering and forecasting in integrated pest

management. *Artificial Intelligence in Agriculture*, 6, 1–10.
<https://doi.org/10.1016/j.aiia.2022.01.002>

Rahman, M. M., Akter, S., & Haque, E. (2020). Inclusive technology transfer in plant protection: Addressing knowledge gaps among smallholders. *Technology in Society*, 62, 101319.
<https://doi.org/10.1016/j.techsoc.2020.101319>

Rahman, M. M., Rahmatullah, S. M., & Alam, M. J. (2022). Comparative study of biological and chemical control methods for rice field rats. *Crop Protection*, 155, 105927.
<https://doi.org/10.1016/j.cropro.2021.105927>

Rahman, S. M. A., Uddin, M. J., & Alam, M. Z. (2021). Effects of cropping systems and input practices on pest incidence. *Agriculture and Food Security*, 10, 20.
<https://doi.org/10.1186/s40066-021-00309-9>

Rajput, V. D., Minkina, T., Sushkova, S., & Mandzhieva, S. (2023). Role of microbial antagonists in sustainable plant disease management. *Journal of Cleaner Production*, 384, 135570.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.135570>

Ramirez, D. L., Gutierrez, A. M., & Navarro, L. (2020). Farmers' perception and conservation attitude toward snakes in agroecosystems. *Journal of Ethnobiology and Ethnomedicine*, 16(1), 12. <https://doi.org/10.1186/s13002-020-00365-2>

Ramírez, F., Morales, J., & Hernández, G. (2022). Weed diversity and soil microbial biomass under conventional and organic

- farming. *Soil Biology and Biochemistry*, 170, 108702. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2022.108702>
- Ramírez, P., Herrera, M., & Torres, D. (2020). Plant microbiome engineering: A strategy for disease suppression and stress resilience. *Microbiological Research*, 237, 126482. <https://doi.org/10.1016/j.micres.2020.126482>
- Ramos, A. P., Silva, J., & Marques, P. (2021). UAVs in agriculture: Current status and future trends. *Precision Agriculture*, 22, 1245–1268. <https://doi.org/10.1007/s11119-020-09735-1>
- Ramos, R. S., Blanco, J. A., & Sierra, F. A. (2020). Crop yield losses from pests in sustainable agriculture systems. *Agronomy for Sustainable Development*, 40(6), 46. <https://doi.org/10.1007/s13593-020-00641-z>
- Raza, A., Razzaq, A., Mehmood, S. S., Zou, X., Zhang, X., Lv, Y., & Xu, J. (2021). Impact of climate change on crops adaptation and strategies to tackle its outcome: A review. *Plants*, 10(7), 1269. <https://doi.org/10.3390/plants10071269>
- Raza, S. E. A., Prince, G., Clarkson, J. P., & Rajpoot, N. M. (2022). Automatic detection of diseased tomato plants using deep learning. *Plant Methods*, 18(1), 12. <https://doi.org/10.1186/s13007-021-00825-5>
- Rodenhouse, N. L., Barker-Plotkin, A. A., & Holmes, R. T. (2021). *Field sampling methods for monitoring insect herbivores in temperate agroecosystems*. *Agricultural and Forest Entomology*, 23(1), 40–52. <https://doi.org/10.1111/afe.12447>

- Rodrigues, J. A., Bastos, M. M., & Santos, L. H. (2020). Green chemistry in agrochemical formulation: Toward safer pest control agents. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 8(9), 3804–3818. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.9b07438>
- Rodrigues, J. L. M., Silva, L. M., & Pereira, R. A. (2021). Ecological perspective on pest emergence in changing environments. *Ecological Indicators*, 122, 107290. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.107290>
- Rodríguez, M. A., Torres, P., & Gutierrez, D. (2023). Glyphosate-based herbicides and soil microbial diversity in tropical agroecosystems. *Science of the Total Environment*, 869, 161664. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.161664>
- Rodríguez-González, J., Muñoz-Pallares, J., & Rosas-Saito, G. (2021). Holistic strategies in plant protection: A review on IPM frameworks. *Crop Protection*, 147, 105712. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2021.105712>
- Rodríguez-Sánchez, A., Pérez, R. A., & Medina, C. (2021). Sustainable transition in pest control: From chemical to non-chemical strategies. *Agronomy for Sustainable Development*, 41, 78. <https://doi.org/10.1007/s13593-021-00729-5>
- Rowson, B., Symondson, W. O. C., & Neal, A. (2020). *Gastropod pests of horticulture: Ecology and management*. *Pest Management Science*, 76(8), 2463–2473. <https://doi.org/10.1002/ps.5803>

- Roy, A., Banerjee, S., & Saha, H. (2023). Big data in smart farming: Applications and challenges. *Computers and Electronics in Agriculture*, *205*, 107531. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2023.107531>
- Roy, A., Sharma, P., & Saini, R. K. (2020). Juvenile hormone analogs and insect growth regulators: Tools for eco-friendly pest management. *Environmental Science and Pollution Research*, *27*(23), 29298–29315. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-08887-1>
- Roy, S. J., Negrão, S., & Tester, M. (2021). Salt resistant crop plants. *Current Opinion in Biotechnology*, *42*, 102–110. <https://doi.org/10.1016/j.copbio.2016.05.004>
- Rueda, A., Baur, B., & Hatteland, B. A. (2021). Ecological strategies of invasive slugs and snails in agroecosystems. *Insects*, *12*(2), 144. <https://doi.org/10.3390/insects12020144>
- Sahoo, K. R., Sinha, S. R., & Mohapatra, P. (2024). Integrated pest management: Sustainable strategy for ecological balance. *Ecological Indicators*, *156*, 110343. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2023.110343>
- Saini, R., Malhotra, R., & Sharma, P. (2023). Tracheal system in insects: Adaptations and implications for pest control. *Entomology and Applied Science Letters*, *10*(1), 1–10. <https://doi.org/10.51847/fXPvMskZHI>
- Sankaran, M., Chase, J. M., & Giller, K. E. (2022). Ecological principles for resilient pest management under environmental

- change. *Nature Sustainability*, 5(6), 470–478.
<https://doi.org/10.1038/s41893-022-00890-9>
- Sankaran, S., Mishra, A., & Ehsani, R. (2022). Unmanned aerial systems for agricultural applications. *Computers and Electronics in Agriculture*, 195, 106833.
<https://doi.org/10.1016/j.compag.2022.106833>
- Santos, M. C. F., Lima, T. A., & de Almeida, R. M. (2020). Temporal feeding patterns and habitat selection of fruit bats in agroforestry systems. *Mammalian Biology*, 100, 271–280.
<https://doi.org/10.1007/s42991-020-00046-z>
- Sarker, B., Dey, M., & Rahman, S. (2020). Habitat diversification as a deterrent to vertebrate pests in small-scale farming. *Agricultural and Forest Entomology*, 22(4), 451–459.
<https://doi.org/10.1111/afe.12404>
- Savary, S., Willocquet, L., & Nelson, A. (2020). Modeling and mapping crop diseases to support food security. *Annual Review of Phytopathology*, 58, 539–561.
<https://doi.org/10.1146/annurev-phyto-081619-060009>
- Saxena, A., Mishra, A., & Rai, P. (2022). Lifestyle and infection strategy of fungal plant pathogens: Biotrophs, necrotrophs and hemibiotrophs. *Fungal Biology Reviews*, 38, 36–50.
<https://doi.org/10.1016/j.fbr.2022.06.001>
- Schreefel, L., Schulte, R. P. O., & de Boer, I. J. M. (2022). Regenerative agriculture – the soil is the base. *Global Food Security*, 32, 100591.
<https://doi.org/10.1016/j.gfs.2021.100591>

- Schulthess, F., Wale, M., & Midega, C. (2022). Yield loss estimations due to key pests in cereal cropping systems of sub-Saharan Africa. *Agricultural Systems*, 198, 103379. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2021.103379>
- Setiyono, T. D., Wibowo, E. S., & Supriyanto, A. (2021). Evaluation of early growth vigor in rice genotypes for weed competitiveness. *Rice Science*, 28(6), 563–571. <https://doi.org/10.1016/j.rsci.2021.08.002>
- Setthy, P. K., Barpanda, N. K., & Mishra, A. (2023). Machine learning-based forecasting of pest infestation in crops: A review. *Ecological Informatics*, 72, 101854. <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2023.101854>
- Setyawan, R., Putri, E., & Hartono, S. (2023). Economic implications of chemical input dependency among rice farmers in Southeast Asia. *Journal of Rural Studies*, 103, 215–224. <https://doi.org/10.1016/j.jrurstud.2023.02.005>
- Setyowati, E., Santosa, D. A., & Prasetyo, A. (2021). Role of *Commelina* spp. as virus reservoir in maize cropping system. *Indonesian Journal of Plant Protection*, 25(2), 187–196. <https://doi.org/10.22146/ijpp.63743>
- Shabala, S. (2021). Learning from halophytes: Physiological basis and strategies to improve abiotic stress tolerance in crops. *Annals of Botany*, 127(5), 611–616. <https://doi.org/10.1093/aob/mcaa150>
- Sharma, A., Dutta, D., & Basu, S. (2020). Smart farming using real-time pest modeling and precision agriculture tools.

Computers and Electronics in Agriculture, 170, 105256.
<https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105256>

Sharma, R., Kumar, M., & Tripathi, S. (2022). Resilient weed management systems in the face of herbicide resistance. *Agricultural Systems*, 195, 103324.
<https://doi.org/10.1016/j.agsy.2021.103324>

Sharma, R., Singh, S., & Kumar, V. (2022). Advances in plant protection science: From traditional practices to modern technologies. *Plant Protection Science*, 58(3), 121–132.
<https://doi.org/10.17221/80/2022-PPS>

Sharma, S. P., Meena, R. P., & Dahiya, R. (2021). Leaf anatomical traits and growth rate of *Amaranthus spinosus* under competitive environment. *Indian Journal of Weed Science*, 53(3), 211–216. <https://doi.org/10.5958/0974-8164.2021.00047.2>

Shekoofa, A., Ghavami, N., & Johnson, J. (2023). Impact of crop rotation on weed pressure and soil health in sustainable farming systems. *Journal of Sustainable Agriculture*, 47(3), 267–280. <https://doi.org/10.1080/10440046.2023.2170994>

Shore, R. F., Walker, L. A., & Potter, E. D. (2020). Secondary poisoning of raptors by anticoagulant rodenticides. *Environmental Science & Technology*, 54(18), 11343–11352.
<https://doi.org/10.1021/acs.est.0c02125>

Sileshi, G. W., Arslan, A., & Denning, G. (2022). *Statistical and geospatial sampling designs for pest monitoring in precision*

- agriculture*. Precision Agriculture, **23**(5), 1027–1042.
<https://doi.org/10.1007/s11119-021-09849-5>
- Silva, F. M. L., Alves, D. S., & Costa, S. S. (2023). Application of infrared spectroscopy and machine learning in weed species identification. *Computers and Electronics in Agriculture*, *203*, 107528. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2023.107528>
- Silva, R. A., Mendes, K. R., & Xavier, M. C. (2021). Yield loss in maize due to *Amaranthus retroflexus* competition: Implications for early weed control. *Planta Daninha*, *39*, e021231300. <https://doi.org/10.1590/s0100-83582021390100013>
- Simatupang, M., Siregar, H., & Nainggolan, N. (2023). Late blight disease control in potato using integrated methods in West Sumatra. *Indonesian Journal of Agricultural Research*, *16*(1), 75–84. <https://doi.org/10.24831/jij.v16i1.123456>
- Singh, A., Verma, R. K., & Sharma, V. (2021). Reproductive control in rodent pests using botanical extracts: A review. *Journal of Pest Science*, *94*(4), 1203–1216. <https://doi.org/10.1007/s10340-020-01306-1>
- Singh, A., Yadav, V. S., & Sharma, R. (2023). Challenges in the management of perennial weeds: Focus on *Cyperus rotundus*. *Weed Science*, *71*(1), 21–30. <https://doi.org/10.1017/wsc.2022.51>
- Singh, H. P., Batish, D. R., Kaur, G., Arora, K., & Kohli, R. K. (2022). Ozone pollution: Phytotoxicity, tolerance and

- signaling in plants. *Environmental Pollution*, 293, 118502.
<https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.118502>
- Singh, H., & Yadav, M. (2023). Agricultural law and policy in crop protection: Regulation, challenges and future. *Land Use Policy*, 132, 106574.
<https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2023.106574>
- Singh, M., Bhatt, R., & Kumar, A. (2020). Impact of invasive weed flora in marginal habitats on biodiversity and land use. *Biodiversity and Conservation*, 29(9–10), 2783–2798.
<https://doi.org/10.1007/s10531-020-01994-w>
- Singh, R. P., Hodson, D. P., & Huerta-Espino, J. (2021). Stem rust of wheat: A continuing threat to global food security. *Current Opinion in Plant Biology*, 60, 102001.
<https://doi.org/10.1016/j.pbi.2020.102001>
- Singh, R., Pant, K., & Singh, M. (2023). Weather-based early warning systems in agriculture: Current advances and challenges. *Theoretical and Applied Climatology*, 152, 489–504.
<https://doi.org/10.1007/s00704-022-04187-w>
- Singh, R., Prasad, C. S., & Kumar, P. (2021). Genetic adaptability of insect pests in diverse agro-climatic zones. *Genetics and Molecular Biology*, 44(1), e20200220.
<https://doi.org/10.1590/1678-4685-gmb-2020-0220>
- Singh, V., Sharma, M., & Gill, G. S. (2020). Integrated weed management in rice-wheat system of Indo-Gangetic Plains. *Crop Protection*, 138, 105287.
<https://doi.org/10.1016/j.cropro.2020.105287>

- Singh, V., Srivastava, R. K., & Dubey, N. K. (2023). Biocontrol potential of *Trichoderma* and its role in integrated disease management. *Biological Control*, 180, 105234. <https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2023.105234>
- Singh, V., Tiwari, A., & Choudhury, P. (2023). Community-based pest management and rural resilience in South Asia. *Environmental Management*, 71, 665–678. <https://doi.org/10.1007/s00267-023-01702-7>
- Singh, V., Yadav, A., & Meena, R. S. (2021). Potential of botanical repellents in insect pest management. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 216, 112206. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2021.112206>
- Sisay, B., Simiyu, J., & Tefera, T. (2020). Biological control of fall armyworm using *Telenomus remus* in maize. *Insects*, 11(11), 765. <https://doi.org/10.3390/insects11110765>
- Song, Y., Li, C., & Wang, J. (2021). Impact of rodenticides on soil microbial communities and ecosystem functions. *Science of the Total Environment*, 764, 142874. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142874>
- Sparks, A. H., Forbes, G. A., & Hijmans, R. J. (2020). Disease triangle: Revisited in the context of predictive modeling. *Phytopathology*, 110(1), 25–30. <https://doi.org/10.1094/PHYTO-07-19-0246-RVW>
- Sparks, A. N., Brown, A. W., & Reay-Jones, F. P. (2020). *Monitoring insect pests in field crops: A practical guide to sampling*

- techniques*. *Journal of Integrated Pest Management*, **11**(1), 1–10. <https://doi.org/10.1093/jipm/pmaa001>
- Sung, J., & Lee, K. (2023). Non-chemical physical control tools for pest management in greenhouse production. *Journal of Asia-Pacific Entomology*, **26**(2), 101027. <https://doi.org/10.1016/j.aspen.2023.101027>
- Sweeney, D. L., Nguyen, H. T., & Teague, R. D. (2021). Raptors as allies in vertebrate pest management: Landscape design and conservation implications. *Ecological Applications*, **31**(4), e02336. <https://doi.org/10.1002/eap.2336>
- Tang, J., Ma, H., & Zhang, H. (2020). Human exposure to pesticide residues in vegetables and its health risks. *Environmental Research*, **189**, 109957. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.109957>
- Tang, R., Yang, S., & Zhang, Q. (2019). *Soil-dwelling insect pests: Sampling and management in root crops*. *Applied Soil Ecology*, **144**, 84–90. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2019.06.001>
- Tripathy, S., Dash, R., & Sahu, P. K. (2021). Remote sensing for precision agriculture: A review. *Environmental Research*, **201**, 111651. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.111651>
- Truman, J. W., & Riddiford, L. M. (2019). *The evolution of insect metamorphosis: A developmental perspective*. *Developmental Biology*, **446**(2), 84–93. <https://doi.org/10.1016/j.ydbio.2018.11.013>

- Tschumi, M., Albrecht, M., & Entling, M. H. (2023). Balancing pest control and environmental safety: Integrated pesticide and pest management (IPPM). *Science of the Total Environment*, 856, 159138. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.159138>
- Tuan, N. A., Le, D. N., & Pham, V. C. (2021). Predator-prey interaction in rice field ecosystems of Southeast Asia. *Journal of Asia-Pacific Biodiversity*, 14(3), 411–419. <https://doi.org/10.1016/j.japb.2021.02.005>
- Ullah, M. I., Khan, F. Z. A., & Javed, M. (2021). *Morphological and molecular identification of invasive tomato leafminer, Tuta absoluta*. *Phytoparasitica*, 49, 293–303. <https://doi.org/10.1007/s12600-020-00875-2>
- Valenzuela, J., Gómez, M., & Hernández, H. (2019). *Plant quarantine pests: Challenges in identification and trade compliance*. *Journal of Economic Entomology*, 112(6), 2637–2644. <https://doi.org/10.1093/jee/toz167>
- van Lenteren, J. C., Bolckmans, K., & Bigler, F. (2020). Biological control using invertebrates: Global perspectives, challenges, and success stories. *Annual Review of Entomology*, 65, 23–45. <https://doi.org/10.1146/annurev-ento-011019-024928>
- Vanegas, F., Bratanov, D., & Lamb, D. W. (2020). Hyperspectral and thermal remote sensing in agriculture: Synergies and challenges. *Remote Sensing of Environment*, 240, 111689. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.111689>
- Verdejo-Lucas, S., Talavera, M., & Vovlas, N. (2023). Integrated nematode management in horticultural crops: Current

- strategies and prospects. *Crop Protection*, 163, 106189. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2023.106189>
- Veresoglou, S. D., Menexes, G., & Rillig, M. C. (2021). Broadening the scope of plant protection: From reactive to preventive strategies. *Agronomy*, 11(3), 589. <https://doi.org/10.3390/agronomy11030589>
- Verret, V., Steinmetz, Z., & Cordeau, S. (2023). Living mulches in organic vegetable systems: Weed suppression and ecological services. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 342, 108226. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2023.108226>
- Walsh, M. J., Broster, J. C., & Powles, S. B. (2021). Harvest weed seed control: A non-chemical weed control strategy for global grain production. *Weed Science*, 69(2), 131–140. <https://doi.org/10.1017/wsc.2020.72>
- Wang, N., Li, R., & Zhao, Q. (2022). Development of herbicide-tolerant crops: Engineering and biosafety perspectives. *Plant Biotechnology Journal*, 20(5), 857–874. <https://doi.org/10.1111/pbi.13769>
- Wang, Y., Wang, M., Wang, L., Wang, H., & Zeng, Z. (2022). Role of photoreceptors and light in regulating the plant circadian clock. *Frontiers in Plant Science*, 13, 909153. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.909153>
- Wang, Y., Zhang, Z., & Wang, S. (2020). Smart sprayer based on deep learning for pesticide application. *Computers and Electronics in Agriculture*, 174, 105456. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105456>

- Widiana, I. N., Sudarma, I. M., & Suryawan, I. G. A. (2023). Empowering farmers through Farmer Field Schools to adopt IPM practices. *Agricultural Education and Extension*, 29(1), 89–105. <https://doi.org/10.1080/1389224X.2022.2131052>
- Wijayanti, N. L., Putra, I. G. N., & Santosa, W. (2023). Impacts of wild boar and primates on tropical agriculture: Spatiotemporal analysis. *Mammal Research*, 68, 233–245. <https://doi.org/10.1007/s13364-022-00624-z>
- Xie, Y., Li, H., & Wang, L. (2022). Spectral sensitivity of agricultural pests to UV-LED light traps. *Pest Management Science*, 78(3), 1247–1255. <https://doi.org/10.1002/ps.6726>
- Yadav, M., Hooda, V., & Goyal, N. (2022). Biopesticides: Current status and prospects in integrated pest management. *Journal of Environmental Management*, 310, 114683. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.114683>
- Yin, Y., Chen, M., & Zhang, Y. (2020). GIS-based modeling of slug and snail pest distribution in agriculture. *Computers and Electronics in Agriculture*, 174, 105467. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105467>
- Yin, Z., Qian, K., & Wang, L. (2021). Smart farming technologies for plant protection: A review of trends and applications. *Sensors*, 21(15), 5080. <https://doi.org/10.3390/s21155080>
- Yu, K., Zhang, Y., & Yang, L. (2021). Edge intelligence in smart agriculture: Architectures, applications and challenges. *Journal of Network and Computer Applications*, 174, 102906. <https://doi.org/10.1016/j.jnca.2020.102906>

- Yu, Q., Huang, S., Han, H., & Powles, S. B. (2022). Understanding the biochemical basis of herbicide resistance in weeds. *Trends in Plant Science*, 27(1), 30–43. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2021.08.004>
- Yuan, C., Zhang, H., & Gao, H. (2020). Integrated weed management strategies in Chinese soybean production. *Agronomy*, 10(8), 1105. <https://doi.org/10.3390/agronomy10081105>
- Yusoff, N., Shahrudin, S., & Ismail, R. (2020). Modeling rodent outbreaks in paddy fields based on climatic factors and cropping cycles. *Ecological Modelling*, 420, 108962.
- Zandalinas, S. I., Fritschi, F. B., & Mittler, R. (2021). Global warming, climate change, and environmental pollution: Recipe for a multifactorial stress combination disaster. *Trends in Plant Science*, 26(6), 588–599. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2021.02.011>
- Zhang, A. B., Lin, K., & Lin, R. (2020). *DNA barcoding of agricultural pests: Advances and applications*. *Molecular Ecology Resources*, 20(1), 1–15. <https://doi.org/10.1111/1755-0998.13000>
- Zhang, D., Li, Q., & Wang, X. (2021). The role of human activities in integrated pest management: From passive drivers to active managers. *Pest Management Science*, 77(2), 501–511. <https://doi.org/10.1002/ps.6127>
- Zhang, H., & Reitz, S. R. (2023). Biodiversity-based pest management: A pathway to ecological intensification. *Annual*

Review of Entomology, 68, 103–122.
<https://doi.org/10.1146/annurev-ento-031122-054148>

Zhang, H., Xu, Y., & Wang, J. (2021). RNA interference-based weed management: Current status and future directions. *Pest Management Science*, 77(1), 4–13.
<https://doi.org/10.1002/ps.6063>

Zhang, T., Liu, L., & Wang, Q. (2020). Influence of weed competition on early growth and yield of field crops: A case study of maize. *Field Crops Research*, 249, 107760.
<https://doi.org/10.1016/j.fcr.2020.107760>

Zhang, X., Li, H., & Xu, R. (2023). Allelopathic transgenic crops for sustainable weed control: Emerging technologies and challenges. *Plant Science*, 328, 111498.

Zhang, X., Liu, F., & Yang, H. (2020). The impact of beneficial microbes on soil microbiota in long-term field trials of biopesticides. *Applied Soil Ecology*, 147, 103391.
<https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2019.103391>

Biografi Penulis



Ahmad Nadhira, SP, M.Si

Lahir di Medan Sumatera Utara pada 21 Maret 1976. Menempuh pendidikan Sekolah Dasar di SD Negeri 07 Sabang, Sekolah Menengah Pertama di SMP Negeri 01 Sabang dan Sekolah Menengah Atas di SMA Negeri 01 Langsa dan lulus tahun 1994. Penulis melanjutkan Pendidikan Strata Satu (S-1) di Perguruan Tinggi Universitas Sumatera Utara Program Studi Hama dan Penyakit Tanaman tahun 1994 dan menyelesaikan Studi S-1 tahun 1999. Kemudian pada tahun 2002 penulis melanjutkan Studi S-2 pada Program Studi Pengelolaan Sumberdaya Alam dan Lingkungan di Universitas Sumatera Utara dan menyelesaikannya pada tahun 2004. Saat ini Penulis menjadi Dosen Tetap pada Program Studi Agroteknologi Universitas Tjut Nyak Dhien Medan sejak tahun 2002 sampai dengan sekarang. Adapun mata kuliah yang diampuh adalah Dasar Perlindungan Hama Penyakit Tanaman, Dasar Ilmu Gulma, Ekologi Tanaman dan Pengelolaan Terpadu Hama/Penyakit Tanaman. Jabatan yang pernah diemban penulis adalah menjadi Wakil Rektor-I Universitas Tjut Nyak Dhien Medan.

DASAR PERLINDUNGAN TANAMAN

Buku ini menyajikan pemahaman komprehensif mengenai Perlindungan Tanaman sebagai fondasi penting dalam keberlanjutan sistem pertanian modern. Dimulai dari hakikat, tujuan, dan peran multidisipliner perlindungan tanaman, buku ini mengupas tuntas berbagai Organisme Pengganggu Tumbuhan (OPT) seperti serangga, moluska, vertebrata, hingga mikroorganisme penyebab penyakit. Setiap bab menggambarkan interaksi ekologis, teknik identifikasi, serta strategi pengendalian—baik fisik, kimia, hayati, maupun terpadu (PHT). Selain itu, dibahas pula penyakit non-infeksi akibat stres abiotik, serta dinamika gulma dalam agroekosistem beserta pendekatan pengendaliannya. Buku ini memperkuat wawasan dengan menghadirkan teknologi inovatif seperti biopestisida, drone, hingga kecerdasan buatan (AI) untuk perlindungan tanaman presisi. Melalui studi kasus, latihan, dan rangkuman di setiap bab, buku ini menjadi rujukan penting bagi mahasiswa, peneliti, dan praktisi pertanian dalam menghadapi tantangan produksi pangan masa depan.

 0811 5032 147

 takaza_innovatixlabs

 innovatixlabs.takaza.id

 Takaza Innovatix Labs

