



URGENSI DAN KONSEP PERLINDUNGAN TANAMAN BERKELANJUTAN

PENULIS :

Sopialena

Sofian

Kadis Mujiono

M. Alexander Mirza

Ni'matuljannah Akhsan

Encik Akhmad Syaifudin

M. Akhyar Roeslan

Rosfiansyah

URGENSI DAN KONSEP PERLINDUNGAN TANAMAN BERKELANJUTAN

Sopialena

Sofian

Kadis Mujiono

M. Alexander Mirza

Ni'matuljannah Akhsan

Encik Akhmad Syaifudin

M. Akhyar Roeslan

Rosfiansyah



GETPRESS INDONESIA

URGENSI DAN KONSEP PERLINDUNGAN TANAMAN BERKELANJUTAN

Penulis : Sopialena
Sofian
Kadis Mujiono
M. Alexander Mirza
Ni'matuljannah Akhsan
Encik Akhmad Syaifudin
M. Akhyar Roeslan
Rosfiansyah

ISBN :

Editor : Mila Sari, M.Si.
Desain Sampul dan Tata Letak : Tri Putri Wahyuni, S.Pd.

PENERBIT GET PRESS INDONESIA
Anggota IKAPI No. 033/SBA/2022
Jl. Palarik RT 01 RW 06 Kelurahan Air Pacah
Kecamatan Koto Tangah Padang Sumatera Barat
website: www.getpress.co.id
email: adm.getpress@gmail.com

Cetakan pertama, Oktober 2024

Hak cipta dilindungi undang-undang
Dilarang memperbanyak karya tulis ini dalam bentuk
dan dengan cara apapun tanpa izin tertulis dari penerbit.

KATA PENGANTAR

Puji syukur kami panjatkan ke hadirat Tuhan Yang Maha Esa atas limpahan rahmat dan karunia-Nya, sehingga buku Urgensi dan Konsep Perlindungan Tanaman Berkelanjutan ini dapat tersusun dengan baik. Buku ini disusun sebagai wujud komitmen untuk memberikan wawasan mendalam tentang pentingnya perlindungan tanaman yang berkelanjutan dalam rangka menjaga kelestarian lingkungan dan mendukung keberlanjutan sistem pertanian.

Perlindungan tanaman berkelanjutan bukan hanya soal teknik pengendalian hama dan penyakit tanaman, tetapi mencakup upaya untuk menjaga keseimbangan ekosistem dan meminimalisir dampak negatif terhadap lingkungan. Buku ini membahas berbagai aspek perlindungan tanaman yang dirancang secara ekologis, mulai dari prinsip dasar hingga teknologi dan inovasi terbaru dalam bidang ini. Dengan pendekatan yang holistik, buku ini mengupas tantangan yang dihadapi dalam perlindungan tanaman, pendekatan ekologi, dan pemanfaatan mikroba sebagai agen hayati.

Kami berharap buku ini dapat menjadi referensi yang bermanfaat bagi mahasiswa, praktisi pertanian, dan siapa saja yang memiliki minat dalam bidang perlindungan tanaman berkelanjutan. Semoga buku ini juga dapat berkontribusi dalam mendorong pertanian yang lebih ramah lingkungan dan berkelanjutan di masa depan. Akhir kata, kami mengucapkan terima kasih kepada semua pihak yang telah memberikan dukungan dalam penyusunan buku ini. Saran dan masukan dari para pembaca sangat kami harapkan untuk perbaikan dan pengembangan lebih lanjut.

Padang, Oktober 2024

Penulis

DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR.....	i
DAFTAR ISI	ii
BAB 1 PENTINGNYA PERLINDUNGAN TANAMAN BERKELANJUTAN.....	1
1.1 Definisi dan Ruang Lingkup.....	1
1.1.1 Definisi Perlindungan Tanaman Berkelanjutan.....	1
1.1.2 Tujuan Perlindungan Tanaman Berkelanjutan	4
1.1.3 Implementasi Perlindungan Tanaman Berkelanjutan.....	9
1.2 Ruang Lingkup	11
1.3 Tujuan dan Manfaat	13
1.4 Manfaat Perlindungan Tanaman Berkelanjutan:	16
DAFTAR PUSTAKA.....	19
BAB 2 TANTANGAN DALAM PERLINDUNGAN TANAMAN.....	21
2.1 Pendahuluan	21
2.2 Penggunaan Pestisida Sintetis dalam Pertanian	
Konvensional.....	22
2.3 Monokultur dan Keanekaragaman Tanaman	24
2.4 Praktik Irigasi Intensif dalam Pertanian Konvensional.....	26
2.5 Penggunaan Pupuk Kimia dalam Pertanian Konvensional	28
2.6 Dampak Lingkungan dan Ekosistem	30
2.7 Kesimpulan.....	34
DAFTAR PUSTAKA.....	36
BAB 3 PENDEKATAN EKOLOGIS DALAM PERLINDUNGAN TANAMAN	41
3.1 Pendahuluan	41
3.2 Interaksi Tanaman-OPT	42
3.2.1 Interaksi tritropik tanaman dan herbivora.....	42
3.2.2 Ekologi penyakit tanaman (konsep segitiga penyakit)	45
3.2.3 Interaksi gulma-tanaman	48
3.3 PHT: Pengendalian OPT Berwawasan Ekologis.....	50
3.3.1 Pengendalian hayati	51
3.3.2 Pengelolaan habitat dan praktik agroekologi	53
3.3.3 Induksi ketahanan dan pemuliaan tanaman	54

3.3.4 Pengelolaan Hama Terpadu (PHT).....	55
3.3.5 Tantangan dan Arah Masa Depan	56
3.4 Kesimpulan.....	57
DAFTAR PUSTAKA	58
BAB 4 DASAR-DASAR PERLINDUNGAN TANAMAN	
BERKELANJUTAN.....	67
4.1 Pendahuluan	67
4.2 Prinsip-Prinsip Utama.....	68
4.2.1 Keanekaragaman Hayati.....	68
4.2.2 Keseimbangan Ekosistem	70
4.2.3 Penggunaan Sumber Daya Alam yang Berkelanjutan.....	72
4.2.4 Penerapan Teknologi Ramah Lingkungan.....	74
4.2.5 Keterlibatan dan Edukasi Masyarakat	76
4.3 Konsep Pengelolaan Terpadu	78
4.3.1 Pengelolaan Terpadu Hama (PTH).....	78
4.3.2 Pengelolaan Terpadu Penyakit Tanaman	80
4.3.3 Pengelolaan Terpadu Gulma	81
4.3.4 Kolaborasi Antara Berbagai Pihak.....	83
4.3.5 Evaluasi dan Pemantauan	84
4.4 Kesimpulan.....	85
DAFTAR PUSTAKA	87
BAB 5 PEMANFAATAN MIKROBA DALAM PERLINDUNGAN	
TANAMAN	89
5.1 Pendahuluan	89
5.1.1 Peran Mikroba Dalam Ekosistem	90
5.1.2 Konsep Agens Hayati Sebagai Pengendali hama dan Penyakit Tumbuhan	93
5.2 Cara Kerja Mikroba Sebagai Agens Hayati.....	94
5.2.1 Keuntungan Menggunakan Mikroba dalam Perlindungan Tanaman.....	95
5.2.2 Tantangan dan Pertimbangan Penggunaan Mikroba sebagai Agens Hayati	97
5.2.3 Arah Pengembangan Kedepan	99

5.3 Contoh-Contoh Mikroba yang Digunakan Sebagai Agen Pengendali Hayati.....	100
5.3.1 Agen Hayati dari Golongan Jamur.....	100
5.3.2 Agens Hayati dari Golongan Bakteri.....	102
5.3.3 Agen Hayati dari Golongan Virus.....	103
5.3.4 Agen Hayati dari Golongan Nematoda:.....	104
5.4.2 Bioremediasi Lahan.....	106
DAFTAR PUSTAKA.....	109
BAB 6 TEKNOLOGI DAN INOVASI DALAM PERLINDUNGAN TANAMAN	115
6.1 Pendahuluan.....	115
6.2 Teknologi Perlindungan Tanaman.....	117
6.3 Inovasi Perlindungan Tanaman	123
6.4 Penutup.....	126
DAFTAR PUSTAKA.....	127
BAB 7 PRAKTIK TERBAIK DALAM MANAJEMEN TANAMAN	135
7.1 Pendahuluan	135
7.2 Rotasi Tanam dan Teknik Budidaya.....	136
7.2.1 Rotasi Tanaman untuk Mengurangi Hama dan Penyakit.....	136
7.2.2 Perbaikan Struktur dan Kesuburan Tanah	137
7.2.3 Teknik Budidaya untuk Meningkatkan Kelembaban dan Mengurangi Erosi	138
7.2.4 Pengolahan Tanah Minimal untuk Menjaga Kesehatan Tanah.....	140
7.2.5 Peningkatan Aktivitas Mikroorganisme Tanah	141
7.2.6 Efisiensi Penggunaan Sumber Daya.....	142
7.2.7 Kontribusi terhadap Keberlanjutan Lingkungan.....	142
7.3 Pengelolaan Sumber Daya Alam	143
7.3.1 Penggunaan Air Secara Efisien.....	143
7.3.2 Manajemen Nutrisi Tanah dengan Pupuk Organik	144
7.3.3 Konservasi Keanekaragaman Hayati.....	146
7.3.4 Penerapan Sistem Agroforestri.....	147
7.3.5 Pengelolaan Tanah yang Berkelanjutan	147

7.3.6 Penggunaan Energi Terbarukan dalam Pertanian	149
7.3.7 Penerapan Praktik Pertanian Presisi.....	149
7.3.8 Pentingnya Pendidikan dan Penyuluhan Pertanian	150
7.4 Kesimpulan.....	151
DAFTAR PUSTAKA	153
BAB 8 MASA DEPAN PERLINDUNGAN TANAMAN	
BERKELANJUTAN.....	155
8.1 Aspek Perlindungan Tanaman Berkelanjutan.....	155
8.1.1 Pertanian Presisi dan Penerapan Teknologi Tinggi.....	155
8.2 Penunjang Perlindungan Tanaman Berkelanjutan	164
8.2.1 Pendidikan dan Kesadaran	164
8.2.2 Regulasi dan Kebijakan	166
8.2.3 Kolaborasi dan Penelitian	166
DAFTAR PUSTAKA	170

BAB 1

PENTINGNYA PERLINDUNGAN TANAMAN BERKELANJUTAN

Oleh Sopialena

1.1 Definisi dan Ruang Lingkup

1.1.1 Definisi Perlindungan Tanaman Berkelanjutan

Perlindungan tanaman berkelanjutan adalah pendekatan komprehensif dalam manajemen tanaman yang dirancang untuk memelihara dan meningkatkan kesehatan tanaman dengan cara yang ramah lingkungan dan berkelanjutan. Pendekatan ini menekankan pada penggunaan metode yang mengurangi dampak negatif terhadap ekosistem dan mempromosikan keseimbangan antara produktivitas pertanian dan keberlanjutan lingkungan. Berikut adalah penjelasan rinci mengenai konsep ini:

1. Prinsip Utama Perlindungan Tanaman Berkelanjutan

Meminimalkan dampak negatif

Minimalkan dampak negatif terhadap lingkungan adalah prinsip utama dalam perlindungan tanaman berkelanjutan, yang bertujuan untuk mengurangi ketergantungan pada pestisida kimia sintetis yang berpotensi mencemari tanah, air, dan udara serta

berdampak buruk pada kesehatan manusia dan ekosistem. Dalam rangka mencapai tujuan ini, pendekatan berkelanjutan menekankan pada konservasi tanah dan air melalui penerapan praktik yang menjaga kualitas tanah dan memastikan efisiensi penggunaan air. Strategi perlindungan tanaman berkelanjutan sangat penting untuk menjaga keanekaragaman hayati tanah dan memastikan produktivitas pertanian jangka panjang, sambil mendukung kesehatan tanaman dan menjaga keseimbangan ekosistem (Sara Del Duca et al., 2024).

2. Integrasi Teknik Ramah Lingkungan:

Integrasi teknik ramah lingkungan dalam perlindungan tanaman berkelanjutan melibatkan penerapan berbagai metode yang bekerja secara sinergis untuk mengelola hama dan penyakit secara efektif tanpa merusak lingkungan. Teknik biologis, misalnya, memanfaatkan organisme hidup seperti predator alami, parasitoid, dan patogen untuk mengendalikan hama dan penyakit. Contohnya termasuk memperkenalkan musuh alami hama atau menggunakan biopestisida berbasis mikroba yang dapat menargetkan hama tanpa mempengaruhi organisme non-target. Selain itu, teknik mekanis juga berperan penting dengan menggunakan alat dan metode fisik seperti perangkap hama atau penutup tanah, yang membantu mengontrol populasi hama tanpa menggunakan bahan kimia berbahaya. Strategi perlindungan penyakit tanaman berkelanjutan sangat penting untuk mengurangi ketergantungan pada pestisida kimia dan mempromosikan keseimbangan

ekologis dalam sistem pertanian (Berlin et al., 2018). Teknik kultur melengkapi pendekatan ini dengan menerapkan metode budidaya yang mendukung kesehatan tanaman secara keseluruhan, seperti rotasi tanaman untuk memutus siklus hidup hama, pemilihan varietas tanaman yang tahan penyakit, dan penanaman tanaman penutup yang dapat meningkatkan kesuburan tanah dan mengurangi kerentanan tanaman terhadap serangan hama. Integrasi ketiga teknik ini menciptakan sistem perlindungan tanaman yang holistik dan berkelanjutan (Oerke, 2006).

3. Pengelolaan Terpadu:

(P. A. Matson et al., 1996) menyebutkan bahwa pengelolaan terpadu dalam perlindungan tanaman berkelanjutan melibatkan pendekatan sistemik yang menggabungkan berbagai metode pengendalian dalam satu strategi manajerial untuk menciptakan solusi yang lebih holistik dan efektif. Dengan mengintegrasikan teknik biologis, mekanis, dan kultur, pendekatan ini memastikan bahwa berbagai aspek pengendalian hama dan penyakit dikelola secara sinergis untuk mencapai hasil (Arhin, 2024). Selain itu, observasi dan adaptasi merupakan bagian penting dari pengelolaan terpadu, yang melibatkan pemantauan kondisi tanaman, hama, dan lingkungan secara terus-menerus. Dengan memantau perkembangan ini, strategi perlindungan dapat disesuaikan dengan perubahan yang terjadi, memastikan bahwa metode yang diterapkan tetap relevan dan efektif dalam menghadapi tantangan yang muncul.

4. Fokus pada Keberlanjutan Ekosistem:

Pengelolaan terpadu dalam perlindungan tanaman berkelanjutan melibatkan pendekatan sistemik yang menggabungkan berbagai metode pengendalian dalam satu strategi manajerial untuk menciptakan solusi yang lebih holistik dan efektif. Dengan mengintegrasikan teknik biologis, mekanis, dan kultur, pendekatan ini memastikan bahwa berbagai aspek pengendalian hama dan penyakit dikelola secara sinergis untuk mencapai hasil yang optimal. Seperti Resistensi yang diinduksi pada tanaman menawarkan pendekatan yang menjanjikan untuk perlindungan tanaman berkelanjutan dengan meningkatkan mekanisme pertahanan alami tanaman. (Flors et al., 2024) Selain itu, observasi dan adaptasi merupakan bagian penting dari pengelolaan terpadu, yang melibatkan pemantauan kondisi tanaman, hama, dan lingkungan secara terus-menerus. Dengan memantau perkembangan ini, strategi perlindungan dapat disesuaikan dengan perubahan yang terjadi, memastikan bahwa metode yang diterapkan tetap relevan dan efektif dalam menghadapi tantangan yang muncul.

1.1.2 Tujuan Perlindungan Tanaman Berkelanjutan

1. Meningkatkan Kesehatan Tanaman:

Meningkatkan kesehatan tanaman merupakan aspek krusial dalam perlindungan tanaman berkelanjutan, di mana fokus utamanya adalah menerapkan metode yang mendukung kesehatan tanaman jangka panjang. Pendekatan ini melibatkan

serangkaian praktik yang dirancang untuk memperkuat ketahanan tanaman terhadap hama dan penyakit serta memastikan pertumbuhan yang optimal. Salah satu cara untuk mencapai ini adalah dengan menggunakan teknik budidaya yang mengoptimalkan kondisi lingkungan bagi tanaman, seperti pemilihan varietas yang tahan terhadap penyakit tertentu, dan menerapkan rotasi tanaman untuk memutus siklus hidup patogen. Selain itu, pengelolaan tanah yang baik, seperti penggunaan kompos dan teknik pengolahan tanah yang minimal, dapat meningkatkan kesuburan tanah dan mendukung sistem akar tanaman. Penerapan teknik ini tidak hanya memperbaiki kesehatan tanaman secara langsung tetapi juga membantu tanaman mengembangkan ketahanan alami terhadap stres biotik dan abiotik, memungkinkan mereka untuk tumbuh dengan lebih baik dan lebih produktif. Dengan demikian, metode ini berkontribusi pada keberhasilan jangka panjang dalam produksi pertanian yang berkelanjutan dan ramah lingkungan.

2. Mencapai Produktivitas yang Berkelanjutan:

Mencapai produktivitas yang berkelanjutan memerlukan keseimbangan yang cermat antara memenuhi kebutuhan hasil panen yang tinggi dan mematuhi prinsip-prinsip keberlanjutan lingkungan. Untuk mencapainya, petani harus mengadopsi metode yang tidak hanya fokus pada peningkatan hasil tetapi juga mempertimbangkan dampak jangka panjang terhadap ekosistem. Ini mencakup penerapan teknik seperti penggunaan varietas tanaman unggul yang mampu menghasilkan hasil panen tinggi sambil memerlukan input minimal, serta penerapan teknik

konservasi tanah dan air untuk menjaga kualitas sumber daya. Selain itu, pengelolaan hama dan penyakit secara terpadu yang mengintegrasikan metode biologis, mekanis, dan kultur dapat meningkatkan efisiensi produksi tanpa mengandalkan bahan kimia berbahaya yang dapat merusak ekosistem.

Prinsip keberlanjutan dalam produktivitas juga menuntut pengelolaan sumber daya secara bijaksana untuk menghindari eksploitasi berlebihan. Ini berarti memprioritaskan praktik seperti rotasi tanaman dan penggunaan pupuk organik untuk menjaga kesuburan tanah dan mencegah penurunan kualitas. Dengan memastikan bahwa metode pertanian tidak menghabiskan sumber daya secara berlebihan, seperti air dan energi, serta mengurangi limbah dan pencemaran, hasil panen yang tinggi dapat dicapai tanpa mengorbankan integritas lingkungan. Melalui pendekatan ini, produktivitas pertanian dapat diraih secara berkelanjutan, memberikan manfaat ekonomi bagi petani dan menjaga kesehatan ekosistem untuk generasi mendatang.

3. Meminimalkan Risiko Lingkungan:

Meminimalkan risiko lingkungan dalam pertanian berkelanjutan melibatkan upaya untuk mengurangi pencemaran tanah, air, dan udara yang sering kali disebabkan oleh praktik pertanian konvensional. Salah satu cara utama untuk mencapai ini adalah dengan mengurangi penggunaan bahan kimia berbahaya seperti pestisida dan pupuk sintetis, yang dapat mencemari tanah dan air melalui limpasan dan perkolasi. Praktik

seperti penggunaan pupuk organik, pengelolaan limbah pertanian, dan teknik konservasi tanah dapat membantu menjaga kualitas tanah dan mengurangi risiko pencemaran. Selain itu, sistem pengendalian hama terpadu yang menggabungkan metode biologis dan mekanis membantu mengurangi ketergantungan pada pestisida kimia, yang pada gilirannya mengurangi dampak negatif terhadap lingkungan.

Pengelolaan risiko lingkungan juga mencakup perlindungan kesehatan manusia dan fauna non-target dari dampak negatif aktivitas pertanian. Ini melibatkan penerapan praktik yang meminimalkan paparan bahan kimia berbahaya, seperti penggunaan pelindung diri bagi petani dan pengaturan waktu aplikasi pestisida untuk mengurangi kontak dengan manusia dan hewan. Selain itu, teknik seperti penanaman tanaman penutup dan buffer zones dapat membantu melindungi ekosistem sekitar dengan mencegah drift pestisida dan mengurangi pencemaran. Dengan mengadopsi metode ini, risiko terhadap kesehatan manusia dan fauna non-target dapat diminimalkan, sambil menjaga keseimbangan dan keberlanjutan lingkungan.

4. Mendorong Praktik Pertanian yang Bertanggung Jawab:

Mendorong praktik pertanian yang bertanggung jawab melibatkan adopsi dan promosi metode yang mendukung keberlanjutan, pelestarian lingkungan, dan penggunaan sumber daya secara bijaksana. Ini termasuk implementasi teknik-teknik yang meminimalkan dampak negatif terhadap ekosistem, seperti rotasi tanaman, yang membantu mengurangi tekanan hama

dan penyakit, serta meningkatkan kesuburan tanah. Penggunaan pupuk organik dan kompos menggantikan pupuk kimia sintetis, memelihara kesehatan tanah dan mengurangi risiko pencemaran air. Praktik konservasi air, seperti sistem irigasi yang efisien dan pengumpulan air hujan, memastikan bahwa sumber daya air digunakan secara optimal dan berkelanjutan. Selain itu, promosi pertanian berbasis agroekologi dan sistem pertanian terpadu yang mengintegrasikan berbagai aspek ekosistem secara harmonis mendukung pelestarian biodiversitas dan keberlanjutan jangka panjang.

Di samping itu, penting untuk mendorong kesadaran dan pendidikan di kalangan petani dan masyarakat tentang pentingnya praktik pertanian yang bertanggung jawab. Program pelatihan dan workshop dapat membantu petani memahami manfaat dari teknik-teknik berkelanjutan dan bagaimana menerapkannya dalam praktik sehari-hari. Pengembangan kebijakan dan insentif yang mendukung penerapan praktik ramah lingkungan juga berperan penting, seperti subsidi untuk penggunaan teknologi hijau dan bantuan teknis untuk adopsi metode baru. Dengan mengadopsi dan mempromosikan praktik ini, pertanian dapat menjadi lebih berkelanjutan, mendukung pelestarian lingkungan, dan memastikan penggunaan sumber daya yang bijaksana untuk masa depan.

1.1.3 Implementasi Perlindungan Tanaman Berkelanjutan

Implementasi perlindungan tanaman berkelanjutan memerlukan perencanaan yang matang dan pelaksanaan strategi yang terkoordinasi. Langkah pertama dalam implementasi ini adalah edukasi petani, yang merupakan kunci untuk memastikan bahwa praktik berkelanjutan diterapkan secara efektif. Pelatihan kepada petani tentang teknik-teknik ramah lingkungan, seperti penggunaan biopestisida, rotasi tanaman, dan konservasi tanah, sangat penting. Selain itu, edukasi harus mencakup pemahaman mengenai manfaat jangka panjang dari pendekatan berkelanjutan, termasuk peningkatan hasil panen, pelestarian lingkungan, dan pengurangan biaya operasional. Program pelatihan yang sistematis dan berkelanjutan akan membantu petani mengadopsi praktik yang lebih ramah lingkungan dan meningkatkan keterampilan mereka dalam mengelola tanaman secara berkelanjutan.

Langkah berikutnya adalah pemantauan dan evaluasi, yang bertujuan untuk menilai efektivitas strategi perlindungan tanaman yang diterapkan. Proses ini melibatkan pengumpulan data tentang kondisi tanaman, populasi hama, dan kesehatan ekosistem secara rutin. Dengan data yang akurat, petani dan ahli dapat menilai keberhasilan metode yang digunakan, mengidentifikasi area yang perlu diperbaiki, dan melakukan penyesuaian yang diperlukan. Evaluasi ini juga membantu dalam mengidentifikasi tantangan baru yang mungkin muncul dan mengadaptasi strategi perlindungan untuk mengatasi perubahan kondisi lingkungan atau serangan hama yang baru.

Inovasi dan penelitian merupakan komponen penting dalam implementasi perlindungan tanaman berkelanjutan. Mendorong penelitian untuk mengembangkan metode baru yang lebih efektif dan ramah lingkungan dapat membantu mengatasi tantangan yang muncul dan meningkatkan hasil perlindungan tanaman. Penelitian dapat mencakup pengembangan biopestisida baru, teknik budidaya inovatif, atau sistem pemantauan canggih yang lebih efisien. Dengan mendukung inovasi, sektor pertanian dapat memperoleh solusi yang lebih baik dan lebih berkelanjutan, yang pada gilirannya akan meningkatkan efisiensi dan keberhasilan praktik perlindungan tanaman.

Akhirnya, implementasi perlindungan tanaman berkelanjutan memerlukan kolaborasi antara berbagai pemangku kepentingan, termasuk petani, peneliti, lembaga pemerintah, dan organisasi non-pemerintah. Kolaborasi ini penting untuk menciptakan kebijakan yang mendukung, berbagi pengetahuan dan teknologi, serta menyediakan dukungan finansial dan teknis. Dengan bekerja sama, para pemangku kepentingan dapat memastikan bahwa praktik perlindungan tanaman yang berkelanjutan diterapkan secara luas dan efektif, mendukung keberlanjutan pertanian, dan melindungi lingkungan untuk masa depan. Dengan pendekatan ini, perlindungan tanaman berkelanjutan bertujuan untuk mencapai keseimbangan antara kebutuhan produksi pangan dan pelestarian lingkungan, memastikan keberlanjutan jangka panjang dalam pertanian dan ekosistem secara keseluruhan.

1.2 Ruang Lingkup

Ruang lingkup perlindungan tanaman berkelanjutan meliputi:

Strategi Pengendalian Terpadu merupakan pendekatan komprehensif dalam manajemen tanaman yang menggabungkan berbagai metode untuk mengelola hama dan penyakit secara efektif dan berkelanjutan. Pendekatan ini melibatkan penggunaan biopestisida, yang terbuat dari bahan alami dan aman bagi lingkungan, untuk mengendalikan hama tanpa mengganggu keseimbangan ekosistem. Selain itu, teknik ini juga memanfaatkan predator alami dan parasitoid yang dapat secara biologis mengendalikan populasi hama, mengurangi kebutuhan akan bahan kimia berbahaya. Teknik budidaya inovatif, seperti rotasi tanaman dan penggunaan varietas tahan penyakit, juga berperan penting dalam mengurangi kerentanan tanaman terhadap serangan hama dan penyakit. Dengan mengintegrasikan berbagai metode ini, strategi pengendalian terpadu menciptakan sistem perlindungan yang lebih holistik dan berkelanjutan.

Pengelolaan Sumber Daya Alam adalah aspek krusial dalam memastikan keberlanjutan pertanian. Praktik yang mendukung pengelolaan sumber daya seperti tanah, air, dan energi sangat penting untuk mencegah degradasi dan memastikan bahwa sumber daya ini dapat digunakan secara optimal dalam jangka panjang. Teknik konservasi tanah, seperti penanaman tanaman penutup dan pengolahan tanah yang minimal, membantu mencegah erosi dan menjaga kesuburan tanah. Pengelolaan air yang efisien, melalui sistem irigasi yang hemat air dan teknik pengumpulan air

hujan, membantu mengurangi pemborosan dan memastikan ketersediaan air untuk tanaman. Praktik ini tidak hanya mendukung kesehatan tanaman tetapi juga melindungi lingkungan dan memastikan keberlanjutan produksi pertanian.

Edukasi dan kesadaran merupakan elemen penting dalam implementasi perlindungan tanaman berkelanjutan. Meningkatkan pengetahuan petani dan masyarakat tentang pentingnya praktik perlindungan tanaman yang ramah lingkungan dapat mendorong adopsi metode yang lebih berkelanjutan. Program pelatihan yang memberikan informasi tentang teknik-teknik terbaru, manfaat dari penggunaan biopestisida, dan cara-cara menjaga kesehatan tanah dan air sangat bermanfaat. Selain itu, kampanye kesadaran publik dapat membantu meningkatkan pemahaman tentang dampak lingkungan dari praktik pertanian konvensional dan mendorong dukungan untuk praktik yang lebih ramah lingkungan.

Kebijakan dan regulasi memainkan peran penting dalam mendukung implementasi praktik pertanian berkelanjutan. Kebijakan yang mendukung perlindungan tanaman berkelanjutan harus mencakup insentif untuk petani yang menerapkan metode ramah lingkungan, seperti subsidi untuk pembelian biopestisida atau bantuan teknis untuk penerapan teknik budidaya inovatif. Regulasi yang ketat mengenai penggunaan bahan kimia dan standar lingkungan juga penting untuk memastikan bahwa praktik pertanian tidak merusak ekosistem atau kesehatan manusia. Dengan menciptakan kerangka kebijakan yang mendukung

dan memberikan insentif yang memadai, pemerintah dapat mendorong adopsi praktik pertanian yang berkelanjutan dan memastikan bahwa upaya perlindungan tanaman berkelanjutan diterapkan secara luas dan efektif.

1.3 Tujuan dan Manfaat

Tujuan Perlindungan Tanaman Berkelanjutan:

Mengurangi Dampak Lingkungan merupakan langkah fundamental dalam perlindungan tanaman berkelanjutan yang bertujuan untuk mengurangi penggunaan bahan kimia berbahaya dan mencegah pencemaran tanah dan air. Penggunaan pestisida dan pupuk kimia sintetis yang berlebihan dapat menyebabkan pencemaran tanah dan air melalui limpasan dan perkolasi, yang berdampak negatif pada kualitas tanah dan kesehatan ekosistem akuatik. Oleh karena itu, penting untuk beralih ke alternatif yang lebih ramah lingkungan, seperti biopestisida dan pupuk organik, yang dapat mengurangi risiko pencemaran tanpa mengorbankan efisiensi perlindungan tanaman. Implementasi teknik konservasi tanah, seperti penanaman tanaman penutup dan pengolahan tanah yang minimal, juga dapat membantu mengurangi erosi dan menjaga kualitas tanah, sementara sistem irigasi yang hemat air mencegah pemborosan dan mengurangi dampak negatif terhadap sumber daya air.

Meningkatkan kesehatan tanaman adalah tujuan utama dalam pendekatan berkelanjutan, di mana fokusnya adalah menyediakan solusi yang mendukung kesehatan tanaman dan mengurangi kerusakan yang disebabkan oleh hama dan penyakit. Teknik seperti rotasi tanaman,

penggunaan varietas tanaman yang tahan terhadap penyakit, dan penerapan praktik budidaya yang baik dapat memperkuat ketahanan tanaman terhadap serangan hama dan penyakit. Selain itu, penggunaan metode pengendalian biologis, seperti memperkenalkan predator alami dan parasitoid, dapat mengurangi ketergantungan pada bahan kimia berbahaya, mendukung kesehatan tanaman secara alami. Dengan memastikan bahwa tanaman mendapatkan kondisi yang optimal, termasuk nutrisi yang memadai dan perlindungan yang efektif, produktivitas dan kualitas hasil panen dapat ditingkatkan secara berkelanjutan (Miguel A. Altieri, 2018)

Meningkatkan keberlanjutan produksi pertanian melibatkan upaya untuk meningkatkan efisiensi dan produktivitas pertanian dalam jangka panjang sambil menjaga keseimbangan ekosistem. Pendekatan ini mencakup penerapan teknik yang mengoptimalkan penggunaan sumber daya, seperti pemupukan yang tepat dan penggunaan teknologi pertanian yang inovatif. Teknik konservasi tanah dan air, serta pengelolaan yang bijaksana terhadap hama dan penyakit, berkontribusi pada keberlanjutan dengan mengurangi dampak negatif terhadap ekosistem dan memastikan bahwa sumber daya yang digunakan dalam produksi pertanian tidak habis atau merusak lingkungan (Gliessman, 2015) Dengan menjaga keseimbangan ini, pertanian dapat berlangsung secara berkelanjutan dan memastikan keberhasilan produksi dalam jangka panjang.

Mempertahankan keanekaragaman hayati adalah aspek penting dari perlindungan tanaman berkelanjutan yang berfokus pada melindungi dan memelihara spesies mikroba, tanaman, dan hewan yang mendukung kesehatan ekosistem pertanian. Keanekaragaman hayati berkontribusi pada stabilitas ekosistem dengan mendukung proses ekologi yang penting, seperti penyerbukan dan pengendalian hama alami. Teknik budidaya yang ramah lingkungan, seperti penanaman tanaman penutup dan penerapan sistem agroforestri, dapat meningkatkan keanekaragaman hayati di lahan pertanian. Selain itu, melindungi habitat alami dan memastikan bahwa praktik pertanian tidak merusak spesies non-target membantu menjaga keseimbangan ekosistem dan mendukung kesehatan jangka panjang sistem pertanian (Ratnadass et al., 2011)

Mengoptimalkan penggunaan sumber daya adalah bagian integral dari implementasi perlindungan tanaman berkelanjutan, di mana teknik yang lebih efisien diterapkan untuk penggunaan air, tanah, dan energi. Sistem irigasi yang hemat air, seperti irigasi tetes, membantu mengurangi pemborosan air dan memastikan bahwa tanaman mendapatkan jumlah yang tepat. Pengelolaan tanah yang efisien, termasuk teknik konservasi dan penggunaan pupuk organik, mendukung kesuburan tanah tanpa mengandalkan bahan kimia berbahaya. Selain itu, teknologi energi terbarukan dan praktik yang mengurangi konsumsi energi dalam operasi pertanian dapat meningkatkan efisiensi dan mengurangi dampak lingkungan. Dengan menerapkan teknik-teknik ini, pertanian dapat mencapai efisiensi yang lebih tinggi dan keberlanjutan dalam penggunaan sumber

daya, mendukung produksi pertanian yang berkelanjutan dan ramah lingkungan.

1.4 Manfaat Perlindungan Tanaman Berkelanjutan:

Lingkungan yang lebih sehat adalah salah satu hasil utama dari penerapan praktik perlindungan tanaman berkelanjutan. Dengan mengurangi polusi yang disebabkan oleh penggunaan pestisida kimia dan pupuk sintetis, serta mencegah pencemaran tanah dan air, pendekatan ini mendukung pemulihan dan pelestarian ekosistem alami. Teknik seperti penggunaan biopestisida dan pupuk organik tidak hanya mengurangi dampak negatif terhadap lingkungan, tetapi juga mendukung keberagaman hayati dengan melindungi spesies mikroba, tanaman, dan hewan yang penting untuk kesehatan ekosistem. Praktik konservasi tanah dan air, seperti penanaman tanaman penutup dan sistem irigasi yang efisien, membantu menjaga kualitas tanah dan mencegah erosi, memastikan bahwa lingkungan tetap sehat dan produktif untuk generasi mendatang.

Keuntungan ekonomi dari perlindungan tanaman berkelanjutan dapat sangat signifikan, terutama dalam jangka panjang. Dengan mengurangi ketergantungan pada pestisida kimia yang mahal dan seringkali berbahaya, petani dapat menurunkan biaya operasional dan meminimalkan kerugian akibat pencemaran dan kerusakan tanah. Metode yang lebih efektif dan ramah lingkungan, seperti penggunaan biopestisida dan teknik budidaya inovatif, dapat meningkatkan hasil panen dan efisiensi produksi. Selain itu, dengan mengurangi dampak negatif terhadap tanah dan air,

pertanian dapat menghindari biaya pembersihan dan rehabilitasi yang tinggi, menghasilkan keuntungan ekonomi yang berkelanjutan dan meningkatkan profitabilitas jangka panjang (Pimentel & Burgess, 2014)

Kesehatan manusia dan hewan merupakan perhatian penting dalam perlindungan tanaman berkelanjutan. Dengan mengurangi paparan bahan kimia berbahaya yang sering digunakan dalam praktik pertanian konvensional, pendekatan ini membantu melindungi kesehatan manusia dan hewan peliharaan. Pestisida kimia dan pupuk sintetis dapat memiliki efek buruk pada kesehatan melalui paparan langsung atau kontaminasi makanan dan air. Dengan beralih ke biopestisida dan pupuk organik, serta menerapkan metode pengendalian yang lebih aman, risiko kesehatan dapat diminimalkan (Joop C. van Lenteren, 2012). Hal ini penting untuk melindungi komunitas lokal dan memastikan bahwa produk pertanian yang dikonsumsi aman dan tidak mengandung residu berbahaya.

Ketahanan pangan adalah aspek kunci dari pertanian berkelanjutan yang membantu mengatasi tantangan perubahan iklim dan fluktuasi pasar. Dengan meningkatkan ketahanan sistem pertanian melalui praktik yang ramah lingkungan, seperti diversifikasi tanaman dan penggunaan varietas tahan penyakit, pertanian dapat lebih baik menghadapi kondisi cuaca ekstrem dan perubahan lingkungan (Pretty *et al.*, 2003). Pendekatan berkelanjutan juga membantu menjaga ketersediaan pangan yang aman dan berkualitas dengan memastikan bahwa tanah tetap subur dan sumber daya air tetap terjaga. Dengan demikian,

pertanian berkelanjutan berkontribusi pada ketahanan pangan global dan memastikan bahwa pangan yang dihasilkan memenuhi standar kualitas dan keamanan yang tinggi.

Peningkatan pengetahuan dan keterampilan merupakan manfaat tambahan dari penerapan praktik perlindungan tanaman berkelanjutan. Mendorong inovasi dan pengetahuan dalam praktik pertanian melalui penelitian dan pendidikan membantu petani mengadopsi metode yang lebih efektif dan ramah lingkungan. Pelatihan yang baik meningkatkan keterampilan petani, memungkinkan mereka untuk menerapkan teknik-teknik terbaru dan berbasis sains dalam operasional sehari-hari. Selain itu, promosi pendekatan berbasis sains dan teknologi baru dalam pertanian mendorong pertukaran pengetahuan dan pengalaman yang memperkaya praktik pertanian. Dengan demikian, peningkatan pengetahuan dan keterampilan petani tidak hanya mendukung praktik berkelanjutan tetapi juga memajukan industri pertanian secara keseluruhan (Horne, P. A., and Page, J., 2008). Dengan mendalami sub bab ini, pembaca akan mendapatkan pemahaman mendalam tentang pentingnya perlindungan tanaman berkelanjutan serta bagaimana pendekatan ini dapat diterapkan untuk mencapai hasil yang optimal dan berkelanjutan dalam pertanian.

DAFTAR PUSTAKA

- Berlin, A., Källström, H. N., Lindgren, A., & Olson, Å. (2018). Scientific evidence for sustainable plant disease protection strategies for the main arable crops in Sweden. A systematic map protocol. *Environmental Evidence*, 7(1). <https://doi.org/10.1186/s13750-018-0141-3>
- Flors, V., Kyndt, T., Mauch-Mani, B., Pozo, M. J., Ryu, C.-M., & Ton, J. (2024). Enabling sustainable crop protection with induced resistance in plants. *Frontiers in Science*, 2. <https://doi.org/10.3389/fsci.2024.1407410>
- Gliessman, S. R. . (2015). Agroecology: the ecology of sustainable food systems. *CRC Press*.
- Joop C. van Lenteren. (2012). The state of commercial augmentative biological control: Plenty of natural enemies, but a frustrating lack of uptake. *BioControl*, 57(1), 1–20. <https://doi.org/10.1007/s10526-011-9395-1>
- Miguel A. Altieri. (2018). *Agroecology: The Science of Sustainable Agriculture*.
- Oerke, E. C. (2006). Crop losses to pests. In *Journal of Agricultural Science* (Vol. 144, Issue 1, pp. 31–43). <https://doi.org/10.1017/S0021859605005708>
- P. A. Matson, W. J. Parton, A. G. Power, & M. J. Swift. (1996). Agricultural Intensification and Ecosystem Properties. In 57. R. J. Hobbs and L. Atkins, *Aust. J. Ecol* (Vol. 379). Kluwer Academic. www.sciencemag.org

- Pimentel, D., & Burgess, M. (2014). Environmental and economic costs of the application of pesticides primarily in the United States. In Integrated Pest Management (Ed.), *Integrated Pest Management* (Vol. 3, pp. 47–71). Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-94-007-7796-5_2
- Ratnadass, A., Fernandes, P., Avelino, J., & Habib, R. (2011). Plant species diversity for sustainable management of crop pests and diseases in agroecosystems: A review. In *Agronomy for Sustainable Development* (Vol. 32, Issue 1, pp. 273–303). <https://doi.org/10.1007/s13593-011-0022-4>
- Sara Del Duca, Stefano Mocali, Francesco Vitali, Arturo Fabiani, & Maria Alexandra Cucu. (2024). Impacts of Soil Management and Sustainable Plant Protection Strategies on Soil Biodiversity in a Sangiovese Vineyard. *Land*, 13(5). <https://doi.org/10.3390/land13050599>

BAB 2

TANTANGAN DALAM PERLINDUNGAN TANAMAN

Oleh Sofian

2.1 Pendahuluan

Perlindungan tanaman merupakan aspek krusial dalam pembangunan pertanian, tetapi pendekatan konvensional seringkali menghadirkan tantangan tersendiri. Sistem pertanian konvensional cenderung bergantung pada penggunaan pestisida kimia dan pupuk sintetis untuk mengendalikan hama dan meningkatkan hasil panen. Namun, penggunaan berlebihan bahan kimia ini dapat menyebabkan ketahanan hama terhadap pestisida, menurunkan kesuburan tanah, dan mengurangi keanekaragaman hayati. Selain itu, metode konvensional ini seringkali tidak mempertimbangkan faktor-faktor lokal dan spesifik tanaman, yang dapat menyebabkan kesulitan dalam penerapan praktik pertanian yang berkelanjutan dan efisien.

Dampak lingkungan dan ekosistem akibat metode pertanian konvensional juga menjadi perhatian utama. Penggunaan pestisida dan pupuk kimia tidak hanya mempengaruhi organisme target, tetapi juga organisme non-target, termasuk serangga penyerbuk, mikroorganisme tanah, dan hewan lainnya. Pencemaran air akibat limpasan

bahan kimia dari lahan pertanian dapat merusak ekosistem perairan, mengurangi kualitas air, dan mengganggu kehidupan akuatik. Selain itu, konversi lahan untuk pertanian intensif seringkali menyebabkan hilangnya habitat alami, mengancam spesies endemik, dan mempercepat degradasi ekosistem. Oleh karena itu, diperlukan pendekatan baru yang lebih berkelanjutan untuk mengatasi tantangan ini dan melindungi tanaman secara efektif tanpa merusak lingkungan.

2.2 Penggunaan Pestisida Sintetis dalam Pertanian Konvensional

Penggunaan pestisida sintetis adalah salah satu ciri utama pertanian konvensional, yang bertujuan untuk mengendalikan hama dan penyakit yang mengancam hasil panen (Smith, J., & Lee, 2018). Pestisida ini biasanya dirancang untuk membunuh atau menghambat pertumbuhan spesies yang dianggap merugikan. Namun, residu dari bahan kimia ini sering kali tertinggal pada produk pertanian dan tanah, yang kemudian dapat memasuki rantai makanan. Residu ini tidak hanya berdampak pada kesehatan manusia melalui konsumsi pangan, tetapi juga dapat membahayakan hewan yang terpapar secara tidak langsung. Misalnya, residu pestisida dapat terakumulasi dalam jaringan hewan, menyebabkan efek toksik yang berbahaya (Brown, P., & Jones, 2020).

Salah satu masalah besar yang muncul dari penggunaan pestisida sintetis adalah perkembangan resistensi pada hama. Hama yang terpapar secara terus-menerus terhadap pestisida tertentu dapat mengalami

seleksi alam yang membuat mereka lebih tahan terhadap bahan kimia tersebut (Anderson, D., & Fuchs, 2019). Hal ini memaksa petani untuk menggunakan dosis yang lebih tinggi atau mencari pestisida yang lebih kuat, yang pada gilirannya dapat meningkatkan biaya produksi dan risiko kesehatan. Resistensi ini juga dapat mengurangi efektivitas pestisida, sehingga hama menjadi lebih sulit dikendalikan dan dapat menyebabkan kerugian ekonomi yang signifikan. Dalam jangka panjang, ketergantungan pada pestisida sintetis dapat menyebabkan siklus ketergantungan yang sulit diputus, di mana hama terus beradaptasi dan berkembang lebih kuat (Anderson, D., & Fuchs, 2019).

Selain itu, penggunaan pestisida sintetis juga dapat menyebabkan polusi lingkungan yang serius. Pestisida yang tidak terserap oleh tanaman dapat tercuci ke badan air melalui aliran permukaan atau perkolasi ke dalam air tanah, mencemari sumber air dan merusak habitat akuatik. Organisme non-target, seperti serangga penyerbuk dan predator alami hama, juga sering terkena dampak negatif dari pestisida ini. Penurunan populasi serangga penyerbuk dapat berdampak buruk pada proses penyerbukan tanaman, mengurangi hasil panen dan merusak keseimbangan ekosistem. Selain itu, hilangnya predator alami dapat mengganggu kontrol biologis hama, yang biasanya membantu menjaga populasi hama dalam batas yang aman (Brown, P., & Jones, 2020). Oleh karena itu, meskipun pestisida sintetis memberikan solusi jangka pendek terhadap masalah hama, dampak jangka panjangnya terhadap kesehatan manusia, lingkungan, dan ekonomi harus dipertimbangkan dengan serius.

2.3 Monokultur dan Keanekaragaman Tanaman

Monokultur, atau penanaman satu jenis tanaman secara luas di suatu area, adalah praktik yang umum dalam sistem pertanian konvensional. Praktik ini dilakukan untuk memaksimalkan efisiensi produksi, karena memungkinkan penggunaan teknologi pertanian seperti mesin dan input seperti pupuk dan pestisida secara lebih terfokus dan efisien (Anastasiou, et al., 2021). Dengan monokultur, petani dapat mengelola ladang dengan lebih mudah, mengurangi biaya operasional, dan meningkatkan hasil panen dalam jangka pendek. Selain itu, homogenitas tanaman memungkinkan penerapan strategi yang lebih terstandarisasi, memudahkan perawatan tanaman dan panen .

Namun, penerapan monokultur memiliki risiko besar bagi keanekaragaman genetik tanaman. Keanekaragaman genetik merupakan kunci ketahanan tanaman terhadap hama, penyakit, dan perubahan lingkungan. Ketika hanya satu jenis tanaman yang ditanam dalam skala besar, variasi genetik dalam populasi tanaman tersebut menjadi sangat terbatas. Akibatnya, jika terjadi serangan hama atau penyakit, seluruh tanaman dalam area tersebut berisiko terinfeksi, karena kurangnya individu yang mungkin memiliki ketahanan alami. Sebagai contoh, wabah penyakit hawar daun bakteri (Bacterial Leaf Blight) pada tanaman padi dapat menyebar dengan cepat di lahan monokultur karena semua tanaman memiliki kerentanan yang sama (Garcia, M., & Sanchez, 2020).

Selain meningkatkan kerentanan terhadap hama dan penyakit, monokultur juga dapat mengganggu keseimbangan ekosistem alami. Dalam lingkungan pertanian

yang didominasi oleh satu jenis tanaman, habitat bagi spesies lain yang bergantung pada keanekaragaman tanaman untuk makanan dan perlindungan menjadi terbatas. Misalnya, serangga penyerbuk, burung, dan mamalia kecil mungkin tidak menemukan sumber makanan yang cukup atau tempat berlindung di area monokultur. Kehilangan habitat ini dapat menyebabkan penurunan populasi spesies-spesies tersebut, yang pada gilirannya dapat mengganggu rantai makanan dan keseimbangan ekosistem secara keseluruhan (El-Dessouki et al., 2022).

Lebih jauh lagi, monokultur dapat mengarah pada masalah kesuburan tanah. Tanaman yang sama secara terus-menerus mengekstraksi nutrisi spesifik dari tanah, yang dapat menyebabkan ketidakseimbangan nutrisi dan penurunan kesuburan tanah dalam jangka panjang. Tanah yang terus-menerus ditanami tanaman yang sama juga cenderung mengalami penumpukan patogen tanah yang spesifik pada tanaman tersebut, yang dapat memperburuk masalah penyakit (Egan et al., 2021). Selain itu, praktik pengolahan tanah yang sama secara terus-menerus dapat mengurangi struktur tanah, menyebabkan erosi, dan menurunkan kemampuan tanah untuk menyimpan air. Akibatnya, sistem pertanian monokultur, meskipun mungkin menguntungkan dalam jangka pendek, berpotensi menyebabkan kerugian ekologis dan ekonomi yang signifikan dalam jangka panjang.

2.4 Praktik Irigasi Intensif dalam Pertanian Konvensional

Praktik irigasi intensif adalah metode umum yang digunakan dalam pertanian konvensional untuk memastikan bahwa tanaman mendapatkan pasokan air yang cukup. Teknik ini melibatkan penggunaan sejumlah besar air untuk irigasi ladang, terutama di daerah dengan curah hujan yang tidak memadai atau di musim kemarau. Meskipun irigasi intensif dapat meningkatkan produktivitas pertanian dengan menjaga kelembaban tanah yang optimal, penggunaan air yang berlebihan sering kali menimbulkan berbagai masalah lingkungan yang serius. Salah satu konsekuensi utama adalah penurunan ketersediaan air di daerah tersebut, karena sumber air tanah dan permukaan terkuras lebih cepat daripada laju pengisian ulangannya. Hal ini dapat mengancam ketersediaan air untuk kebutuhan domestik, industri, dan ekosistem alami.

Selain mengurangi ketersediaan air, irigasi intensif juga dapat menyebabkan salinisasi tanah. Proses ini terjadi ketika air irigasi yang mengandung mineral terlarut menguap, meninggalkan garam-garam di permukaan tanah. Akumulasi garam ini dapat merusak struktur tanah, mengurangi porositas, dan menurunkan kesuburan tanah, sehingga sulit bagi tanaman untuk menyerap air dan nutrisi. Salinisasi tanah tidak hanya mengurangi produktivitas pertanian tetapi juga dapat mengakibatkan degradasi lahan yang luas, membuat lahan tersebut tidak layak untuk pertanian di masa depan. Selain itu, tanah yang terlalu asin dapat membatasi jenis tanaman yang bisa ditanam, sehingga

mengurangi keanekaragaman tanaman dan potensi rotasi tanaman yang sehat.

Praktik irigasi intensif juga berpotensi mencemari sumber air tawar dengan pestisida dan pupuk kimia yang digunakan dalam pertanian konvensional. Air irigasi yang mengalir di ladang dapat membawa bahan kimia ini ke sungai, danau, dan air tanah, menyebabkan pencemaran yang merugikan. Kontaminasi ini dapat berdampak serius pada ekosistem akuatik, mengganggu kehidupan ikan dan organisme air lainnya, serta merusak kualitas air yang digunakan untuk keperluan domestik dan industri. Pestisida dan pupuk yang terlarut dalam air dapat menyebabkan eutrofikasi, yaitu pertumbuhan alga yang berlebihan, yang dapat mengurangi kadar oksigen dalam air dan menyebabkan kematian ikan serta organisme akuatik lainnya (Miller, S., & Green, 2021).

Masalah irigasi intensif tidak hanya terbatas pada pencemaran dan penurunan kualitas tanah tetapi juga berkontribusi terhadap masalah sosial dan ekonomi. Penggunaan air yang berlebihan dalam pertanian dapat menimbulkan konflik antara petani dan pengguna air lainnya, seperti penduduk lokal dan industri. Kekurangan air yang diakibatkan oleh irigasi intensif dapat meningkatkan biaya air dan mengurangi akses masyarakat terhadap air bersih. Selain itu, biaya operasional yang tinggi untuk sistem irigasi dan pemeliharannya dapat menjadi beban bagi petani, terutama di daerah yang sumber dayanya terbatas. Ketergantungan pada irigasi intensif juga dapat mengurangi fleksibilitas petani dalam menghadapi variabilitas iklim,

karena sistem ini memerlukan pasokan air yang stabil dan konsisten (Sishodia RP, Ray RL, 2020).

Dalam jangka panjang, keberlanjutan praktik irigasi intensif menjadi perhatian yang serius. Dengan meningkatnya tekanan pada sumber daya air global akibat perubahan iklim, pertumbuhan populasi, dan urbanisasi, kebutuhan akan praktik pertanian yang lebih efisien dan ramah lingkungan semakin mendesak. Inovasi dalam teknologi irigasi, seperti irigasi tetes dan irigasi presisi, serta pendekatan manajemen air yang terpadu, diperlukan untuk mengoptimalkan penggunaan air dan mengurangi dampak negatifnya. Selain itu, pemantauan dan pengelolaan yang tepat dari sumber daya air, serta kebijakan yang mendukung praktik pertanian berkelanjutan, sangat penting untuk memastikan bahwa irigasi intensif tidak merusak lingkungan dan kesejahteraan manusia di masa depan (Lamichhane et al., 2016).

2.5 Penggunaan Pupuk Kimia dalam Pertanian Konvensional

Pertanian konvensional sangat mengandalkan pupuk kimia untuk menyediakan nutrisi yang diperlukan tanaman guna meningkatkan hasil panen. Pupuk kimia, terutama yang mengandung nitrogen (N) dan fosfor (P), berperan penting dalam mempercepat pertumbuhan tanaman, meningkatkan ukuran buah, dan meningkatkan produktivitas lahan. Dengan pupuk ini, petani dapat mencapai hasil panen yang lebih tinggi dalam waktu yang lebih singkat, sehingga memenuhi permintaan pasar yang terus meningkat (Garcia, M., & Sanchez, 2020). Namun, meskipun efektif dalam jangka

pendek, penggunaan pupuk kimia secara berlebihan dapat menimbulkan dampak negatif yang signifikan terhadap lingkungan dan kesehatan manusia (Miller, S., & Green, 2021).

Salah satu dampak utama dari penggunaan pupuk kimia yang berlebihan adalah eutrofikasi. Eutrofikasi terjadi ketika kelebihan nutrisi, khususnya nitrogen dan fosfor, terlarut dalam air hujan dan terbawa ke badan air seperti sungai, danau, dan laut. Peningkatan konsentrasi nutrisi ini dapat menyebabkan pertumbuhan alga yang berlebihan, yang dikenal sebagai "ledakan alga." Ledakan alga ini dapat menghalangi sinar matahari masuk ke dalam air, mengurangi fotosintesis tanaman air, dan merusak habitat akuatik (Egan et al., 2021). Ketika alga mati, dekomposisi mereka mengonsumsi oksigen dalam air, yang dapat menyebabkan kondisi hipoksia atau bahkan anoksia (kekurangan oksigen total), mengakibatkan kematian massal ikan dan organisme akuatik lainnya.

Selain dampak pada badan air, penggunaan pupuk kimia juga dapat mencemari air tanah, yang merupakan sumber utama air minum bagi banyak komunitas. Nitrat dari pupuk kimia dapat larut dalam air dan masuk ke dalam air tanah, meningkatkan risiko kontaminasi nitrat pada sumur air minum (Smith, J., & Lee, 2018). Konsumsi air dengan kadar nitrat tinggi dapat menyebabkan masalah kesehatan, seperti methemoglobinemia atau "blue baby syndrome" pada bayi, yang mengurangi kemampuan darah untuk mengangkut oksigen. Di sisi lain, penggunaan pupuk kimia secara terus-menerus dapat menurunkan kualitas tanah dengan mengurangi kandungan bahan organik dan

mengganggu keseimbangan mikroorganisme yang esensial untuk siklus nutrisi (Khandelwal et al., 2016). Penurunan kesehatan tanah ini dapat menyebabkan penurunan kesuburan jangka panjang, memaksa petani untuk menggunakan lebih banyak pupuk kimia untuk mempertahankan hasil panen, yang pada gilirannya memperburuk masalah lingkungan dan kesehatan.

2.6 Dampak Lingkungan dan Ekosistem

1. Penurunan Keanekaragaman Hayati

Pertanian konvensional sering kali menyebabkan penurunan keanekaragaman hayati. Praktik monokultur dan penggunaan lahan yang intensif mengakibatkan hilangnya habitat alami bagi banyak spesies flora dan fauna. Ketika habitat ini hilang, spesies yang bergantung pada lingkungan tersebut untuk bertahan hidup juga ikut terancam. Selain itu, penggunaan pestisida secara luas dalam pertanian konvensional dapat mengurangi populasi serangga penyerbuk, predator alami, dan organisme lain yang berperan penting dalam ekosistem pertanian (Horgan et al., 2020). Pengurangan keanekaragaman spesies ini dapat mengganggu keseimbangan ekosistem, menyebabkan ketidakstabilan dalam rantai makanan, dan menurunkan resiliensi ekosistem terhadap gangguan.

Pengurangan keanekaragaman hayati juga berpotensi memperburuk masalah hama dan penyakit. Dalam ekosistem yang kaya akan keanekaragaman, terdapat banyak spesies yang dapat bertindak sebagai pengendali alami hama dan penyakit. Namun, ketika keanekaragaman

ini berkurang, peluang bagi spesies hama untuk berkembang biak tanpa kendali meningkat (Basir FA, Banerjee A, 2019). Selain itu, hilangnya spesies penyerbuk dapat mengurangi hasil panen tanaman yang bergantung pada penyerbukan, seperti buah-buahan dan sayuran. Dengan demikian, penurunan keanekaragaman hayati tidak hanya mengancam kehidupan satwa liar tetapi juga dapat berdampak langsung pada produksi pertanian dan keamanan pangan.

2. Degradasi Tanah

Pertanian konvensional sering kali menyebabkan degradasi tanah yang serius. Praktik-praktik seperti pengolahan tanah yang berlebihan, penggunaan alat berat, dan irigasi yang tidak tepat dapat mengganggu struktur tanah, menyebabkan erosi, dan mengurangi kemampuan tanah untuk menyerap dan menyimpan air (Sohail et al., 2019). Erosi tanah, terutama di daerah berlereng, dapat mengakibatkan hilangnya lapisan atas tanah yang kaya akan nutrisi, yang sangat penting untuk pertumbuhan tanaman. Akibatnya, kesuburan tanah menurun, dan petani harus mengandalkan pupuk kimia untuk mempertahankan produktivitas, yang pada gilirannya dapat memperburuk masalah lingkungan.

Degradasi tanah juga dapat disebabkan oleh salinisasi dan pengikisan nutrisi akibat irigasi dan penggunaan pupuk kimia yang berlebihan. Irigasi yang tidak tepat dapat menyebabkan akumulasi garam di lapisan atas tanah, membuat tanah menjadi kurang subur dan sulit untuk mendukung pertumbuhan tanaman (Kashyap et al., 2019). Sementara itu, penggunaan pupuk kimia yang berlebihan dapat menguras nutrisi tanah yang penting, seperti bahan

organik dan mikroorganisme yang mendukung siklus nutrisi (Horgan et al., 2020). Degradasi tanah yang terus-menerus dapat menyebabkan penurunan produktivitas pertanian jangka panjang dan meningkatkan ketergantungan pada input kimia yang mahal dan tidak ramah lingkungan.

3. Pencemaran Air dan Tanah

Penggunaan pestisida dan pupuk kimia dalam pertanian konvensional telah menjadi sumber utama pencemaran air dan tanah. Pestisida yang diterapkan pada tanaman dapat larut dalam air hujan dan masuk ke dalam badan air, mencemari sumber air tanah dan permukaan (Horgan et al., 2020). Pencemaran ini dapat mempengaruhi kualitas air, membuatnya tidak aman untuk konsumsi manusia dan hewan, serta mengganggu kehidupan akuatik. Selain itu, akumulasi pestisida dalam tanah dapat menghambat pertumbuhan mikroorganisme yang bermanfaat dan mengganggu keseimbangan ekosistem tanah (Kreuze et al., 2022).

Selain pestisida, penggunaan pupuk kimia juga berkontribusi terhadap pencemaran air melalui proses eutrofikasi. Ketika pupuk yang kaya akan nitrogen dan fosfor larut dalam air hujan, mereka dapat terbawa ke sungai, danau, atau laut. Peningkatan konsentrasi nutrisi ini dapat memicu ledakan alga, yang pada akhirnya mengurangi kandungan oksigen dalam air dan menyebabkan kematian ikan serta organisme akuatik lainnya. Fenomena ini tidak hanya merusak ekosistem air tetapi juga berdampak negatif pada industri perikanan dan pariwisata. Oleh karena itu, pencemaran air dan tanah akibat pertanian konvensional

merupakan masalah serius yang memerlukan perhatian dan tindakan segera.

4. Perubahan Iklim

Pertanian konvensional juga berkontribusi signifikan terhadap perubahan iklim melalui emisi gas rumah kaca. Pembakaran bahan bakar fosil untuk menggerakkan mesin pertanian, produksi dan transportasi pupuk serta pestisida, dan praktik-praktik seperti pembakaran lahan pertanian menghasilkan emisi CO_2 yang besar. Selain itu (Smith, J., & Lee, 2018), pertanian konvensional juga menghasilkan metana (CH_4) dari peternakan dan limbah organik, serta dinitrogen oksida (N_2O) dari penggunaan pupuk nitrogen. Kedua gas ini memiliki potensi pemanasan global yang jauh lebih tinggi dibandingkan dengan CO_2 , memperburuk efek rumah kaca (Sishodia RP, Ray RL, 2020).

Perubahan iklim yang dipicu oleh emisi gas rumah kaca dari sektor pertanian dapat berdampak serius pada ekosistem global. Peningkatan suhu global, perubahan pola cuaca, dan peningkatan kejadian cuaca ekstrem seperti kekeringan dan banjir dapat mengancam produksi pangan dan kesejahteraan masyarakat (Miller, S., & Green, 2021). Selain itu, perubahan iklim juga dapat mempengaruhi distribusi geografis spesies tanaman dan hama, menyebabkan ketidakstabilan ekosistem dan meningkatkan kerentanan terhadap penyakit dan serangan hama. Oleh karena itu, pertanian konvensional tidak hanya berdampak pada lingkungan lokal tetapi juga memiliki implikasi global yang luas.

2.7 Kesimpulan

Tantangan dalam perlindungan tanaman yang dihadapi oleh pertanian konvensional sangat terkait dengan praktik-praktik yang bertujuan untuk memaksimalkan produksi namun sering kali mengabaikan dampak jangka panjang terhadap lingkungan dan kesehatan masyarakat. Penggunaan pestisida sintesis, praktik monokultur, irigasi intensif, dan penggunaan pupuk kimia adalah beberapa metode yang digunakan untuk meningkatkan hasil panen. Namun, praktik-praktik ini juga menyebabkan masalah serius seperti resistensi hama, penurunan keanekaragaman genetik, degradasi tanah, pencemaran air, dan penurunan kualitas tanah. Ketergantungan pada input kimia dan teknik yang tidak berkelanjutan ini tidak hanya mengancam keberlanjutan sistem pertanian itu sendiri tetapi juga memiliki implikasi besar bagi keamanan pangan, kesehatan manusia, dan keseimbangan ekosistem.

Dampak lingkungan dari praktik pertanian konvensional ini sangat meresahkan. Penurunan keanekaragaman hayati, degradasi tanah, pencemaran air, dan kontribusi terhadap perubahan iklim adalah beberapa isu utama yang dihadapi. Pertanian intensif menguras sumber daya alam, mengancam ekosistem yang kaya akan keanekaragaman hayati, dan memperburuk masalah polusi yang berdampak pada kualitas air dan tanah. Selain itu, penggunaan pupuk dan pestisida kimia mempercepat proses eutrofikasi, merusak habitat akuatik, dan mencemari sumber air minum. Dengan demikian, tantangan dalam perlindungan tanaman tidak hanya mencakup upaya untuk menjaga produksi pertanian yang tinggi tetapi juga

mencakup kebutuhan mendesak untuk mengadopsi praktik-praktik pertanian yang lebih berkelanjutan dan ramah lingkungan untuk memastikan kesehatan ekosistem dan kesejahteraan manusia di masa depan.

DAFTAR PUSTAKA

- Anastasiou, E, Fountas, S, Voulgaraki M, P. V, Koutsiaras M, Kriezi O, Lazarou E, Vatsanidou A, F.L. and Di Bartolo F, Barreiro-Hurle J, G.-B.M. (2021) 'Precision farming technologies for crop protection: A meta-analysis.', *Smart Agriculture Technology*, 5(100323).
- Anderson, D., & Fuchs, M. (2019) 'The impacts of conventional agriculture on plant diversity', *Agricultural Journal*, 12(3), pp. 145–159.
- Basir FA, Banerjee A, R.S. (2019) 'Role of farming awareness in crop pest management - A mathematical model.', *Journal of Theoretical Biology*, 461(59–67). Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jtbi.2018.10.043>.
- Belyakov NV, N.N. (2021) 'Plant protection technologies: from advanced to innovative.', *IOP Publishing: Journal of Physics, Conference Series*, 1942(012072).
- Brown, P., & Jones, K. (2020) 'The socio-economic implications of conventional farming practices.', *Rural Studies Review*, 28(1), p. 75–88.
- De A, Bose R, Kumar A, M.S. (2014) 'No Title Targeted delivery of pesticides using biodegradable polymeric nanoparticles.', *New Delhi: Springer India*. [Preprint]. Available at: <https://doi.org/doi:10.1088/1742-6596/1942/1/012072>.
- Egan PA, Chikoye D, Green KK, Tamò M, Feit B, K.P., Bandyopadhyay R, Tapa-Yotto G, O.-B.A. and Sæthre M-G, Coyne DL, Legg JP, J.M. (2021) 'Harnessing nature-based solutions for smallholder plant health in a changing climate.', *SLU Global*, pp. 1–31.

- El-Dessouki, W. A., Mansour, M. R. K., and Eryan, N.L. (2022) 'Effects of Certain Weather, Biotic Factors and Chemical Components on the Population of Aphids in Egyptian Wheat Fields.', *Egypt. Acad. J. Biol. Sci. A, Entomology*, pp. 1–13. Available at: <https://doi.org/10.21608/eajbsa.2022.212703>.
- Garcia, M., & Sanchez, L. (2020) 'Ecosystem degradation due to chemical fertilizers in intensive farming systems.', *Ecological Studies*, 17(4), p. 320–335.
- Giraldo JP, Wu H, Newkirk GM, K.S. (2019) 'Nanobiotechnology approaches for engineering smart plant sensors.', *Nature Nanotechnology*, 14(6), pp. 541–553.
- Horgan, F. G., Garcia, C. P. F., Haverkort, F., de Jong, P. W., A. and Ferrater, J.B. (2020) 'Changes in Insecticide Resistance and Host Range Performance of Planthoppers Artificially Selected to Feed on Resistant Rice', *Crop Prot*, 127(104963). Available at: <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2019.104963>.
- Iavicoli I, Leso V, Beezhold DH, S.A. (2017) 'Nanotechnology in agriculture: Opportunities, toxicological implications, and occupational risks.', *Toxicology and applied pharmacology*, 329(96–111).
- Iqbal, M. A., Hassan, M. W., Hafiz, M. U. R., Muhammad, A. and Moazzam, J. (2018) 'Evaluation of Different Wheat Varieties for Resistance against Aphid, *Schizaphis graminum* R. (Homoptera: Aphididae) under Laboratory Conditions.', *Asian J. Agric. Biol*, (6), pp. 549–555.

- Kashyap PL, Kumar S, Jasrotia P, Singh DP, S.G. (2019) 'Nanosensors for plant disease diagnosis: Current understanding and future perspectives.', *Nanoscience for Sustainable Agriculture*, pp. 189–205.
- Khandelwal N, Barbole RS, Banerjee SS, Chate GP, B. and AV, Khandare JJ, et al. (2016) 'Budding trends in integrated pest management using advanced microand nano-materials: Challenges and perspectives.', *Journal of Environmental Management*, 184, p. 157–169.
- Koch, M. S., Ward, J. M., Levine, S. L., Baum, J. A., Vicini, J.L. and and Hammond, B.G. (2015) 'The Food and Environmental Safety of Bt Crops.', *Front. Plant Sci.*, 06(283). Available at: <https://doi.org/10.3389/fpls.2015.00283>.
- Kreuze J, Adewopo J, Selvaraj M, Mwanzia L, K.P. and Cuellar WJ, Legg JP, Hughes DP, B.G. (2022) 'in Chapter 9. Innovative Digital Technologies to Monitor and Control Pest and Disease Threats in Thiele G, Friedmann M, Campos H, Polar V, Bentley JW. Ed. Root, Tuber, and Banana (RT&B) Cropping Systems: Progress and Prospects.', *Springer Cham*. [Preprint].
- Lamichhane JR, Dachbrodt-Saaydeh S, Kudsk P, M.A. (2016) 'Toward a reduced reliance on conventional pesticides in European agriculture.', *Plant Disease*, 100(1), pp. 10–24.
- Lengai GM, M.J. (2018) 'Biopesticides and their role in sustainable agricultural production', *Journal of Biosciences and Medicines*, 6(6), p. 7.

- Mahesha KN, Guddaraddi A, Reddy H, G.S. (2023) 'Unleashing the Potential of Nanotechnology in Agriculture.', *Advanced Innovative Technologies in Agricultural Engineering for Sustainable Agriculture*, p. 97.
- Miller, S., & Green, R. (2021) 'Environmental impacts of pesticide use in conventional agriculture.', *Environmental Science & Policy*, 45, p. 200–215.
- Mittal D, Kaur G, Singh P, Yadav K, A.S. (2020) 'Nanoparticle-based sustainable agriculture and food science: Recent advances and future outlook.', *Frontiers in Nanotechnology*, 2(579954).
- Nollet LM, M.S. (Eds. . (2023) 'Biopesticides Handbook.', *CRC Press*. [Preprint].
- Painter, R.H. (1951) 'Insect Resistance in Crop Plants.', *Soil Sci.*, 72(6), p. 481. Available at: <https://doi.org/10.1097/00010694-195112000-00015>.
- Reinders MJ, Riemens MM, & B.J. (no date) 'The future of crop protection in Europe.' Available at: <https://doi.org/10.2861/086545>.
- Sishodia RP, Ray RL, S.S. (2020) 'Applications of remote sensing in precision agriculture: A review.', *Remote Sensing*, 12(19), p. 3136.
- Smith, J., & Lee, H. (2018) 'Agricultural modernization and its challenges in developing countries', *Journal of Agricultural Economics*, 34(2), pp. 120–134.
- Smith, C.M. (Editor) (2005) 'Plant Resistance to Arthropods: Molecular and Conventional Approaches.', *Dordrecht: Springer Netherlands*. [Preprint].

- Sohail MI, Waris AA, Ayub MA, Usman M, Ur Rehman, M. and Sabir M, et al. (2019) 'Environmental application of nanomaterials: A promise to sustainable future. In Comprehensive analytical chemistry.', *Sustainable Agriculture*, 87(1–54).
- Verma DK, Guzmán KNR, Mohapatra B, Talukdar D, ChávezGonzález ML, Kumar V, Srivastava S, Singh S, Y. and R, Malar SE, Ahmad A, Utama GL, A.C. (2021) 'Recent trends in plant-and microbe-based biopesticide for sustainable crop production and environmental security', *Recent Developments in Microbial Technologies*, pp. 1–37.
- Wilson, E., & Taylor, J. (2019) 'The role of sustainable practices in mitigating environmental damage.', *Journal of Environmental Management*, 50(2), pp. 180–195.
- Zhai C, Qiu W, Weckler P, He X, J.K. (2023) 'Editorial: Advanced application technology for plant protection: Sensing, modelling, spraying system and equipment', *Front. Plant Sci.*, 14(1113359). Available at: <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1113359>.

BAB 3

PENDEKATAN EKOLOGIS DALAM PERLINDUNGAN TANAMAN

Oleh Kadis Mujiono

3.1 Pendahuluan

Organisme pengganggu tanaman (OPT) merupakan kelompok organisme yang merusak tanaman sehingga mengurangi hasil dan kualitasnya. Dalam konteks ekologi, OPT, termasuk serangga, jamur, dan bakteri, merupakan komponen alami ekosistem. Namun, ketika sistem pertanian mengganggu keseimbangan alam, populasi hama dapat meningkat karena kurangnya predator alami atau mekanisme pengendalian biologis lainnya. Misalnya, praktik pertanian monokultur menyediakan sumber makanan yang terus-menerus dan melimpah bagi hama, yang dapat menyebabkan ledakan populasi (Isbn et al., 1985). Selain itu, praktik pertanian intensif merusak fungsi ekosistem seperti daur ulang nutrisi, pemurnian lingkungan, dekomposisi bahan organik, dan pengendalian penyakit. Penggunaan insektisida, herbisida, dan fungisida, bersama dengan degradasi nutrisi dan emisi gas rumah kaca, berdampak buruk pada ekosistem alami (Hajjar et al., 2023).

Salah satu aspek penting dalam ekologi perlindungan tanaman adalah pemahaman tentang dinamika populasi

hama dan patogen. Populasi hama dipengaruhi oleh berbagai faktor, seperti ketersediaan sumber makanan, kondisi lingkungan, dan interaksi dengan organisme lain. Menurut Altieri (1999), praktik budidaya pertanian yang mempertahankan keanekaragaman hayati, seperti rotasi tanaman dan penggunaan tanaman penutup, dapat meningkatkan keberadaan musuh alami dan mengurangi tekanan hama.

Penyakit tanaman, yang pada umumnya disebabkan oleh patogen seperti bakteri, jamur, dan virus, penyebaran dan perkembangannya dipengaruhi oleh interaksi antara tanaman inang, patogen, dan lingkungan atau dikenal dengan *disease triangle*. Suhu dan kelembaban lingkungan mempengaruhi tingkat infeksi dan penyebaran patogen. Pemantauan kondisi lingkungan dan pemahaman tentang siklus hidup patogen sangat penting dalam ekologi perlindungan tanaman (Agrios, 2005).

3.2 Interaksi Tanaman-OPT

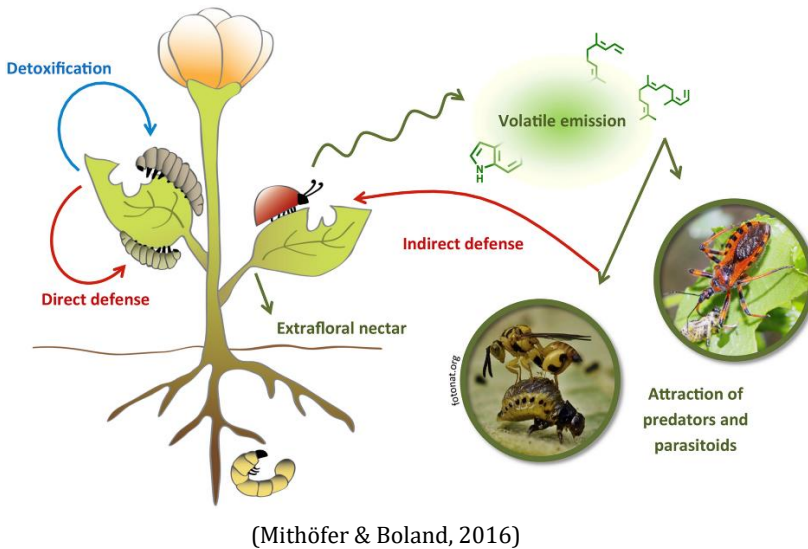
3.2.1 Interaksi tritropik tanaman dan herbivora

Hama tanaman, dalam hal ini adalah serangga hama, seraca ekologi merupakan sekumpulan serangga herbivora yang memainkan peran penting dalam membentuk komunitas tanaman dengan memengaruhi pertumbuhan, reproduksi, dan kelangsungan hidup tanaman. Interaksi ini merupakan komponen utama dari jaring makanan, yang memengaruhi tidak hanya populasi tanaman tetapi juga predator, parasit, dan pengurai dalam ekosistem (Schoonhoven et al., 2005). Serangga herbivora memiliki

cara makan yang beragam, termasuk menggigit dan mengunyah, dan menusuk mengisap. Strategi memakan ini memengaruhi tanaman dalam berbagai cara. Misalnya, serangga penggigit pengunyah seperti ulat dapat menimbulkan kerusakan daun yang signifikan, mengurangi fotosintesis dan kesehatan tanaman. Serangga penusuk penghisap, seperti kutu daun, menghisap nutrisi dari floem, yang sering kali menyebabkan pertumbuhan terhambat dan menyebabkan kerentanan terhadap penyakit (Price et al., 2011). Tanaman merespon berbagai tipe serangan tersebut dengan mengembangkan serangkaian pertahanan, mulai dari pertahanan fisik seperti trikoma (Andama et al., 2020) hingga pertahanan kimia seperti senyawa antibiosis yang menghalau herbivora dan senyawa volatil untuk menarik musuh alami (Turlings & Tumlinson, 1992).

Interaksi antara serangga herbivora dengan tanaman merupakan bagian dari interaksi tritrofi yang kompleks yang melibatkan predator, parasitoid, dan mutualis. Tanaman memberikan respon terhadap adanya serangan serangga herbivora dengan melepaskan senyawa organik volatil (SOV) untuk menarik kedatangan predator dan parasitoid yang membantu mengendalikan populasi herbivora (Dicke & Poecke, 2002; Turlings & Wäckers, 2004). Misalnya, tanaman padi dapat melepaskan (Z)-3-hexenol, (E)-2-hexenal, dan linalool ketika diserang oleh serangga penggigit pengunyah (Mujiono et al., 2021). Selain itu, senyawa attraktan linalool juga dilepaskan oleh tanaman padi yang diserang oleh serangga penusuk pengisap *Nilaparvata lugen* dalam waktu 48 jam setelah terjadi infestasi (Wari et al., 2019). Fenomena rekrutmen musuh alami menggunakan senyawa SOV merupakan suatu bentuk

pertahanan tanaman secara tidak langsung (*indirect defense*).



Gambar 3. 1. Ilustrasi hubungan ekologis antara tanaman, herbivora, dan musuh alaminya dalam kerangka interaksi tritropik yang kompleks, memperlihatkan bagaimana tanaman merespon adanya serangan dari serangga hama atau herbivora (Mithöfer & Boland, 2016).

Selain bentuk pertahanan *indirect defense*, pada interaksi tritropik juga terjadi mekanisme pertahanan langsung (*direct defense*). Mekanisme ini memainkan peranan penting dalam interaksi tritropik, yang melibatkan tanaman, herbivora, dan musuh alami dari herbivora, termasuk parasitoid dan predator. Pertahanan langsung dalam hal ini yang bersifat fisik dan kimia, tidak hanya menghalangi herbivora secara langsung tetapi juga secara

signifikan memengaruhi tingkat trofik yang lebih tinggi dengan memengaruhi kerentanan herbivora terhadap musuh alami (Kessler & Baldwin, 2001). Sebagai contoh, tanaman padi ras japonica memiliki trikoma yang keras dan dilapisi oleh silikon sehingga memiliki ketahanan yang sangat baik terhadap belalang kembara *Locusta migratoria* (Andama et al., 2020). Selain itu, tanaman yang memproduksi senyawa metabolit sekunder toksik dapat menurunkan kebugaran dari serangga herbivora, sehingga mudah dimangsa oleh musuh alami (Erb, 2018). Pertahanan langsung juga dapat memicu jalur sinyal tanaman yang meningkatkan daya tarik musuh alami. Ketika herbivora memakan tanaman, mereka memicu produksi senyawa organik volatil (VOC) yang berfungsi sebagai sinyal untuk menarik parasitoid dan predator ke tanaman (War et al., 2012). Dengan demikian, pertahanan langsung dapat memicu serangkaian peristiwa yang memperkuat strategi pertahanan tanaman secara keseluruhan, meningkatkan penekanan herbivora melalui cara langsung dan tidak langsung.

3.2.2 Ekologi penyakit tanaman (konsep segitiga penyakit)

Dari sudut pandang ekologi, penyakit tanaman merupakan proses dinamis yang diakibatkan oleh interaksi antara inang yang rentan, patogen virulen, dan kondisi lingkungan yang mendukung. Interaksi ini mengganggu fungsi fisiologis normal tanaman, yang menyebabkan gejala seperti layu, nekrosis, dan pertumbuhan terhambat (Agrios, 2005). Secara ekologi, penyakit tanaman bukanlah kejadian yang berdiri sendiri, tetapi tertanam dalam ekosistem, yang

memengaruhi dan dipengaruhi oleh banyak faktor biotik (misalnya, mikroorganisme antagonis atau kompetisi antar spesies) dan abiotik (seperti cuaca dan kualitas tanah). Ketika keseimbangan ekosistem terganggu, patogen dapat berkembang biak dengan cepat dan menyebabkan infeksi yang meluas, terutama ketika kondisi lingkungan mendukung penyebarannya. Interaksi antara tanaman inang, patogen, dengan lingkungan ini dikenal dengan interaksi segitiga penyakit.

Komponen inang mengacu pada kerentanan tanaman terhadap patogen. Beberapa tanaman memiliki ketahanan bawaan karena pertahanan struktural, seperti dinding sel yang tebal, atau pertahanan kimia, seperti senyawa antimikroba (Pieterse et al., 2014). Namun, kondisi lingkungan, termasuk ketersediaan nutrisi, stres air, dan suhu, dapat memengaruhi kesehatan tanaman secara keseluruhan dan kemampuannya untuk menangkal infeksi. Misalnya, tanaman yang stres mungkin memiliki mekanisme pertahanan yang terganggu, sehingga lebih rentan terhadap patogen. Sedangkan patogen, menurut Velásquez et al., (2018), seperti jamur, bakteri, dan virus, harus bersifat virulen dan hadir dalam jumlah yang cukup untuk menyebabkan penyakit. Kemampuan mereka untuk menginfeksi bergantung pada faktor-faktor seperti tingkat reproduksi, mekanisme bertahan hidup, dan kemampuan untuk mengatasi pertahanan tanaman. Lingkungan merupakan elemen penting ketiga dalam segitiga tersebut, yang memengaruhi patogen dan tanaman inangnya. Kelembapan, suhu, dan pH tanah dapat memengaruhi kelangsungan hidup patogen dan kerentanan tanaman. Misalnya, kelembapan yang tinggi dapat mendorong

perkecambahan spora jamur, yang menyebabkan peningkatan kejadian penyakit (Mandal et al., 2009).

Penting untuk memahami segitiga penyakit tanaman guna mengembangkan strategi pengelolaan penyakit yang efektif. Konsep segitiga penyakit menjadi dasar dalam manajemen pengelolaan penyakit tanaman terpadu (PPT), yang berupaya mengintervensi salah satu atau beberapa komponen segitiga ini untuk mengendalikan penyakit (Sopialena, 2017). Dengan memanipulasi komponen seperti memilih varietas tanaman yang tahan, mengubah tanggal tanam, atau memodifikasi kondisi lingkungan, petani dapat dengan yakin mengurangi tekanan penyakit. Misalnya, dengan menanam varietas tanaman yang tahan terhadap patogen tertentu, mengelola kondisi lingkungan seperti kelembapan, atau mengurangi sumber inokulum patogen melalui praktik budidaya yang baik.

Hubungan antara segitiga penyakit dan manajemen pengelolaan penyakit tanaman terpadu (PPT) merupakan konsep penting dalam manajemen penyakit tanaman. Interaksi antara ketiga komponen segitiga penyakit secara tegas menentukan apakah suatu penyakit akan berkembang. PPT secara ketat fokus pada pengelolaan ketiga aspek ini untuk mencegah atau mengendalikan penyakit tanaman secara efektif. Dalam konteks PPT, manajemen inang melibatkan pemilihan varietas yang tahan penyakit, rotasi tanaman, dan penggunaan praktik budaya yang tepat. Ekosistem yang sehat biasanya memiliki keanekaragaman hayati yang cukup untuk menekan perkembangan patogen melalui berbagai mekanisme, seperti kompetisi dan predasi oleh mikroorganisme lain. Namun, perubahan iklim,

degradasi tanah, dan praktik pertanian yang intensif dapat mengubah dinamika ini, meningkatkan risiko perkembangan dan penyebaran penyakit. Pengendalian patogen dapat mencakup penggunaan agen pengendalian hayati dan penerapan pestisida yang bijaksana. Lingkungan di sekitar tanaman juga dikelola untuk mengurangi kondisi yang mendukung perkembangan penyakit, seperti manajemen irigasi dan manajemen kelembaban tanah.

3.2.3 Interaksi gulma-tanaman

Gulma adalah tanaman yang tumbuh berdampingan dengan tanaman budidaya dan bersaing dengan tanaman tersebut untuk mendapatkan sumber daya seperti air, nutrisi, cahaya, dan ruang. Persaingan ini dapat sangat mengurangi hasil panen karena gulma cenderung tumbuh dengan cepat dan menggunakan sumber daya secara efisien, sehingga mengalahkan tanaman untuk mendapatkan sumber daya penting (Swanton et al., 2015). Gulma juga dapat mengganggu perkembangan tanaman dengan melepaskan zat kimia alelopati, yang menghambat perkecambahan biji dan perkembangan akar pada tanaman di dekatnya (Scavo et al., 2018).

Interaksi gulma-tanaman juga dipengaruhi oleh lingkungan. Misalnya, peningkatan kadar karbon dioksida dan perubahan pola suhu akibat perubahan iklim dapat meningkatkan pertumbuhan gulma lebih dari pertumbuhan tanaman budidaya, sehingga memperburuk kerugian kompetitif bagi tanaman pangan (Ziska, 2016). Ketidakseimbangan ini dapat menyebabkan peningkatan ketergantungan pada herbisida, yang menimbulkan risiko

lingkungan dan mempercepat resistensi herbisida pada populasi gulma.

Gulma juga menjadi tempat berkembang biaknya hama dan patogen, yang secara tidak langsung memengaruhi tanaman dengan menyediakan tempat berlindung bagi serangga berbahaya atau menjadi inang alternatif bagi patogen tanaman (Norris & Kogan, 2005). Peran ekologis ini mempersulit strategi pengelolaan gulma, karena keberadaan gulma dapat berkontribusi terhadap penyebaran penyakit atau hama dalam agroekosistem. Meskipun berdampak negatif, beberapa gulma dapat berkontribusi positif terhadap agroekosistem dengan mendukung keanekaragaman hayati, meningkatkan kesuburan tanah, dan menyediakan habitat bagi organisme bermanfaat seperti penyerbuk (Riemens et al., 2022).

Namun demikian, gulma sering kali memainkan peran ganda dalam ekosistem. Meskipun sering dianggap merugikan bagi pertanian karena persaingan dengan tanaman budidaya, gulma juga berkontribusi positif terhadap fungsi ekosistem. Dari perspektif ekologi, gulma dapat meningkatkan keanekaragaman hayati dengan menyediakan habitat dan makanan bagi berbagai organisme, termasuk penyerbuk dan musuh alami hama (Andreasen & Stryhn, 2008). Gulma juga berperan dalam menjaga kesehatan tanah dengan mencegah erosi, mendaur ulang nutrisi, dan memperbaiki struktur tanah. Namun, spesies gulma invasif dapat mengganggu komunitas tanaman asli, mengurangi keanekaragaman hayati, dan mengubah proses ekosistem (Vilà et al., 2011).

Memahami dinamika ekologis interaksi tanaman-OPT sangat penting untuk mengembangkan strategi pengelolaan hama penyakit terpadu (PHT) yang meminimalkan dampak negatif sekaligus menjaga kesehatan ekosistem. Pendekatan ekologis menyoroti pentingnya memanfaatkan PHT, yang melibatkan penggabungan berbagai metode pengendalian sekaligus meminimalkan penggunaan pestisida kimia. Penggunaan pestisida yang berlebihan dapat merusak lingkungan, menyebabkan resistensi hama, dan mengganggu musuh alami. Oleh karena itu, PHT menggarisbawahi perlunya pendekatan yang berkelanjutan dan ramah lingkungan terhadap perlindungan tanaman (Lewis et al., 1997). Dengan memprioritaskan keanekaragaman hayati, pengendalian hama alami, dan kesehatan ekosistem, pendekatan ini menghadirkan alternatif yang bermanfaat bagi penggunaan pestisida sintetis, yang menawarkan keuntungan bagi pertanian dan lingkungan.

3.3 PHT: Pengendalian OPT Berwawasan Ekologis

Pendekatan ekologis terhadap perlindungan tanaman menekankan pada integrasi praktik biologis, budidaya (kultur teknis), dan fisik untuk mengelola hama dan penyakit sekaligus meminimalkan kerusakan lingkungan. Tidak seperti pengendalian hama konvensional, yang sangat bergantung pada input kimiawi, perlindungan tanaman ekologis berakar pada pemahaman interaksi antara organisme dan lingkungannya. Pendekatan ini memanfaatkan proses alami dan keanekaragaman hayati untuk menciptakan agroekosistem tangguh yang mampu

mempertahankan pertumbuhan tanaman yang sehat dengan lebih sedikit intervensi kimia (Hajjar et al., 2023).

Perlindungan tanaman ekologis didasarkan pada pemahaman bahwa ekosistem merupakan jaringan interaksi kompleks yang melibatkan banyak spesies. Dalam agroekosistem, tanaman terus berinteraksi dengan herbivora, patogen, dan organisme bermanfaat seperti predator alami dan parasitoid (Barzman et al., 2015). Metode ini mengakui bahwa serangan hama dan penyakit sering kali merupakan akibat dari ketidakseimbangan ekologis dalam sistem. Misalnya, praktik monokultur mengurangi keanekaragaman hayati, membuat tanaman lebih rentan terhadap hama. Sebaliknya, ekosistem yang beragam cenderung lebih tangguh karena keberadaan musuh alami dan berbagai spesies yang mencegah satu hama mendominasi.

Perlindungan tanaman ekologis berupaya mengelola interaksi ini dengan meningkatkan keanekaragaman hayati, melestarikan musuh alami hama, dan menggunakan pendekatan holistik untuk meminimalkan kebutuhan intervensi kimia. Metode ini memadukan pengendalian biologis, praktik budaya, pengelolaan habitat, dan penggunaan pengendalian kimia secara hati-hati bila diperlukan, yang membentuk dasar PHT (Kogan, 1998).

3.3.1 Pengendalian hayati

Salah satu komponen utama PHT adalah pengendalian hayati, yang melibatkan penggunaan organisme hidup seperti predator, parasitoid, dan patogen untuk menekan populasi hama. Tidak seperti pestisida kimia, agen

pengendalian hayati bersifat spesifik terhadap hama targetnya, sehingga mengurangi risiko membahayakan spesies yang bukan target. Predator seperti kepik buas, yang memakan kutu daun, dan tawon parasitoid, yang bertelur di dalam larva, umumnya digunakan dalam program pengendalian hayati. Patogen seperti jamur, bakteri, dan virus juga berperan penting dalam mengendalikan populasi hama. Misalnya, *Bacillus thuringiensis* (Bt), bakteri yang menghasilkan racun yang mematikan bagi banyak hama serangga, banyak digunakan sebagai pestisida hayati (Bravo et al., 2011), kepik pembunuh *Sycanus annulicornis* merupakan predator yang dapat memangsa berbagai jenis hama di pertanian (Sahid, 2019).

Aplikasi agensia hayati juga banyak dilakukan untuk mengendalikan berbagai jenis patogen penyebab penyakit tanaman. Mikroorganisme seperti jamur, bakteri, dan virus sering digunakan sebagai agen pengendali hayati. Salah satu contoh yang umum adalah penggunaan jamur *Trichoderma* spp. yang efektif melawan patogen tanah seperti *Fusarium* dan *Rhizoctonia* melalui mekanisme kompetisi ruang dan nutrisi, serta produksi enzim pengurai dinding sel patogen (Harman et al., 2004). Menurut (Sopialena et al., 2021) pengendalian hayati patogen salah satunya dapat dilakukan dengan mengoptimalkan peran jamur-jamur endofit, misalnya cendawan *Trichoderma* sp. dapat mengendalikan *Pyricularia oryzae* pada tanaman padi hingga 80%.

Selain itu, bakteri antagonis seperti *Bacillus subtilis* dapat digunakan untuk mengendalikan penyakit pada tanaman dengan cara memproduksi antibiotik dan senyawa antijamur yang dapat menghambat pertumbuhan patogen

tanaman (Choudhary & Johri, 2009). Aplikasi pengendalian hayati ini tidak hanya efektif dalam menekan perkembangan penyakit tanaman, tetapi juga membantu mempertahankan kesehatan ekosistem tanah dan mendukung keberlanjutan pertanian.

Pengendalian hayati tidak hanya ramah lingkungan tetapi juga berkelanjutan, karena musuh alami baik itu parasitoid dan predator, maupun mikroorganisme antagonis, dapat berkembang biak dalam ekosistem dan terus mengatur populasi hama atau patogen dari waktu ke waktu. Namun, keberhasilannya bergantung pada pemilihan dan pengenalan spesies yang tepat secara cermat, serta pemeliharaan kondisi lingkungan yang mendukung kelangsungan hidup dan reproduksi mereka.

3.3.2 Pengelolaan habitat dan praktik agroekologi

Pengelolaan habitat merupakan landasan lain dari pendekatan ekologis untuk perlindungan tanaman. Dengan menciptakan atau melestarikan habitat yang mendukung organisme yang bermanfaat, petani dapat meningkatkan pengendalian hama secara alami. Misalnya, menanam pagar tanaman, memelihara bunga refugia, atau menggunakan tanaman penutup dapat menyediakan tempat berlindung dan makanan bagi penyerbuk, predator, dan parasitoid (Landis et al., 2000).

Tanaman tumpang sari, rotasi tanaman, dan polikultur merupakan praktik agroekologi yang juga berkontribusi terhadap pengelolaan hama dan penyakit dengan meningkatkan keanekaragaman hayati dalam lanskap pertanian. Tumpang sari melibatkan penanaman berbagai

tanaman secara bersamaan, yang dapat menghalau kedatangan hama, menarik musuh alami, mengurangi penyebaran penyakit, dan meningkatkan kesehatan tanah. Sedangkan rotasi tanaman dapat memutus siklus hidup hama dengan mengganti tanaman yang tidak disukai oleh hama, sehingga mengurangi penumpukan hama di satu lokasi (Ratnadass et al., 2012).

Dengan meningkatkan keanekaragaman hayati dan ketahanan ekosistem, pengelolaan habitat dan praktik agroekologi akan mengurangi ketergantungan pada pestisida kimia dan menciptakan ekosistem yang lebih berkelanjutan yang menguntungkan tanaman dan lingkungan.

3.3.3 Induksi ketahanan dan pemuliaan tanaman

Tumbuhan telah mengembangkan berbagai mekanisme pertahanan untuk melindungi diri dari hama dan patogen. Beberapa dari pertahanan ini bersifat konstitutif, artinya selalu ada, sementara yang lain diinduksi sebagai respons terhadap serangan (Mujiono et al., 2021; Shinya et al., 2016). Pendekatan ekologis terhadap perlindungan tanaman memanfaatkan mekanisme pertahanan alami ini untuk meningkatkan ketahanan tanaman.

Ketahanan yang diinduksi melibatkan stimulasi sistem imun tanaman untuk lebih baik mempertahankan diri terhadap hama dan patogen. Hal ini dapat dicapai melalui penerapan bahan kimia tertentu atau mikroba bermanfaat, yang "mempersiapkan" pertahanan tanaman, memungkinkan respons yang lebih cepat dan lebih kuat

terhadap serangan di masa mendatang. Misalnya, asam jasmonat dan asam salisilat adalah hormon tanaman yang terlibat dalam pengaturan respons pertahanan, dan jalur pensinyalannya dapat ditargetkan untuk meningkatkan kekebalan tanaman (Stout et al., 2006). Pemuliaan tanaman merupakan alat penting lainnya dalam perlindungan tanaman ekologis. Dengan memilih dan membiakkan tanaman untuk ketahanan terhadap hama dan penyakit, petani dapat mengurangi kebutuhan akan intervensi kimia. Program pemuliaan modern menggabungkan teknik pemuliaan tradisional dengan pendekatan molekuler seperti seleksi dengan bantuan penanda dan rekayasa genetika untuk mengembangkan tanaman dengan sifat ketahanan yang ditingkatkan (Ali et al., 2021; Ali & Wani, 2021).

3.3.4 Pengelolaan Hama Terpadu (PHT)

Pengelolaan Hama Terpadu (PHT) adalah pendekatan holistik yang menggabungkan berbagai strategi untuk mengelola hama secara berkelanjutan. Pendekatan ini merupakan aspek utama perlindungan tanaman ekologis dan menekankan penggunaan teknik ramah lingkungan seperti pengendalian hayati, pengelolaan habitat, dan varietas tanaman yang tahan hama (Barzman et al., 2015).

PHT mendorong pemantauan populasi hama dan musuh alaminya secara cermat, sehingga petani dapat membuat keputusan yang tepat tentang kapan dan bagaimana melakukan intervensi. Pestisida kimia hanya digunakan sebagai pilihan terakhir dan diterapkan secara terarah untuk meminimalkan dampak negatif terhadap lingkungan. Hal ini mengurangi kemungkinan resistensi pestisida, melindungi spesies yang bukan target, dan

melestarikan layanan ekosistem seperti penyerbukan dan siklus nutrisi (Sparks et al., 2021).

3.3.5 Tantangan dan Arah Masa Depan

Meskipun pendekatan ekologis terhadap perlindungan tanaman menawarkan banyak manfaat, pendekatan ini juga menghadirkan tantangan. Salah satu kesulitan utamanya adalah kompleksitas pengelolaan ekosistem yang beragam. Petani membutuhkan pengetahuan dan keterampilan untuk menerapkan praktik ekologis secara efektif, dan sering kali terjadi kekurangan infrastruktur dan dukungan untuk mengadopsi metode ini, terutama di negara-negara berkembang (Untung, 2015).

Perubahan iklim menambah lapisan kompleksitas lainnya, karena perubahan pola cuaca dapat mengubah dinamika hama dan memengaruhi kemanjuran agen pengendalian hayati. Selain itu, pengembangan hama dan penyakit baru memerlukan penelitian dan adaptasi strategi pengelolaan yang berkelanjutan (Chakraborty & Newton, 2011).

Meskipun ada tantangan ini, pendekatan ekologis terhadap perlindungan tanaman sangat menjanjikan bagi pertanian berkelanjutan. Dengan mendorong keanekaragaman hayati, memanfaatkan pengendalian hama alami, dan mengurangi ketergantungan pada masukan kimia, metode ini berkontribusi pada kesehatan ekosistem dan sistem produksi pangan jangka panjang. Penelitian berkelanjutan tentang ekologi interaksi tanaman-hama, kemajuan dalam pemuliaan tanaman, dan pengembangan

agen pengendalian hayati baru akan terus meningkatkan efektivitas perlindungan tanaman ekologis.

3.4 Kesimpulan

Pendekatan ekologis terhadap perlindungan tanaman merupakan strategi berkelanjutan dan holistik untuk mengelola hama, penyakit, dan gulma. Dengan berfokus pada ketahanan ekosistem, keanekaragaman hayati, dan proses alami, pendekatan ini menawarkan alternatif yang lebih ramah lingkungan daripada metode berbasis kimia konvensional. Komponen utama pendekatan ini meliputi pengendalian biologis, pengelolaan habitat, resistensi yang diinduksi, dan pengelolaan hama terpadu. Meskipun masih ada tantangan, terutama dalam hal implementasi dan adaptasi terhadap perubahan iklim, pendekatan ekologis sangat penting untuk mencapai sistem pertanian berkelanjutan yang melindungi tanaman dan lingkungan.

DAFTAR PUSTAKA

- Agrios, G. N. (2005). Plant Pathology (5th ed.). *Plant Science - PLANT SCI*, 168, 922.
- Ali, J., Anumalla, M., Murugaiyan, V., Li, Z., Ali, J., Anumalla, M., Murugaiyan, V., & Li, Z. (2021). Green Super Rice (GSR) Traits: Breeding and Genetics for Multiple Biotic and Abiotic Stress Tolerance in Rice. *Rice Improvement*, 59–97. https://doi.org/10.1007/978-3-030-66530-2_3
- Ali, J., & Wani, S. H. (2021). Rice improvement: Physiological, molecular breeding and genetic perspectives. In *Rice Improvement: Physiological, Molecular Breeding and Genetic Perspectives*. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-66530-2>
- Altieri, M. A. (1999). The ecological role of biodiversity in agroecosystems. In *Invertebrate Biodiversity as Bioindicators of Sustainable Landscapes* (Vol. 74, pp. 19–31). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-50019-9.50005-4>
- Andama, J. B., Mujiono, K., Hojo, Y., Shinya, T., & Galis, I. (2020). Nonglandular silicified trichomes are essential for rice defense against chewing herbivores. *Plant Cell and Environment*, 104(April), 1–14. <https://doi.org/10.1111/pce.13775>
- Andreasen, C., & Stryhn, H. (2008). Increasing weed flora in Danish arable fields and its importance for biodiversity. *Weed Research*, 48(1), 1–9. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3180.2008.00603.x>

- Barzman, M., Bàrberi, P., Birch, A. N. E., Boonekamp, P., Dachbrodt-Saaydeh, S., Graf, B., Hommel, B., Jensen, J. E., Kiss, J., Kudsk, P., Lamichhane, J. R., Messéan, A., Moonen, A.-C., Ratnadass, A., Ricci, P., Sarah, J.-L., & Sattin, M. (2015). Eight principles of integrated pest management. *Agronomy for Sustainable Development*, 35(4), 1199–1215. <https://doi.org/10.1007/s13593-015-0327-9>
- Bravo, A., Likitvivatanavong, S., Gill, S. S., & Soberón, M. (2011). *Bacillus thuringiensis*: A story of a successful bioinsecticide. *Insect Biochemistry and Molecular Biology*, 41(7), 423–431. <https://doi.org/10.1016/j.ibmb.2011.02.006>
- Chakraborty, S., & Newton, A. C. (2011). Climate change, plant diseases and food security: an overview. *Plant Pathology*, 60(1), 2–14. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3059.2010.02411.x>
- Choudhary, D. K., & Johri, B. N. (2009). Interactions of *Bacillus* spp. and plants – With special reference to induced systemic resistance (ISR). *Microbiological Research*, 164(5), 493–513. <https://doi.org/10.1016/j.micres.2008.08.007>
- Dicke, M., & Poecke, R. M. P. Van. (2002). Signaling in plant-insect interactions: signal transduction in direct and indirect plant defence. *Plant Signal Transduction*, 3, 289–316.
- Erb, M. (2018). Plant Defenses against Herbivory: Closing the Fitness Gap. *Trends in Plant Science*, 23(3), 187–194. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2017.11.005>

- Hajjar, M. J., Ahmed, N., Alhudaib, K. A., & Ullah, H. (2023). Integrated Insect Pest Management Techniques for Rice. *Sustainability*, 15(5), 4499. <https://doi.org/10.3390/su15054499>
- Harman, G. E., Howell, C. R., Viterbo, A., Chet, I., & Lorito, M. (2004). Trichoderma species - opportunistic, avirulent plant symbionts. *Nature Reviews Microbiology*, 2(1), 43–56. <https://doi.org/10.1038/nrmicro797>
- Isbn, C., Pdf, T., Press, N. A., Academy, N., Panel, S., Interactions, E., Society, W., Isbn, C., Pdf, T., Press, N. A., & Academy, N. (1985). Chemical Ecology: The Chemistry of Biotic Interaction. In *NATIONAL ACADEMY PRESS Washington,: Vol. II*.
- Kessler, A., & Baldwin, I. T. (2001). Defensive function of herbivore-induced plant volatile emissions in nature. *Science*, 291(5511), 2141–2144. <https://doi.org/10.1126/science.291.5511.2141>
- Kogan, M. (1998). Integrated Pest Management: Historical Perspectives and Contemporary Developments. *Annual Review of Entomology*, 43(1), 243–270. <https://doi.org/10.1146/annurev.ento.43.1.243>
- Landis, D. A., Wratten, S. D., & Gurr, G. M. (2000). Habitat Management to Conserve Natural Enemies of Arthropod Pests in Agriculture. *Annual Review of Entomology*, 45(1), 175–201. <https://doi.org/10.1146/annurev.ento.45.1.175>

- Lewis, W. J., van Lenteren, J. C., Phatak, S. C., & Tumlinson, J. H. (1997). A total system approach to sustainable pest management. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 94(23), 12243–12248. <https://doi.org/10.1073/pnas.94.23.12243>
- Mandal, S., Mallick, N., & Mitra, A. (2009). Salicylic acid-induced resistance to *Fusarium oxysporum* f. sp. *lycopersici* in tomato. *Plant Physiology and Biochemistry*, 47(7), 642–649. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2009.03.001>
- Mithöfer, A., & Boland, W. (2016). Do you speak chemistry? *EMBO Reports*, 17(5), 626–629. <https://doi.org/10.15252/embr.201642301>
- Mujiono, K., Tohi, T., Sobhy, I. S., Hojo, Y., Shinya, T., & Galis, I. (2021). Herbivore-induced and constitutive volatiles are controlled by different oxylipin-dependent mechanisms in rice. *Plant Cell and Environment*, 44(8), 2687–2699. <https://doi.org/10.1111/pce.14126>
- Norris, R. F., & Kogan, M. (2005). Ecology of interactions between weeds and arthropods. *Annual Review of Entomology*, 50(1), 479–503. <https://doi.org/10.1146/annurev.ento.49.061802.123218>
- Pieterse, C. M. J., Zamioudis, C., Berendsen, R. L., Weller, D. M., Van Wees, S. C. M., & Bakker, P. A. H. M. (2014). Induced Systemic Resistance by Beneficial Microbes. *Annual Review of Phytopathology*, 52(1), 347–375. <https://doi.org/10.1146/annurev-phyto-082712-102340>

- Price, P. W., Denno, R. F., Eubanks, M. D., Finke, D. L., & Kaplan, I. (2011). *Insect Ecology: Behavior, Populations and Communities*. Cambridge University Press. www.cambridge.org
- Ratnadass, A., Fernandes, P., Avelino, J., & Habib, R. (2012). Plant species diversity for sustainable management of crop pests and diseases in agroecosystems: a review. *Agronomy for Sustainable Development*, 32(1), 273–303. <https://doi.org/10.1007/s13593-011-0022-4>
- Riemens, M., Sønderskov, M., Moonen, A.-C., Storkey, J., & Kudsk, P. (2022). An Integrated Weed Management framework: A pan-European perspective. *European Journal of Agronomy*, 133(December 2021), 126443. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2021.126443>
- Sahid, A. (2019). Aspek Biologi *Sycanus annulicornis* Dohrn. (Hemiptera: Reduviidae) Yang Dipelihara Dengan Pakan Alternatif Larva *Alphitobius diaperinus* Panzer (Coleoptera: Tenebrionidae). *Jurnal Agroekoteknologi Tropika Lembab*, 2(1), 50. <https://doi.org/10.35941/jatl.2.1.2019.2535.50-54>
- Scavo, A., Restuccia, A., & Mauromicale, G. (2018). Allelopathy: Principles and Basic Aspects for Agroecosystem Control. In *Sustainable Agriculture Reviews 28* (pp. 47–101). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-90309-5_2
- Schoonhoven, L. M., Loon, J. J. A. van, & Dicke, M. (2005). *Insect-Plant Biology*. Oxford University Press, USA; 2 edition.

- Shinya, T., Hojo, Y., Desaki, Y., Christeller, J. T., Okada, K., Shibuya, N., & Galis, I. (2016). Modulation of plant defense responses to herbivores by simultaneous recognition of different herbivore-associated elicitors in rice. *Scientific Reports*, 6(August), 1–13. <https://doi.org/10.1038/srep32537>
- Sopialena. (2017). *Segitiga Penyakit Tanaman* (Issue 112). Mulawarman University Press. Samarinda.
- Sopialena, S., Sofian, S., Tantiani, D., & Suyadi, S. (2021). Investasi Jamur Endofit Dalam Pengendalian Penyakit Blas Pada PadI (*Oryza sativa*). *Agrifor*, 20(2), 199. <https://doi.org/10.31293/agrifor.v20i2.5505>
- Sparks, T. C., Storer, N., Porter, A., Slater, R., & Nauen, R. (2021). Insecticide resistance management and industry: the origins and evolution of the Insecticide Resistance Action Committee (IRAC) and the mode of action classification scheme. *Pest Management Science*, 77(6), 2609–2619. <https://doi.org/10.1002/ps.6254>
- Stout, M. J., Thaler, J. S., & Thomma, B. P. H. J. (2006). Plant-Mediated Interactions Between Pathogenic Microorganisms And Herbivorous Arthropods. *Annual Review of Entomology*, 51(1), 663–689. <https://doi.org/10.1146/annurev.ento.51.110104.151117>
- Swanton, C. J., Nkoa, R., & Blackshaw, R. E. (2015). Experimental Methods for Crop-Weed Competition Studies. *Weed Science*, 63(SP1), 2–11. <https://doi.org/10.1614/WS-D-13-00062.1>

- Turlings, T. C. J., & Tumlinson, J. H. (1992). Systemic release of chemical signals by herbivore-injured corn. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*.
<https://doi.org/10.1073/pnas.89.17.8399>
- Turlings, T. C. J., & Wäckers, F. (2004). Recruitment of predators and parasitoids by herbivore-injured plants. In *Advances in Insect Chemical Ecology* (pp. 21–75). Cambridge University Press.
<https://doi.org/10.1017/CBO9780511542664.003>
- Untung, K. (2015). Pelembagaan Konsep Pengendalian Hama Terpadu di Indonesia. In *Jurnal Perlindungan Tanaman Indonesia* (Vol. 6, Issue 1, pp. 1–8).
- Velásquez, A. C., Castroverde, C. D. M., & He, S. Y. (2018). Plant–Pathogen Warfare under Changing Climate Conditions. *Current Biology*, 28(10), R619–R634.
<https://doi.org/10.1016/j.cub.2018.03.054>
- Vilà, M., Espinar, J. L., Hejda, M., Hulme, P. E., Jarošík, V., Maron, J. L., Pergl, J., Schaffner, U., Sun, Y., & Pyšek, P. (2011). Ecological impacts of invasive alien plants: a meta-analysis of their effects on species, communities and ecosystems. *Ecology Letters*, 14(7), 702–708.
<https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2011.01628.x>
- War, A. R., Paulraj, M. G., Ahmad, T., Buhroo, A. A., Hussain, B., Ignacimuthu, S., & Sharma, H. C. (2012). Mechanisms of plant defense against insect herbivores. *Plant Signaling & Behavior*, 7(10), 1306–1320.
<https://doi.org/10.4161/psb.21663>

- Wari, D., Kabir, M. A., Mujiono, K., Hojo, Y., Shinya, T., Tani, A., Nakatani, H., & Galis, I. (2019). Honeydew-associated microbes elicit defense responses against brown planthopper in rice. *Journal of Experimental Botany*, 70(5). <https://doi.org/10.1093/jxb/erz041>
- Ziska, L. H. (2016). The role of climate change and increasing atmospheric carbon dioxide on weed management: Herbicide efficacy. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 231, 304–309. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2016.07.014>

BAB 4

DASAR - DASAR PERLINDUNGAN TANAMAN BERKELANJUTAN

Oleh M. Alexander Mirza

4.1 Pendahuluan

Perlindungan tanaman berkelanjutan adalah pendekatan yang mengintegrasikan praktik-praktik ekologis dan inovasi teknologi untuk menjaga kesehatan tanaman sekaligus melestarikan lingkungan. Dalam era di mana perubahan iklim dan degradasi ekosistem menjadi ancaman nyata, konsep ini menjadi semakin relevan dan mendesak. Perlindungan tanaman berkelanjutan tidak hanya fokus pada peningkatan hasil panen dan kualitas produk, tetapi juga mempertimbangkan dampak jangka panjang terhadap kesehatan tanah, air, dan keanekaragaman hayati (Pretty, 2008). Prinsip-prinsip utama dari perlindungan tanaman berkelanjutan mencakup keanekaragaman hayati, keseimbangan ekosistem, penggunaan sumber daya alam yang efisien, penerapan teknologi ramah lingkungan, serta keterlibatan dan edukasi masyarakat (Altieri, 1995). Dengan prinsip-prinsip ini, kita dapat memastikan bahwa praktik pertanian yang diterapkan tidak hanya produktif tetapi juga bertanggung jawab secara ekologis.

Salah satu pilar utama dalam perlindungan tanaman berkelanjutan adalah konsep pengelolaan terpadu, yang mencakup pendekatan holistik terhadap pengendalian hama, penyakit, dan gulma (Matthews, 2015). Pengelolaan terpadu tidak hanya mengandalkan satu metode atau teknologi, melainkan menggabungkan berbagai strategi yang saling melengkapi untuk mencapai keseimbangan antara produktivitas pertanian dan pelestarian lingkungan (Radcliffe et al., 2009). Dengan melibatkan berbagai pihak, termasuk pemerintah, sektor swasta, dan komunitas lokal, pengelolaan terpadu menawarkan solusi yang lebih menyeluruh dan efektif dalam menghadapi tantangan pertanian modern (Gurr et al., 2012). Melalui penerapan pengelolaan terpadu, petani dapat mengurangi ketergantungan pada bahan kimia sintetis, meningkatkan ketahanan tanaman, dan pada akhirnya menciptakan sistem pertanian yang lebih berkelanjutan dan tangguh terhadap perubahan lingkungan (FAO, 2017).

4.2 Prinsip-Prinsip Utama

4.2.1 Keanekaragaman Hayati

Peran keanekaragaman hayati dalam perlindungan tanaman sangatlah penting dalam menciptakan ekosistem yang sehat dan seimbang. Keanekaragaman hayati mencakup variasi dalam jenis-jenis tanaman, hewan, dan mikroorganisme yang hidup dalam suatu ekosistem. Dalam konteks pertanian, keanekaragaman ini membantu mengurangi risiko serangan hama dan penyakit dengan menyediakan berbagai sumber makanan dan habitat bagi

organisme pemangsa alami. Misalnya, predator alami seperti burung dan serangga pemangsa dapat membantu mengendalikan populasi hama tanaman. Selain itu, berbagai jenis mikroorganisme dalam tanah, seperti jamur dan bakteri, berperan dalam dekomposisi bahan organik dan siklus nutrisi, yang pada gilirannya meningkatkan kesuburan tanah dan kesehatan tanaman (Pretty, 2008).

Manfaat keanekaragaman hayati untuk ketahanan tanaman juga sangat signifikan. Dengan adanya berbagai jenis tanaman dalam satu sistem pertanian, risiko gagal panen akibat serangan hama atau penyakit tertentu dapat diminimalkan (Pimentel et al., 2014). Hal ini karena tidak semua tanaman rentan terhadap hama atau penyakit yang sama. Selain itu, keanekaragaman genetik dalam populasi tanaman membantu tanaman mengembangkan resistensi alami terhadap kondisi lingkungan yang berubah, seperti perubahan iklim atau tekanan dari patogen. Tanaman dengan variasi genetik yang tinggi cenderung lebih tahan terhadap kondisi ekstrem, seperti kekeringan atau suhu tinggi, karena ada kemungkinan lebih besar bahwa beberapa individu akan memiliki adaptasi yang memungkinkan mereka bertahan (van Lenteren, 2012).

Dalam jangka panjang, keanekaragaman hayati juga berkontribusi pada keberlanjutan ekosistem pertanian. Sistem pertanian yang kaya akan keanekaragaman hayati cenderung lebih stabil dan tangguh terhadap gangguan eksternal (Zhang et al., 2011). Dengan mempertahankan berbagai spesies tanaman dan organisme lain, petani dapat membangun ekosistem yang lebih kuat dan lebih mampu beradaptasi dengan perubahan lingkungan (Dent, 2000).

Selain itu, keanekaragaman hayati mendukung layanan ekosistem penting, seperti penyerbukan oleh serangga dan penyaringan air oleh tanaman. Dengan demikian, menjaga dan meningkatkan keanekaragaman hayati bukan hanya penting untuk produksi pangan yang berkelanjutan tetapi juga untuk kesehatan ekosistem secara keseluruhan.

4.2.2 Keseimbangan Ekosistem

Pengaruh praktik pertanian terhadap ekosistem sangat kompleks dan bervariasi, tergantung pada jenis praktik yang diterapkan. Pada dasarnya, pertanian intensif yang mengandalkan penggunaan pupuk kimia dan pestisida dapat menyebabkan kerusakan serius pada ekosistem. Pupuk kimia berlebihan dapat mencemari air tanah dan permukaan, menyebabkan eutrofikasi di perairan dan mengganggu kehidupan akuatik (Zhang et al., 2011). Penggunaan pestisida yang tidak terkendali dapat membunuh serangga non-target, termasuk penyerbuk penting seperti lebah, serta predator alami hama (Pimentel, D., & Burgess, 2014). Selain itu, praktik seperti monokultur penanaman satu jenis tanaman dalam skala besar dapat mengurangi keanekaragaman hayati dan membuat ekosistem lebih rentan terhadap serangan hama dan penyakit. Kehilangan tutupan vegetasi alami dan pengolahan tanah yang berlebihan juga dapat menyebabkan erosi tanah dan kehilangan kesuburan tanah.

Untuk menjaga keseimbangan ekosistem, perlu diterapkan strategi yang mengintegrasikan prinsip-prinsip ekologis dalam praktik pertanian. Salah satu strategi utama adalah diversifikasi tanaman, yang dapat meningkatkan keanekaragaman hayati dan mengurangi risiko penyebaran

penyakit serta serangan hama. Praktik ini melibatkan penanaman berbagai jenis tanaman dalam rotasi atau secara bersamaan, sehingga memperkaya ekosistem dengan berbagai habitat dan sumber makanan bagi organisme lain. Selain itu, pertanian organik yang menghindari penggunaan bahan kimia sintetis dapat membantu menjaga kesehatan tanah dan air, serta mendukung populasi organisme bermanfaat seperti cacing tanah dan mikroorganisme tanah (Matthews, 2015).

Praktik agroforestri merupakan strategi lain yang efektif untuk menjaga keseimbangan ekosistem. Agroforestri adalah sistem penggunaan lahan yang menggabungkan pohon dan semak-semak dengan tanaman pangan atau ternak. Pendekatan ini tidak hanya meningkatkan keanekaragaman hayati, tetapi juga membantu mengurangi erosi tanah, meningkatkan retensi air, dan menyimpan karbon, sehingga berkontribusi pada mitigasi perubahan iklim. Pohon-pohon dalam sistem agroforestri dapat berfungsi sebagai penghalang angin, mengurangi kerusakan tanaman, dan menyediakan tempat berlindung bagi hewan liar dan serangga yang bermanfaat.

Selain itu, penerapan teknik konservasi tanah dan air sangat penting dalam mempertahankan keseimbangan ekosistem (Dent, 2000). Contohnya adalah penggunaan terasering di lahan miring untuk mencegah erosi, serta penanaman penutup tanah untuk menjaga kelembaban dan kesuburan tanah. Pengelolaan air yang baik, seperti pengaturan irigasi yang efisien dan pemanfaatan air hujan, juga dapat mengurangi tekanan terhadap sumber daya air alami. Dengan mengadopsi pendekatan-pendekatan ini,

praktik pertanian dapat menjadi lebih berkelanjutan dan tidak hanya berfokus pada produksi pangan tetapi juga pada pelestarian lingkungan, yang pada akhirnya mendukung keseimbangan ekosistem secara keseluruhan (van Lenteren, 2012).

4.2.3 Penggunaan Sumber Daya Alam yang Berkelanjutan

Pengelolaan tanah, air, dan sumber daya lainnya merupakan komponen penting dalam praktik pertanian berkelanjutan. Tanah yang subur dan sehat adalah dasar bagi produksi pangan yang berkualitas. Untuk itu, pengelolaan tanah yang baik melibatkan praktik-praktik seperti rotasi tanaman, penggunaan pupuk organik, dan pengurangan pengolahan tanah yang berlebihan (Altieri, 1995). Rotasi tanaman dapat memperbaiki struktur tanah dan menambah kandungan nutrisi, sementara pupuk organik, seperti kompos, meningkatkan bahan organik tanah dan aktivitas mikroba yang bermanfaat (Pretty, 2008). Selain itu, untuk melindungi tanah dari erosi, petani dapat menggunakan teknik seperti terasering dan penanaman penutup tanah. Pengelolaan air juga tidak kalah penting, mengingat air adalah sumber daya yang semakin terbatas. Praktik irigasi yang efisien, seperti irigasi tetes, dapat mengurangi penggunaan air tanpa mengurangi produktivitas tanaman.

Praktik penggunaan sumber daya yang efisien dan ramah lingkungan dapat meningkatkan keberlanjutan dan mengurangi dampak negatif terhadap lingkungan. Salah satu praktik tersebut adalah penggunaan teknologi presisi dalam pertanian. Teknologi ini, seperti sensor tanah dan sistem

pemantauan cuaca, memungkinkan petani untuk memberikan input yang tepat pada tanaman—baik itu air, pupuk, maupun pestisida—berdasarkan kebutuhan spesifik mereka (Zhang et al., 2011). Dengan cara ini, penggunaan bahan kimia dapat diminimalkan, mengurangi potensi pencemaran tanah dan air. Selain itu, penggunaan energi terbarukan, seperti tenaga surya dan angin, untuk mengoperasikan peralatan pertanian dapat mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil dan emisi gas rumah kaca (Matthews, 2015).

Pemanfaatan kembali dan daur ulang sumber daya juga merupakan langkah penting dalam penggunaan sumber daya alam yang berkelanjutan. Misalnya, limbah organik dari pertanian dapat dikomposkan dan digunakan kembali sebagai pupuk, mengurangi kebutuhan akan pupuk kimia sintetis (Altieri, 1995). Limbah tanaman juga dapat diubah menjadi bioenergi, seperti biogas, yang dapat digunakan untuk kebutuhan energi di peternakan (Pretty, 2008). Selain itu, air limbah dari proses irigasi atau peternakan dapat diolah dan digunakan kembali untuk irigasi atau kebutuhan lainnya. Dengan memaksimalkan penggunaan kembali dan daur ulang sumber daya, pertanian dapat mengurangi limbah dan meningkatkan efisiensi penggunaan sumber daya.

Untuk memastikan praktik-praktik tersebut diterapkan secara luas, pendidikan dan pelatihan bagi petani menjadi kunci. Petani perlu diberikan pengetahuan dan keterampilan dalam pengelolaan sumber daya yang berkelanjutan, serta didorong untuk mengadopsi teknologi ramah lingkungan. Selain itu, pemerintah dan organisasi non-pemerintah dapat

memainkan peran penting dalam menyediakan insentif, regulasi, dan dukungan teknis yang diperlukan. Melalui kolaborasi berbagai pihak, penggunaan sumber daya alam dalam pertanian dapat diarahkan menuju keberlanjutan, yang tidak hanya bermanfaat bagi pertanian itu sendiri, tetapi juga bagi ekosistem dan masyarakat luas.

4.2.4 Penerapan Teknologi Ramah Lingkungan

Inovasi teknologi dalam perlindungan tanaman telah berkembang pesat dalam beberapa dekade terakhir, menawarkan solusi yang lebih efektif dan ramah lingkungan dalam menghadapi tantangan pertanian modern. Teknologi ini tidak hanya bertujuan untuk meningkatkan hasil panen tetapi juga untuk mengurangi dampak negatif terhadap lingkungan. Salah satu inovasi utama adalah pengembangan pestisida biologis yang berasal dari organisme alami, seperti jamur, bakteri, dan virus (Gurr et al., 2012). Pestisida biologis ini bekerja dengan cara yang lebih spesifik terhadap hama sasaran, mengurangi risiko terhadap organisme non-target dan mengurangi akumulasi residu kimia di lingkungan. Selain itu, penggunaan teknologi DNA dan bioteknologi telah memungkinkan identifikasi dan manipulasi gen tanaman untuk meningkatkan resistensi terhadap hama dan penyakit, mengurangi kebutuhan akan penggunaan pestisida kimia.

Contoh teknologi ramah lingkungan lainnya adalah sistem irigasi presisi, seperti irigasi tetes, yang mengurangi pemborosan air dengan mengirimkan air langsung ke akar tanaman dalam jumlah yang tepat (FAO, 2017). Teknologi ini sangat efisien dalam penggunaan air, mengurangi evaporasi dan aliran permukaan yang dapat menyebabkan erosi tanah

dan pencemaran air. Selain itu, penggunaan sensor tanah dan sistem pemantauan cuaca memungkinkan petani untuk memantau kondisi tanah dan iklim secara real-time, membantu mereka membuat keputusan yang lebih cerdas mengenai irigasi, pemupukan, dan perlindungan tanaman. Dengan informasi yang tepat, petani dapat mengurangi penggunaan sumber daya dan meningkatkan efisiensi produksi (Radcliffe et al., 2009).

Teknologi digital dan otomatisasi juga memainkan peran penting dalam penerapan teknologi ramah lingkungan di pertanian. Drone dan satelit, misalnya, dapat digunakan untuk memantau kesehatan tanaman dan kondisi ladang secara lebih akurat dan efisien. Dengan data yang dikumpulkan, petani dapat mendeteksi masalah seperti kekurangan nutrisi atau infestasi hama lebih awal, memungkinkan mereka untuk mengambil tindakan korektif yang tepat waktu dan minimal invasif. Selain itu, mesin pertanian otomatis yang dilengkapi dengan teknologi GPS dapat meningkatkan efisiensi dalam penanaman, pemanenan, dan pengolahan, mengurangi konsumsi bahan bakar dan emisi karbon (Dent, 2000).

Pertanian vertikal dan hidroponik adalah contoh lain dari teknologi ramah lingkungan yang semakin populer, terutama di daerah perkotaan dengan ruang terbatas. Sistem ini memungkinkan penanaman tanaman di lingkungan yang dikendalikan, menggunakan lebih sedikit tanah dan air dibandingkan dengan pertanian konvensional. Dengan menggunakan lampu LED hemat energi dan sistem kontrol iklim, pertanian vertikal dapat menghasilkan tanaman sepanjang tahun dengan efisiensi energi yang tinggi.

Teknologi ini tidak hanya mengurangi jejak karbon dari transportasi makanan tetapi juga mengurangi penggunaan pestisida dan pupuk kimia, karena kondisi lingkungan yang terkendali mengurangi risiko penyakit dan hama.

Penerapan teknologi ramah lingkungan dalam pertanian juga membutuhkan dukungan dari berbagai pihak, termasuk pemerintah, industri, dan komunitas akademis. Pemerintah dapat memberikan insentif dan regulasi yang mendorong adopsi teknologi berkelanjutan, seperti subsidi untuk energi terbarukan atau pajak karbon (Pimentel, D., & Burgess, 2014). Industri dapat berinvestasi dalam penelitian dan pengembangan teknologi baru, serta menyediakan pelatihan dan dukungan teknis bagi petani. Sementara itu, komunitas akademis dapat terus melakukan penelitian untuk menemukan solusi baru dan meningkatkan teknologi yang ada. Melalui kolaborasi ini, teknologi ramah lingkungan dapat diterapkan lebih luas, membantu pertanian menjadi lebih berkelanjutan dan tahan terhadap tantangan masa depan.

4.2.5 Keterlibatan dan Edukasi Masyarakat

Pentingnya partisipasi masyarakat dalam praktik pertanian berkelanjutan tidak bisa diremehkan. Partisipasi masyarakat mencakup berbagai pihak, mulai dari petani, konsumen, hingga lembaga pemerintah dan organisasi non-pemerintah. Masyarakat yang terlibat aktif dalam proses pertanian berkelanjutan dapat membantu menciptakan kesadaran kolektif tentang pentingnya menjaga lingkungan dan kesehatan manusia. Selain itu, partisipasi masyarakat dapat meningkatkan transparansi dan akuntabilitas dalam pengelolaan sumber daya alam, serta memfasilitasi

pertukaran informasi dan pengetahuan antara berbagai kelompok (FAO, 2017). Dengan melibatkan masyarakat, kita dapat mendorong pengambilan keputusan yang lebih inklusif dan responsif terhadap kebutuhan dan aspirasi lokal (Gurr et al., 2012).

Program edukasi dan pelatihan adalah elemen kunci dalam meningkatkan keterlibatan masyarakat dalam pertanian berkelanjutan. Edukasi dapat dimulai sejak dini, melalui kurikulum sekolah yang mencakup topik-topik tentang pertanian organik, keanekaragaman hayati, dan pengelolaan sumber daya alam. Selain itu, program pelatihan bagi petani dewasa dan masyarakat luas dapat membantu mereka memahami teknik-teknik pertanian berkelanjutan, seperti penggunaan pupuk organik, rotasi tanaman, dan pengelolaan air yang efisien (Altieri, 1995). Pelatihan ini juga dapat mencakup keterampilan dalam menggunakan teknologi ramah lingkungan, seperti sistem irigasi presisi atau alat pemantauan digital. Dengan menyediakan akses ke informasi dan keterampilan ini, masyarakat dapat lebih siap menghadapi tantangan pertanian modern dan berkontribusi pada pembangunan berkelanjutan.

Inisiatif lokal dan komunitas juga memainkan peran penting dalam edukasi dan pelatihan. Kelompok tani, koperasi, dan organisasi masyarakat sipil dapat menjadi platform untuk berbagi pengetahuan dan pengalaman, serta untuk mempromosikan praktik terbaik dalam pertanian berkelanjutan. Melalui kerja sama komunitas, petani dapat memperoleh dukungan teknis dan finansial, serta mengembangkan jaringan pemasaran untuk produk mereka.

Program pertanian perkotaan dan kebun komunitas, misalnya, dapat memberikan contoh langsung tentang cara menanam makanan secara berkelanjutan, sekaligus membangun solidaritas sosial dan meningkatkan ketahanan pangan lokal. Inisiatif ini juga dapat berfungsi sebagai model yang dapat diadaptasi dan direplikasi di daerah lain (Pretty, 2008).

Kolaborasi antara berbagai sektor—pemerintah, swasta, akademisi, dan masyarakat—adalah kunci untuk memperkuat keterlibatan dan edukasi masyarakat dalam pertanian berkelanjutan. Pemerintah dapat memainkan peran penting dengan menyediakan kebijakan yang mendukung, serta insentif finansial dan regulasi yang mendorong praktik berkelanjutan. Sektor swasta dapat berinvestasi dalam inovasi dan menyediakan akses ke teknologi yang ramah lingkungan. Sementara itu, akademisi dapat terus melakukan penelitian untuk menemukan solusi baru dan menyebarkan pengetahuan melalui pendidikan dan pelatihan. Dengan kerja sama ini, kita dapat menciptakan ekosistem yang mendukung partisipasi aktif masyarakat dalam pertanian berkelanjutan, yang pada akhirnya akan membawa manfaat bagi lingkungan, ekonomi, dan kesejahteraan sosial.

4.3 Konsep Pengelolaan Terpadu

4.3.1 Pengelolaan Terpadu Hama (PTH)

Konsep dan prinsip dasar Pengelolaan Terpadu Hama (PTH) adalah pendekatan holistik untuk pengendalian hama yang mengintegrasikan berbagai strategi dan metode

dengan tujuan untuk mengelola populasi hama secara efektif, aman, dan berkelanjutan. PTH tidak hanya mengandalkan satu metode pengendalian, tetapi menggunakan kombinasi dari berbagai teknik, termasuk pengendalian biologis, mekanis, fisik, kimia, dan budaya. Prinsip dasar PTH adalah meminimalkan penggunaan pestisida kimia sintetis dengan cara memprioritaskan metode pengendalian yang lebih alami dan berkelanjutan, sehingga mengurangi dampak negatif terhadap lingkungan, kesehatan manusia, dan organisme non-target (Matthews, 2015). PTH juga mendorong pemantauan terus-menerus terhadap populasi hama dan lingkungan, sehingga tindakan pengendalian dapat diambil tepat waktu berdasarkan ambang ekonomi, yaitu tingkat populasi hama di mana kerugian ekonomi yang ditimbulkan menjadi signifikan.

Teknik pengendalian hama secara terpadu mencakup berbagai metode yang diterapkan secara sinergis untuk mengelola populasi hama. Salah satu teknik utama adalah pengendalian biologis, yang melibatkan penggunaan predator alami, parasit, atau patogen untuk mengurangi populasi hama. Contohnya adalah penggunaan ladybugs untuk mengendalikan populasi kutu daun atau penggunaan nematoda untuk mengendalikan larva serangga tanah (van Lenteren, 2012). Teknik lain adalah pengendalian mekanis dan fisik, seperti penggunaan jaring atau perangkap untuk menangkap hama secara langsung atau mencegah mereka mencapai tanaman. Selain itu, praktik budidaya seperti rotasi tanaman, penanaman tanaman penutup, dan penggunaan varietas tanaman tahan hama dapat membantu mengurangi prevalensi hama. Penggunaan pestisida kimia tetap merupakan bagian dari PTH, namun penggunaannya

dibatasi dan dipilih berdasarkan selektivitas dan keefektifan yang minimal terhadap organisme non-target. Melalui penerapan berbagai teknik ini, PTH bertujuan untuk menjaga populasi hama pada tingkat yang dapat ditoleransi sambil meminimalkan dampak negatif terhadap lingkungan dan kesehatan.

4.3.2 Pengelolaan Terpadu Penyakit Tanaman

Identifikasi penyakit dan langkah pencegahan merupakan langkah awal yang penting dalam pengelolaan terpadu penyakit tanaman. Identifikasi yang akurat memungkinkan petani untuk memahami jenis patogen yang menyerang tanaman, seperti bakteri, virus, jamur, atau nematoda, serta gejala yang ditimbulkannya. Ini bisa dilakukan melalui pengamatan visual, analisis laboratorium, atau teknologi modern seperti deteksi DNA. Setelah penyakit diidentifikasi, langkah pencegahan dapat diterapkan untuk mengurangi risiko penyebaran dan dampaknya. Langkah-langkah ini termasuk penggunaan benih yang bebas penyakit, sanitasi alat dan lingkungan pertanian, rotasi tanaman untuk menghindari akumulasi patogen, serta pemilihan lokasi tanam yang sesuai. Pencegahan juga melibatkan pemantauan rutin terhadap tanaman untuk mendeteksi tanda-tanda awal penyakit, sehingga intervensi dapat dilakukan segera sebelum penyakit menyebar lebih luas (Pimentel, D., & Burgess, 2014).

Metode pengelolaan penyakit yang ramah lingkungan menekankan pada penggunaan teknik-teknik yang meminimalkan dampak negatif terhadap ekosistem dan kesehatan manusia. Salah satu metode utama adalah pengendalian hayati, yang melibatkan penggunaan

organisme hidup untuk menekan populasi patogen. Contohnya termasuk penggunaan mikroorganisme antagonis seperti *Trichoderma* spp. untuk melawan jamur patogen atau penggunaan nematoda parasitik untuk mengendalikan serangga vektor penyakit. Selain itu, pemilihan varietas tanaman yang tahan penyakit merupakan strategi penting dalam pengelolaan penyakit yang ramah lingkungan, karena dapat mengurangi kebutuhan akan bahan kimia sintetis. Teknik lain termasuk penggunaan bahan organik dan kompos untuk meningkatkan kesehatan tanah dan ketahanan tanaman terhadap penyakit. Dengan mengadopsi pendekatan ini, pengelolaan terpadu penyakit tanaman tidak hanya berfokus pada pengendalian penyakit, tetapi juga pada peningkatan kesehatan ekosistem secara keseluruhan (FAO, 2017).

4.3.3 Pengelolaan Terpadu Gulma

Pendekatan pengelolaan gulma melibatkan penerapan strategi yang mengintegrasikan berbagai metode untuk mengendalikan gulma secara efektif dan berkelanjutan. Salah satu pendekatan utama adalah pengelolaan berbasis pencegahan, yang mencakup teknik-teknik seperti penggunaan mulsa untuk menutupi tanah dan mencegah pertumbuhan gulma, serta pemilihan varietas tanaman yang dapat bersaing dengan gulma (Altieri, 1995). Pendekatan ini juga melibatkan pengelolaan benih gulma dengan memastikan bahwa benih-benih yang digunakan tidak terkontaminasi oleh benih gulma, serta menjaga kebersihan peralatan dan kendaraan pertanian untuk menghindari penyebaran benih gulma ke area lain. Selain itu, rotasi tanaman yang efektif dapat membantu mengurangi jumlah

gulma dengan mengubah kondisi lingkungan yang mendukung pertumbuhannya, serta meningkatkan keberagaman tanaman yang mengurangi kemungkinan gulma spesifik menjadi dominan.

Teknologi dan metode kontrol gulma yang ramah lingkungan menawarkan solusi yang lebih berkelanjutan dibandingkan dengan penggunaan herbisida kimia. Salah satu teknologi terbaru adalah penggunaan sistem pengendalian gulma berbasis drone yang dilengkapi dengan sensor dan teknologi pemantauan untuk mendeteksi dan menyemprotkan herbisida secara tepat pada area yang terinfeksi gulma, sehingga mengurangi penggunaan bahan kimia secara keseluruhan. Metode lain termasuk penggunaan robot penyiang otomatis yang dapat menargetkan gulma secara spesifik tanpa merusak tanaman utama. Teknologi ini tidak hanya meningkatkan efisiensi kontrol gulma tetapi juga mengurangi dampak negatif terhadap lingkungan dan kesehatan manusia (Matthews, 2015). Selain itu, sistem pengelolaan gulma yang terintegrasi dapat memanfaatkan teknik pengendalian mekanis seperti pencabutan gulma secara manual atau penggunaan alat mekanis yang dirancang khusus untuk mengganggu pertumbuhan gulma (Pimentel, D., & Burgess, 2014).

Metode pengendalian gulma secara terpadu juga mencakup teknik pengendalian biologis yang melibatkan pemanfaatan organisme hidup untuk menekan pertumbuhan gulma. Contohnya adalah penggunaan serangga herbivora atau patogen spesifik yang dapat menyerang gulma tertentu tanpa mempengaruhi tanaman utama atau spesies lain. Pendekatan ini dapat dilakukan

dengan meneliti dan mengidentifikasi musuh alami gulma dan memperkenalkan mereka ke lingkungan yang ditargetkan. Selain itu, teknik pengelolaan tanah seperti penanaman penutup tanah dan pengolahan tanah yang tepat dapat membantu mengurangi jumlah gulma dengan mengubah kondisi tanah yang mendukung pertumbuhannya (Altieri, 1995). Dengan mengintegrasikan berbagai metode ini, pengelolaan terpadu gulma dapat mengurangi ketergantungan pada herbisida kimia, meningkatkan keberagaman ekosistem, dan mendukung pertanian yang lebih berkelanjutan dan ramah lingkungan (Pretty, 2008).

4.3.4 Kolaborasi Antara Berbagai Pihak

Peran pemerintah, swasta, dan komunitas dalam pengelolaan terpadu sangat penting untuk memastikan keberhasilan dan keberlanjutan praktik pertanian yang berkelanjutan (FAO, 2017). Pemerintah dapat menyediakan kebijakan, regulasi, dan insentif yang mendukung pengelolaan terpadu, seperti subsidi untuk teknologi ramah lingkungan atau pembiayaan untuk program pendidikan dan pelatihan. Mereka juga bertanggung jawab untuk menetapkan standar dan regulasi yang melindungi lingkungan dan kesehatan masyarakat. Sektor swasta, termasuk perusahaan pertanian dan industri teknologi, dapat berinvestasi dalam penelitian dan pengembangan inovasi baru, menyediakan alat dan teknologi yang diperlukan, serta membangun kemitraan dengan petani untuk implementasi solusi yang berkelanjutan. Komunitas lokal, termasuk petani dan kelompok masyarakat, memainkan peran krusial dalam penerapan praktik, berbagi pengetahuan lokal, dan mendukung inisiatif yang sesuai

dengan kebutuhan spesifik mereka. Kolaborasi antara ketiga pihak ini memastikan pendekatan yang menyeluruh dan berkelanjutan dalam pengelolaan sumber daya dan perlindungan lingkungan.

Contoh kolaborasi yang sukses dapat ditemukan dalam berbagai inisiatif di seluruh dunia. Salah satu contohnya adalah Program Kemitraan untuk Pembangunan Berkelanjutan (Sustainable Development Partnership Program) yang melibatkan pemerintah, sektor swasta, dan organisasi non-pemerintah untuk mengatasi masalah ketahanan pangan dan keberlanjutan lingkungan di berbagai negara (FAO, 2017). Di program ini, pemerintah menyediakan kerangka regulasi dan dukungan finansial, perusahaan swasta menyumbangkan teknologi dan keahlian, sementara komunitas lokal berperan aktif dalam penerapan dan penyesuaian praktik pertanian sesuai kebutuhan mereka. Di Indonesia, program seperti "Sekolah Lapangan untuk Petani" menunjukkan bagaimana kolaborasi antara pemerintah dan lembaga swadaya masyarakat dapat meningkatkan keterampilan petani dalam teknik pertanian berkelanjutan melalui pelatihan langsung di lapangan. Inisiatif ini tidak hanya meningkatkan hasil pertanian tetapi juga memperkuat kapasitas komunitas lokal untuk mengelola sumber daya mereka secara lebih efektif (Pretty, 2008).

4.3.5 Evaluasi dan Pemantauan

Evaluasi dan pemantauan adalah aspek penting dalam memastikan efektivitas pengelolaan terpadu dan keberlanjutan praktik pertanian. Metode evaluasi efektivitas melibatkan pengumpulan dan analisis data terkait hasil

implementasi pengelolaan terpadu, seperti perubahan dalam populasi hama, kesehatan tanaman, dan dampak lingkungan. Teknik ini sering kali menggunakan indikator kinerja seperti penurunan jumlah hama atau peningkatan hasil panen. Sistem pemantauan berkelanjutan, di sisi lain, memanfaatkan teknologi seperti sensor tanah, sistem pemantauan cuaca, dan drone untuk mengumpulkan data secara real-time. Data ini memungkinkan petani dan pengelola untuk menilai kondisi lapangan secara terus-menerus dan membuat penyesuaian yang diperlukan untuk mengoptimalkan hasil. Dengan mengintegrasikan evaluasi dan pemantauan berkelanjutan, praktik pengelolaan terpadu dapat diadaptasi dengan cepat terhadap perubahan kondisi dan tantangan baru, sehingga mendukung pertanian yang lebih efisien dan ramah lingkungan (FAO, 2017).

4.4 Kesimpulan

Kesimpulan dan ringkasan poin-poin penting menunjukkan bahwa perlindungan tanaman berkelanjutan adalah pendekatan holistik yang mengintegrasikan berbagai strategi untuk mengelola hama, penyakit, dan gulma dengan cara yang ramah lingkungan dan berkelanjutan. Prinsip dasar dari pengelolaan terpadu mencakup pemantauan dan identifikasi yang akurat, penggunaan teknik pengendalian yang beragam seperti biologis, mekanis, dan budaya, serta adopsi teknologi modern yang efisien. Keterlibatan masyarakat, dukungan pemerintah, serta kolaborasi antara berbagai sektor memainkan peran kunci dalam keberhasilan penerapan praktik ini. Program edukasi dan pelatihan yang komprehensif serta sistem evaluasi dan pemantauan

berkelanjutan memastikan bahwa strategi yang diterapkan dapat disesuaikan dan diperbaiki sesuai kebutuhan, menjaga keseimbangan ekosistem, dan meminimalkan dampak negatif terhadap lingkungan.

Visi masa depan perlindungan tanaman berkelanjutan adalah menciptakan sistem pertanian yang lebih adaptif, efisien, dan harmonis dengan lingkungan. Di masa depan, diharapkan bahwa teknologi canggih seperti kecerdasan buatan dan Internet of Things (IoT) akan semakin banyak diterapkan untuk mengoptimalkan pengelolaan hama dan penyakit, serta meningkatkan efisiensi penggunaan sumber daya. Visi ini mencakup integrasi lebih mendalam antara praktik pertanian dengan prinsip keberlanjutan, seperti pengelolaan air yang cerdas, pemanfaatan energi terbarukan, dan pengurangan jejak karbon. Selain itu, partisipasi aktif komunitas lokal dan peningkatan kesadaran global akan mendorong adopsi luas dari teknik-teknik ramah lingkungan, mendukung ketahanan pangan sambil menjaga kesehatan planet kita untuk generasi mendatang.

DAFTAR PUSTAKA

- Altieri, M.A. (1995) 'groecology: The Science of Sustainable Agriculture (2nd ed.)', *Boulder: Westview Press*. [Preprint].
- Dent, D. (2000) 'Insect Pest Management (2nd ed.)', *Wallingford: CABI Publishing* [Preprint].
- FAO (2017) 'Sustainable Crop Production Intensification (SCPI) through Ecosystem-based Approaches.', *Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations*. [Preprint].
- Gurr, G. M., Wratten, S. D & Snyder, W.E. (2012) 'Biodiversity and Insect Pests: Key Issues for Sustainable Management.', *Chichester: John Wiley & Sons*. [Preprint].
- van Lenteren, J.C. (2012) 'The State of Commercial Augmentative Biological Control: Plenty of Natural Enemies, But a Frustrating Lack of Uptake', *BioControl*, 57(1), pp. 1–20. Available at: <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s10526-011-9395-1>.
- Matthews, G. (2015) 'Integrated Pest Management. In Matthews, G., et al. (Eds.), *Pesticides: Health, Safety and the Environment*', *Hoboken: John Wiley & Sons*, pp. 253–264.
- Pimentel, D., & Burgess, M. (2014) 'Environmental and Economic Costs of the Application of Pesticides Primarily in the United States.', *In Integrated Pest Management: Pesticide Problems*, pp. 47–71.

- Pretty, J. (2008) 'Agricultural Sustainability: Concepts, Principles and Evidence.', *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 363(1491), pp. 447–465. Available at: <https://doi.org/https://doi.org/10.1098/rstb.2007.2163>.
- Radcliffe, E. B., Hutchison, W. D., & Cancelado, R.E. (2009) 'Integrated Pest Management: Concepts, Tactics, Strategies and Case Studies.', *Cambridge: Cambridge University Press* [Preprint].
- Zhang, W., Jiang, F., & Ou, J. (2011) 'Global Pesticide Consumption and Pollution: With China as a Focus.', *Proceedings of the International Academy of Ecology and Environmental Sciences*, 1(2), pp. 125–144.

BAB 5

PEMANFAATAN MIKROBA DALAM PERLINDUNGAN TANAMAN

Oleh Ni'matuljannah Akhsan

5.1 Pendahuluan

Mikroba adalah makhluk hidup yang sangat kecil yang tidak dilihat dengan mata telanjang atau harus menggunakan bantuan mikroskop untuk melihatnya. Mikroba sangat kecil, umumnya berukuran kurang dari satu mikrometer. Mikroba banyak ditemukan di tanah, udara, air, manusia, hewan dan tumbuhan. Tanah sangat kaya dengan keanekaragaman mikroba, sebagai contoh ditanah terdapat antara lain bakteri, jamur, protozoa, alga, nematoda dan virus. Umumnya mikroba sangat bermanfaat dalam kehidupandi alam ini. Pada umumnya mikroba tidak berbahaya bagi manusia, hewan dan tumbuhan. Beberapa peran mikroba yang nyata di bidang pertanian yaitu sebagai biopestisida (produk yang mengandung mikroba patogen bagi hama), agen pengendali hayati (mikroorganisme yang dimanfaatkan untuk mengendalikan patogen penyebab penyakit tanaman) dan biofelerizer (Produk yang mengandung mikroba yang dapat memperbaiki sifat fisik tanah dan meningkatkan pertumbuhan tanaman.

5.1.1 Peran Mikroba Dalam Ekosistem

Mikroba mempunyai fungsi yang sangat penting pada berbagai segi kehidupan. Sebagai contoh adalah perannya dapat menguraikan bahan-bahan organik. Mikroba yang paling umum di temukan di hutan dan lingkungan alamnya adalah jamur dan baktri. Kedua jenis mikroba ini berperan penting dalam dekomposisi seresah atau bahan-bahan organik yang mati. Apabila tidak ada mikroba ini maka bahan-bahan organik yang ada menjadi bertumpuk-tumpuk sehingga dapat menyebabkan polusi terhadap lingkungan. Bakteri merupakan mikroba yang bertanggung jawab dalam menguraikan bahan-bahan organik menjadi senyawa anorganik yang lebih sederhana. Mikroba jamur bertanggung jawab untuk menguraikan bahan organik menjadi senyawa organik yang kompleks. Sebagai dekomposer, mikroba mengeluarkan enzim yang mampu untuk dekomposisi bahan organik. Mikroba dekomposer mampu mengubah senyawa kimia yang tidak dapat digunakan oleh makhluk hidup lainnya menjadi bentuk lain yang dapat digunakan sebagai nutrisi. Proses tersebut sangat penting dalam menjaga keseimbangan ekosistem karena tanpa dekomposer, nutrisi yang terperangkap dalam bahan organik akan sulit dijangkau oleh organisme lainnya (Jekti, 2018; Susilawati et al, 2023; Tirtana, 2024; Good Doctor ID, 2023).

Sebagai dekomposer, bakteri mempunyai peran penting dalam memelihara kebersihan lingkungan. Pada proses dekomposisi, mikroba mampu menghancurkan bahan organik yang dapat menjadi sumber pencemaran seperti sampah atau limbah pertanian. Mikroba dekomposer membantu menjaga lingkungan tetap sehat dan bersih.

Mikroba juga berperan penting dalam menjaga keseimbangan lingkungan melalui proses bioremediasi. Bioremediasi adalah proses menghilangkan polutan dalam lingkungan menggunakan organisme hidup seperti bakteri dan jamur. Dekomposer juga dapat digunakan untuk proses bioremediasi karena mampu mengurai senyawa kimia berbahaya menjadi bentuk yang tidak berbahaya. Dekomposer sering pula dimanfaatkan dalam proses pembuatan pupuk organik. Bahan-bahan organik yang di dekomposisi oleh mikroba dekomposer, menghasilkan pupuk organik yang kaya akan nutrisi bagi tanaman. Dalam hal ini mikroba dekomposer berperan penting dalam menjaga kesuburan tanah.

Siklus nutrisi di alam sangat tergantung pada mikroba. Bakteri *Rhizobium* sp. Yang hidup berdampingan dengan akar tanaman legum, memiliki kemampuan untuk mengikat Nitrogen dari udara. Selanjutnya Nitrogen ini digunakan oleh tanaman legum untuk pertumbuhannya. Keberadaan bakteri *Rhizobium* sp. Sangat penting untuk ekosistem. Terutama tanaman legum.

Mikroba mempunyai peran sangat penting untuk tanah pertanian, karena dapat menyuburkan tanah. Tanah yang subur umumnya memiliki populasi mikroba sangat tinggi, yaitu lebih dari 100 juta per gram tanah. Mikroorganisme juga mempunyai peran penting menguraikan bahan-bahan organik, sehingga mampu mendaur ulang bahan organik menjadi unsur hara tanaman. Sebagian mikroba juga mampu membantu tanaman untuk penyerapan unsur hara dan melindungi tanaman dari mikroba patogen tanaman.

Berdasarkan cara memperoleh makanan, mikroba dikelompokkan menjadi dua yaitu, mikroba autotroph dan mikroba heterotroph. Sifatnya yang autotrof dan heterotrof inilah maka mikroba banyak berperan sebagai dekomposer dan isamping bisa juga mensintesis unsur-unsur hara yang dibutuhkan tanaman. Mikroba Autotroph adalah mikroba yang dapat mengolah makanan sendiri dengan mensintesis senyawa anorganik atau senyawa sederhana menjadi senyawa organik atau senyawa yang lebih kompleks.

1. Mikroba Autotrof

Mikroba autotrof mikroba yang dapat mensintesis makanannya sendiri. Mikroba autotrof terdiri dari dua golongan yaitu fotoautotrof dan kemoautotrof.

- Mikroba fotoautotrof adalah mikroba yang mampu mensintesis makanannya sendiri dengan bantuan sumber energi sinar matahari.
- Mikroba kemoautotrof adalah mikroba yang mampu mensintesis makanannya sendiri dengan bantuan sumber energi hasil oksidasi organik.

2. Mikroba Heterotrof

Mikroba heterotrof merupakan mikroba yang tidak mampu membuat makanannya sendiri. Umumnya mikroba heterotrof hidup sebagai parasit atau saprofit. Sumber makanannya berasal organisme hidup sebagai parasit atau dengan menguraikan dan memanfaatkan sisa-sisa makhluk hidup, baik flora maupun fauna sebagai saprofit.

5.1.2 Konsep Agens Hayati Sebagai Pengendali hama dan Penyakit Tumbuhan

Agensia hayati atau agens hayati atau agen biologi adalah Makhluk hidup yang dimanfaatkan untuk menurunkan populasi hama dan patogen tanaman secara alami. Agens hayati bekerja dengan mengendalikan organisme pengganggu tanaman secara alami melalui interaksi dengan organisme targetnya. Organisme yang sering digunakan sebagai agens hayati seperti serangga, nematoda, bakteri, jamur dan virus yang mempunyai kemampuan secara alami mengendalikan hama dan patogen tanaman.

Konsep ini menawarkan alternatif yang lebih ramah lingkungan dibandingkan pestisida sintetik. Umumnya pestisida sintetik berdampak terhadap ekosistem. Mikroorganisme mempunyai fungsi penting untuk menjaga kelestarian dalam ekosistem, salah satunya adalah dunia pertanian. Jauh sebelum pestisida kimia ditemukan, petani telah memanfaatkan mikroba untuk melindungi tanaman mereka. **Pengendalian hayati** menggunakan mikroba adalah salah satu cara yang paling ramah lingkungan untuk mengatasi masalah hama dan penyakit tanaman. Pemanfaatan agens hayati di bidang pertanian sangat berkontribusi pada pendekatan pertanian yang berkelanjutan yang ramah lingkungan. Pemanfaatan agens hayati juga dapat membantu terjaganya keseimbangan ekosistem pertanian dan yang lebih penting adalah mengurangi resiko terjadinya resistensi hama dan patogen terhadap pestisida kimia. Agens hayati juga mampu meningkatkan produktivitas dan kualitas tanaman dengan mengurangi kerugian yang disebabkan oleh organisme pengganggu tanaman (Artikelpendidikan.id, 2023).

5.2 Cara Kerja Mikroba Sebagai Agens Hayati

Mikroba sebagai agen hayati bekerja dengan berbagai cara, antara lain:

1. Sebagai **Parasit**: Mikroba sebagai agens hayati lain bertindak sebagai parasit, hidup dan berkembang pada mikroba patogen tumbuhan hingga menyebabkan kematian patogen tersebut.
2. **Sebagai Kompetitor**: Agen hayati bersaing dengan patogen tanaman untuk mendapatkan nutrisi, sehingga pertumbuhan patogen terhambat.
3. **Sebagai Agen Penghasil Antibiotik**: Mikroba memproduksi senyawa antimikroba/antibiotik yang menghambat pertumbuhan patogen tanaman.
4. **Sebagai Predator**: Beberapa mikroba menjerat mangsa secara langsung, seperti beberapa jamur yang mampu memerangkap nematoda patogen.
5. **Sebagai Patogen**: Mikroba ini merupakan Agen hayati yang menyebabkan penyakit pada hama, sehingga populasi hama berkurang.
6. **Penginduksi resistensi**: Beberapa agen hayati dapat merangsang tanaman untuk menghasilkan senyawa kimia yang meningkatkan ketahanan terhadap serangan hama dan penyakit.
7. **Sebagai promotor pertumbuhan**: Mikroba tertentu dapat membantu tanaman menyerap nutrisi lebih baik, sehingga pertumbuhan tanaman menjadi lebih optimal.

5.2.1 Keuntungan Menggunakan Mikroba dalam Perlindungan Tanaman

Penggunaan mikroba dalam perlindungan tanaman atau sebagai pengendali hayati, mempunyai berbagai keuntungan yang sangat signifikan dibanding penggunaan pestisida kimia. Keuntungan-keuntungan tersebut sebagai berikut:

1. Ramah lingkungan.
 - a. Tidak mencemari: Mikroba tidak meninggalkan residu yang berbahaya di produk tanaman maupun di tanah, air dan udara, sehingga tidak mencemari lingkungan.
 - b. Aman bagi organisme non target: Mikroba umumnya hanya menyerang organisme target (Hama dan patogen) tanpa membahayakan organisme lain yang bermanfaat seperti serangga penyerbuk dan predator alami.
2. Spesifikasi tinggi.

Menyerang target spesifik: Mikroba diaplikasikan untuk menyerang jenis hama atau patogen tertentu, sehingga lebih efektif dan tidak merusak organisme lain yang tidak menjadi target.

3. Berkelanjutan.
 - a. Meningkatkan kesehatan tanah: Penggunaan mikroba secara teratur membuat tanah lebih subur karena meningkatkan kandungan bahan organik, struktur tanah menjadi lebih gembur dan menyediakan nutrisi yang dibutuhkan tanaman untuk tumbuh subur.

- b. Mendorong keragaman hayati: Mikroba membantu menjaga keseimbangan ekosistem dengan mendukung pertumbuhan berbagai jenis organisme.

4. Mencegah Resistensi.

Sulit terbentuk resistensi: Hama dan penyakit lebih sulit dikembangkan resistensi terhadap mikroba dibandingkan dengan pestisida kimia. Hal ini karena mekanisme kerja mikroba seringkali melibatkan beberapa target yang berbeda pada organisme target.

5. Meningkatkan kualitas produk.

- a. Produksi lebih aman: Tanaman yang dilindungi dengan mikroba menghasilkan produk yang lebih aman dikonsumsi karena bebas dari residu pestisida.
- b. Meningkatkan nilai jual: Produk pertanian organik yang menggunakan pengendalian hayati seringkali nilai jualnya lebih tinggi di pasar.

6. Biaya Efektif dalam Jangka Panjang.

Penghematan biaya: Meskipun biaya awal penggunaan mikroba mungkin lebih tinggi, namun dalam jangka panjang dapat menghemat biaya karena tidak perlu membeli pestisida kimia secara terus-menerus.

7. Sinergi dengan Metode Pengendalian lain.

Peningkatan efektifitas: Mikroba dapat bekerja secara sinergis dengan metode pengendalian hama dan penyakit terpadu lainnya seperti kultur teknis dan fisik, sehingga meningkatkan efektivitas pengendalian.

8. Peningkatan Ketahanan Tanaman.

Induksi resistensi: Beberapa mikroba dapat merangsang tanaman untuk menghasilkan senyawa kimia yang meningkatkan ketahanan terhadap serangan hama dan penyakit.

9. Sesuai dengan Prinsip Pertanian Berkelanjutan

Menjaga kelestarian sumber daya alam: Penggunaan mikroba sejalan dengan prinsip pertanian berkelanjutan yang bertujuan untuk menjaga kelestarian sumber daya alam dan lingkungan.

10. Potensi Pengembangan Produk Baru.

Inovasi produk : Pengembangan produk berbasis mikroba terus berlanjut, membuka kesempatan untuk melahirkan inovasi produk yang lebih efektif dan spesifik.

5.2.2 Tantangan dan Pertimbangan Penggunaan Mikroba sebagai Agens Hayati

Hasil-hasil penelitian menunjukkan bahwa mikroba sangat menjanjikan sebagai agens pengendali hayati, namun demikian masih ada beberapa kelemahan dalam praktik penggunaannya (Soesanto, 2009). Adapun kelemahan-kelemahannya adalah sebagai berikut:

1. Efektivitas Terbatas oleh Faktor lingkungan.
 - a. Kondisi cuaca: Suhu, kelembaban dan curah hujan yang ekstrim dapat mempengaruhi aktivitas dan kelangsungan hidup mikroba.
 - b. Jenis tanah: Jenis tanah yang berbeda memiliki karakteristik fisik dan kimia yang berbeda pula,

sehingga dapat mempengaruhi pertumbuhan dan efektivitas mikroba.

- c. Radisasi matahari: Sinar matahari langsung dapat mematikan beberapa jenis mikroba, terutama jika formula tidak memberikan perlindungan yang cukup.

2. Waktu Kerja Relatif Lambat:

Mikroba membutuhkan waktu untuk berkembangbiak dan menginfeksi inang, Oleh karena itu, efek pengendalian organisme pengganggu tanaman (OPT) dengan mikroba seringkali lambat dibandingkan dengan pestisida kimia.

3. Spesifisitas yang Tinggi.

Mikroba biasanya hanya efektif terhadap jenis OPT tertentu, sehingga tidak dapat mengendalikan spektrum OPT yang luas dalam satu kali aplikasi.

4. Standarisasi Produksi Massal dan Kualitas.

Produksi massal dengan kualitas yang terstandar masih menjadi tantangan. Proses produksi yang kompleks dan biaya yang relatif tinggi menjadi kendala utama.

5. Penyimpanan dan Distribusi.

Mikroba hidup memiliki umur simpan yang terbatas dan membutuhkan kondisi penyimpanan yang khusus. Distribusi ke daerah yang jauh juga menjadi tantangan tersendiri.

6. Efikasi Aplikasi.

Cara aplikasi mikroba harus dilakukan secara cermat untuk mencapai hasil maksimum. Kesalahan

dalam aplikasi, seperti dosis yang salah atau waktu aplikasi yang tidak tepat, dapat mengurangi efektivitasnya.

7. Biaya.

Biaya produksi dan aplikasi mikroba masih relatif lebih tinggi dibandingkan dengan pestisida kimia, terutama untuk skala kecil.

8. Ketersediaan.

Ketersediaan produk mikroba di pasaran masih terbatas, terutama di daerah-daerah tertentu.

9. Pengetahuan Petani.

Banyak petani belum memahami konsep penggunaan mikroba.

5.2.3 Arah Pengembangan Kedepan

Beberapa upaya yang dapat diambil sebagai langkah pengembangan pemanfaatan mikroba kedepannya adalah sebagai berikut:

1. Penelitian Lebih Lanjut.

Terus melakukan penelitian untuk menemukan jenis mikroba baru yang lebih efektif dan mengembangkan formulasi yang lebih baik.

2. Peningkatan Produksi Massal.

Mengembangkan teknologi produksi massal mikroba yang efisien dan berbiaya rendah.

3. Standarisasi.

Membangun standar produksi dan aplikasi mikroba sebagai agen hayati.

4. Sosialisasi.

Melakukan sosialisasi kepada petani mengenai manfaat dan cara penggunaan mikroba sebagai agen hayati.

5.3 Contoh-Contoh Mikroba yang Digunakan Sebagai Agen Pengendali Hayati

Di Indonesia penggunaan mikroba sebagai agen hayati sudah banyak dilakukan petani. Beberapa mikroba agen hayati sudah mampu dikembangkan oleh petani baik dari jenis jamur, bakteri, virus maupun nematoda, bahkan beberapa sudah diproduksi secara pabrikan.

5.3.1 Agen Hayati dari Golongan Jamur

Banyak sekali hasil penelitian tentang jamur yang sudah berhasil diisolasi dan diujikan sebagai agens hayati terhadap OPT. Jamur-jamur tersebut antara lain:

1. ***Trichoderma spp.***: *T. harzianum*, *T. pseudokoningii*, *T. asperllium* spesifik Sultra mampu menurunkan tingkat penyakit busuk buah kakao akibat serangan *Phytophthora palmivora* (Baharudin & Asaad, 2017). *T. viridae*, *T. harzianum*, *Paecilomyces* dan *Bacillus subtilis* dapat menurunkan intensitas penyakit jamur akar putih (*Rigiporus microporus*) pada tanaman karet yang belum menghasilkan sebesar 18,33% sampai 23,33% (Kusdiana et al, 2015). *T. virens*, *T. hamatum*, *T. amazonicum* mempunyai kemampuan daya hambat pada jamur *R. microporus* (Amaria et al, 2015). *T. harzianum* dan *T. koningii* (biofungisida Marfu P produk PPKS) digunakan untuk mengendalikan jamur

penyebab busuk pangkal batang kelapa sawit (*Ganoderma boninense*)(Debataraja, 2021). PPK sudah menghasilkan biofungisida Triko SP plus dan Trico Combi (Spora *T. harzianum*, *T. virens*, *T. Koningii* dan *T. viridae*) yang dipakai untuk mengendalikan jamurakar putih pada tanaman karet. (Katalog tekonologi; Produk dan Jasa PT RPN, 2021). *Trichoderma* sp. Juga mampu menekan jamur aptogen yang berasosiasi dengan tanaman tomat yaitu *Fusarium* sp., *Sclerotium* sp., *Helminthosporium* sp. dan *Colletotrichum* sp. (Asniah et al, 2021).

2. ***Gliocladium* sp.:** Jamur ini terbukti efektif dalam menghambat pertumbuhan berbagai jenis patogen tanaman. Seperti *Ganoderma boninense* (Simbolon, 2024) dan *Cylindrocladium* sp (Angraeni et al, 2009). *G. fibriatum* efektif menghambat pertumbuhan *Marasmius palmivorus* Sharples (Sitompul, 2013). *G. virens* juga mampu menghambat kolono jamur *Botryodiplodia theobromae*, dan *Phytophthora citrophthora* (Retnosari, 2011).
3. *Paecilomyces* sp.: Jamur ini berpotensi sebagai pengendali hayati untuk menekan keparahan penyakit blas dengan meningkatkan ketahanan pada padi gogo(Botek et al, 2020).
4. ***Beauvaria bassiana* (Bb):** Bb dapat menginfeksi dan menyebabkan kematian wereng, walang sangit, belalang, tubuhnya diselimuti hifa (Sari et al, 2018).
5. ***Metarhizium* sp. :** *M. anisopliae* dan *M. majus* dalam produk Metariib dari PPBBI digunakan untuk mengendalikan hama *Oryctes rhinoceros* pada tanaman kelapa sawit (Katalog Produk PT RPN, 2021).

6. ***Purpureocillium lilacinum***: Jamur ini dapat mengendalikan beberapa species nematoda parasit tanaman, terutama nematoda akar simpul (*Meloidologi javanica* dan *M. incognata* serta nematoda sista kentang (*Globodera rostochiensis*) (Rigobelo et al, 2024).
7. **Beberapa jamur** yang berpotensi mengendalikan jamur akar putih pada tanaman karet anata lain jamur rizhosfer dan jamur endofit. Jamur rizhosfer tersebut seperti *T. amazonicum*, *Penicillium pinophilum*, *Paecilomyces lilacinus*, *Aspergillus fijiensis* sedangkan jamur endofit seperti *Eupenicillium javanicum*, *P. simplicissimum*, *P. citrinum* dan *Hypocrea atriviridis* (Amaria et al, 2013).

5.3.2 Agens Hayati dari Golongan Bakteri

1. ***Bacillus spp***: *B. thuringiensis* (Bt) mampu mengendalikan ulat jengkal (*Hyposidra talaca*) pada tanaman teh sampai 37,5% (Widiastuti et al, 2019). *B. subtilis*, *B. pumilis*, *B. licheniformis* dan *B. amyloliquefaciens*, telah diimplementasikan untuk mengendalikan penyakit-penyakit yang disebabkan oleh jamur. Metabolit dari genus *Bacillus* mempunyai spektrum yang luas untuk mengendalikan banyak patogen dan kemampuan yang tinggi untuk membentuk endospora. *B. subtilis* mampu mengendalikan *Pseudomonas syringae* pada akar arabidopsis (Bais et al, 2004).
2. ***Pseudomonas sp.***: *P. fluorescens* mampu menekan bakteri *Xanthomonas sp.* Penyakit blas pada tanaman

padi (Larasty et al, 2020). Bakteri ini mampu mengendalikan *Alternaria porii* penyebab penyakit ungu pada bawang merah (Laksono et al, 2021).

3. ***Chryseobacterium nematophagum***: dapat mengendalikan nematoda *Haemonchus contortus* dan *Oatertagia ostertagi* (Page et al, 2019).

5.3.3 Agen Hayati dari Golongan Virus.

Beberapa penelitian tentang pemanfaatan virus sebagai agens hayati telah banyak dilakukan anatara lain:

1. ***Mikovirus Rhizoctonia solani partitivirus 2 (RsPV2)***: Mikovirus tersebut mampu menekan laju pertumbuhan koloni *Rhizoctonia solani* penyebab penyakit hawar pelepah padi (Zheng et al, 2014).
2. ***Fusarium graminearum Virus Isolat China-9 (FgV-ch9)***: Virus ini menyebabkan hivovirulen pada *F. graminearum* Darissa et al, 2012).
3. ***Mycoreovirus-3 (MyRV-3)***: Virus ini dapat digunakan sebagai agen pengendali hayati untuk mengatasi penyakit yang disebabkan oleh jamur *Rosellinia necatrix*.
4. ***Sclerotinia sclerotiorum Hypovirusnsnce-Assosated DNA virus1 (SsHADV-1)***: Partikel ini terbukti efektif dalam mencegah mengurangi kerusakan tanaman yang disebabkan oleh *S. sclerotiorum* (Yu et al, 2010 dan 2013).
5. ***Cryphonectria hypovirus 1 (CHV-1)***: Virus inidiguakan sebagai agen hayati untuk mengendalikan pertumbuhan jamur *Cryphonectria parasitica* yang menyebabkan penyakit hawar kastanye (*Catanea dentata*).

6. **Mycoreovirus 1 (MyRV-1)**: Virus ini mampu menekan penyakit hawar kastanye.
7. **Baculovirus**: *Granulovirus* tertentu dari golongan baculovirus digunakan untuk mengendalikan ngengat codling yang larvanya merupakan hamatanaman buah apel dan pir. *Virus Pliyherosis nuklir* (NPV) adalah jenis lain dari bacilovirus yang dapat mengendalikan larva dari ngengat daun kupu-kupu, juga mengendalikan larva daun kapas Afrika (*Spodoptera littoralis*).
8. Isolasi-isolasi mikovirus sudah mulai dirintis oleh peneliti-peneliti di Indonesia pada isolat jamur *Fusarium*, *Rhizoctonia*, *Collethotrichum* serta jamur-jamur patogen tular tanah lainnya (Supyani, 2017).

5.3.4 Agen Hayati dari Golongan Nematoda:

Penelitian tentang pemanfaatan nematoda sebagai agens hayati untuk mengendalikan hama sudah banyak dilakukan di Indonesia. Ada dua jenis entomopatogen nematoda (EPNs) yang merupakan nematoda bakteriofora yang sudah dikenal mampu mengendalikan hama tanaman, yaitu:

1. **Steinernema spp.**; Jenis nematoda ini mampu mengendalikan larva *Spodoptera exigua* (Sunarto et al, 2023).
2. **Heterorhabditis spp**: Rtasin H indicus INA 4 terbukti efektif dalam menghambat perkembangan penggerek batang padi putih (*Scirpophaga innotata*) (Chaerani dan Nurbaeti, 2006). Di Inggris, *Heterorhabditis* mampu mengendalikan kumbang anggur (*Otiorynchus sulcatu*) pada akar strawberry.

5.4 Fungsi Lainnya Dari Mikroba Untuk Meningkatkan Ketahanan Tanaman

Ketahanan tanaman dapat diinduksi dengan kesuburan tanah dan kemampuan tumbuhan untuk menyerap unsur hara yang tersedia di tanah/alam. Ketahanan tanaman juga dapat diinduksi oleh organisme yang berinteraksi langsung dengan tanaman tersebut. Berikut fungsi mikroorganisme sebagai biofertilizer dan bioremediasi lahan serta menginduksi tanaman untuk menghasilkan metabolit sekunder.

5.4.1 Biofertilizer

Biofertilizer adalah pupuk organik yang mengansdung mikroorganisme hidup yang mampu memfiksasi Nitrogen, melarutkan Fosfat atau menghasilkan hormon pertumbuhan tanaman. Beberapa contoh mikroba yang umum digunakan sebagai biofertilizer:

1. **Rhizobium:** Rizobium merupakan bakteri yang bersosiasi dengan akar tanaman legum, membentuk simbisis mutualisme. Bakteri ini memiliki kemampuan untuk memfiksasi Nitrogen dari udara menjadi Nitrogen yang dapat dimanfaatkan tanaman sehingga meningkatkan kesuburan tanah dan mengurangi ketergantungan pada pupuk Nitrogen sintetik.
2. **Azotobacter:** Bakteri bebas hidup di tanah dan mampu memfiksasi Nitrogen secara langsung. Walaupun efisiensinya lebih rendah dari pada Rhizobium, azotobacter tetap memberikan kontribusi dalam meningkatkan kandungan Nitrogen tanah.
3. **Mycorrhiza:** Jamur mikroskopis yang membentuk simbiosis dengan akar tanaman. Mychorriza membantu tanaman menyerap air dan nutrisi dari

tanah, terutama Fosfor, sehingga meningkatkan pertumbuhan tanaman.

4. **Bacillus:** Genus bakteri yang banyak mempunyai species yang bermanfaat bagi tanaman, seperti *Bacillus subtilis* dan *B. megaterium*. Bakteri ini mampu menghasilkan hormon pertumbuhan tanaman, zat pengatur tumbuh dan antibiotik alami yang dapat melindungi tanaman dari patogen.

5.4.2 Bioremediasi Lahan

Bioremediasi adalah proses pembersihan lingkungan yang tercemar menggunakan mikroorganisme. Mikroba tertentu memiliki kemampuan untuk mendegradasi atau mengubah polutan organik maupun anorganik menjadi senyawa yang kurang berbahaya atau bahkan menjadi biomassa. Contoh mikroba yang digunakan dalam bioremediasi antara lain:

1. **Pseudomonas:** Bakteri genus *Pseudomonas* memiliki kemampuan untuk mendegradasi berbagai macam senyawa organik, termasuk hidrokarbon, pestisida, dan senyawa aromatik. *Pseudomonas* juga dapat menghasilkan biosurfaktan yang membantu dalam proses bioremediasi.
2. **Bacillus:** Selain berfungsi sebagai biofertilizer, beberapa spesies *Bacillus* juga memiliki kemampuan untuk mendegradasi polutan organik, seperti minyak bumi dan senyawa aromatik.
3. **Fungi:** Beberapa jenis jamur, seperti jamur putih (*Pleurotus ostreatus*) dan jamur tiram (*P. eryngii*), dapat mendegradasi lignin dan selulosa dalam limbah pertanian dan industri. Promi merupakan bioproduk

yang diformulasikan dengan kandungan *Trichoderma harzianum*, *T. pseudokoningii* dan *Aspergillus* sp. Produk ini dirancang untuk mempercepat proses penguraian limbah organik (Katalog Teknologi Produk PT RPN, 2021).

4. **Actinomycetes:** Kelompok bakteri yang menghasilkan antibiotik dan enzim yang dapat mendegradasi senyawa organik kompleks, seperti pestisida dan hidrokarbon.

5.4.3 Mikroba Induksi Ketahanan Tanaman.

Induksi ketahanan tanaman adalah proses di mana tanaman rangsang untuk melawan serangan penyakit atau hama secara alami. Proses ini terjadi ketika tanaman berinteraksi dengan mikroorganisme tertentu, yang kemudian merangsang sistem pertahanan tanaman. Mekanisme induksi ketahanan yang terjadi sangat kompleks, tetapi secara umum melibatkan beberapa proses. Mikroba menghasilkan senyawa-senyawa yang dapat merangsang produksi senyawa pertahanan pada tanaman, seperti fitoaleksin, enzim hidrolitik, dan senyawa fenolik. Mikroba dapat memicu perubahan pada sistem imun tanaman, sehingga tanaman menjadi lebih responsif terhadap serangan patogen. Beberapa mikroba yang umum digunakan sebagai induktor ketahanan tanaman adalah:

1. **Pseudomonas:** Genus bakteri ini sangat beragam dan banyak spesiesnya yang memiliki kemampuan untuk memproduksi senyawa antibakteri dan antifungal.
2. **Bacillus:** Bakteri ini juga menghasilkan berbagai senyawa bioaktif yang dapat menginduksi ketahanan

tanaman, serta senyawa yang dapat mengendalikan pertumbuhan patogen.

3. **Trichoderma:** Jamur ini merupakan parasit alami bagi banyak patogen tanaman. Selain itu, *Trichoderma* juga menghasilkan senyawa yang dapat merangsang pertumbuhan tanaman.
4. **Rhizobium:** Meskipun dikenal sebagai fiksator nitrogen, beberapa spesies *Rhizobium* juga memiliki kemampuan untuk menginduksi ketahanan tanaman.

DAFTAR PUSTAKA

- Amaria, W., Harni, R., & Samsudin. (2015). Evaluasi jamur antagonis dalam menghambat pertumbuhan *Rigidoporus microporus* penyebab penyakit jamur akar putih pada tanaman karet. *J. TIDP*, 2(1): 51–60.
- Amaria, W., Taufiq, E., & Rita, H. (2013). Seleksi dan identifikasi jamur antagonis sebagai agens hayati jamur akar putih *Rigidoporus microporus* pada tanaman karet. *Journal of Industrial and Beverage Crops*, 4(1): 55–64.
<https://doi.org/10.21082/JTIDP.V4N1.2013.P55-64>
- Anggraeni, I., & Wibowo, A. (2009). Pengendalian *Cylindrocladium* sp. penyebab penyakit lodoh pada bibit *Acacia mangium* Wild. dengan fungi antagonis *Trichoderma* sp. dan *Gliocladium* sp. *Jurnal Penelitian Hutan Tanaman*, 6(4): 241–249.
<https://doi.org/10.20886/JPHT.2009.6.4.241-249>
- Asniah, A., Wahyuni, W., & Taufik, M. (2021). Daya hambat *Trichoderma* sp. terhadap patogen yang berasosiasi dengan daun tanaman tomat (*Lycopersicum esculentum* MILL.s). *Jurnal Ilmiah Membangun Desa dan Pertanian*, 6(4): 144.
<https://doi.org/10.37149/JIMDP.V6I4.21761>
- Baharudin, & Asaad, Muh. (2017). Efektifitas pengendalian *Phytophthora palmivora* dengan agensia hayati terhadap peningkatan produktivitas kakao. *E-Journal Menara Perkebunan*, 85(1): 9–18.
<https://doi.org/10.22302/IRIBB.JUR.MP.V85I1.230>

- Bais, H. P., Fall, R., & Vivanco, J. M. (2004). Biocontrol of *Bacillus subtilis* against infection of arabidopsis roots by *Pseudomonas syringae* is facilitated by biofilm formation and surfactin production. *Plant Physiology*, 134(1): 307–319.
<https://doi.org/10.1104/PP.103.028712>
- Botek, M. (2020). Pengaruh *Paecilomyces* sp. pada berbagai bahan organik terhadap ketahanan dan produksi padi gogo. *Jurnal Agercolere*, 2(2): 30–36.
<https://doi.org/10.37195/JAC.V2I2.9>
- Chaerani, & Nurbaeti, B. (2006). Efektifitas nematoda patogen serangga (Rhabditida: Steinernema dan Heterorhabditis) terhadap penggerek batang padi putih (*Scirpophaga innotata*). *Jurnal Perlindungan Tanaman Indonesia*, 12(2): 92–103.
- Darissa, O., Adam, G., & Schäfer, W. (2012). A dsRNA mycovirus causes hypovirulence of *Fusarium graminearum* to wheat and maize. *European Journal of Plant Pathology*, 134(1): 181–189.
<https://doi.org/10.1007/S10658-012-9977-5>
- Debataraja, C. O. (2021). Prospek penggunaan agensia hayati dalam mewujudkan perkebunan berkelanjutan di Indonesia. *Opini dan Analisis Perkebunan*, 2 (1): 1–5.
- Good Doktor ID. (2023). Bagaimana Peranan Dekomposer Dalam Ekosistem. <https://gooddoctor.id/pendidikan/bagaimana-peranan-dekomposer-dalam-ekosistem/>

- Jekti,D.S.D. (2018). Peranan Mikroba dalam Pengelolaan Lingkungan. Prosiding Seminar Nasional Pendidikan Biologi, 1–9. <http://jurnalfkip.unram.ac.id/index.php/SemnasBIO/article/view/585>
- Katalog Teknologi: Produk dan Jasa PT RPN. 2021
- Kusdiana, A. P., Munir, M., & Suryaningtyas, H. (2015). Pengujian biofungisida berbasis mikroorganisme antagonis untuk pengendalian penyakit jamur akar putih pada tanaman karet. *Indonesian Journal of Natural Rubber Research*, 33(2): 143–156. <https://doi.org/10.22302/PPK.JPK.V33I2.179>
- Laksono, A., Sunaryono, J. G., & Despita, R. (2021). Uji antagonis *Pseudomonas fluorescens* untuk mengendalikan penyakit bercak ungu pada tanaman bawang merah. *Agrovigor: Jurnal Agroekoteknologi*, 14(1): 35–40. <https://doi.org/10.21107/agrovigor.v14i1.8327>
- Larasaty, S., Mukarlina, M., & Kurniatuhadi, R. (2020). Uji antagonis *Pseudomonas flourescens* spp. terhadap isolat Bakteri *Xanthomonas* (SL3) dari daun padi bergejala hawar di Kabupaten Kubu Raya. *JURNAL BIOS LOGOS*, 11(1): 13. <https://doi.org/10.35799/JBL.11.1.2021.30998>
- Page, A. P., Roberts, M., Félix, M. A., Pickard, D., Page, A., & Weir, W. (2019). The golden death bacillus *Chryseobacterium nematophagum* is a novel matrix digesting pathogen of nematodes. *BMC Biology*, 17(1). <https://doi.org/10.1186/s12915-019-0632-x>

- Retnosari, E. (2011). Identifikasi Penyebab Busuk Pangkal Batang Jeruk (*Citrus* spp.) Serta Uji Antagonisme In-Vitro dengan *Trichoderma harzianum* dan *Gliocladium virens*. Skripsi. Fakultas Pertanian, Institut Pertanian Bogor.
- Rigobelo, E. C., Nicodemo, D., Babalola, O. O., & Desoignies, N. (2024). *Purpureocillium lilacinum* as an agent of nematode control and plant growth-promoting fungi. *Agronomy*, 14(6). <https://doi.org/10.3390/AGRONOMY14061225>
- Sari, E., Flatian, A. N., Sari, Z. I., & Sulaeman, E. (2019). Isolasi dan karakterisasi Rhizobium dari *Glycine max* L. dan *Mimosa pudica* Linn. *EKOTONIA: Jurnal Penelitian Biologi, Botani, Zoologi dan Mikrobiologi*, 3(2): 55–62. <https://doi.org/10.33019/EKOTONIA.V3I2.760>
- Simbolon, E. 2024. Seleksi Isolat Gliocladium spp. Sebagai Kandidat Agens Antagonis *Gnaoderma boninense* Penyebab Penyakit Busuk Pangkal Batang Kelapa Sawit secara In vitro
- Sitompul, S. K. (2013). Evaluasi Keefektifan Penghambatan Beberapa Agens Biokontrol Terhadap Pertumbuhan *Marasmius palmivorus* Sharples. Skripsi. Fakultas Pertanian, Institut Pertanian Bogor.
- Soesanto, L. (2008). Pengantar Pengendalian Hayati Penyakit Tanaman: Peluang dan Tantangan dalam Menunjang Ketahanan Pangan Berkelanjutan. PT Raja Grafindo: Jakarta.

- Sunarto, T., Natawigena, W. D., Irwan, A. W., & Tyas, W. W. (2023). Effectiveness of several concentrations of entomopathogenic nematode (*Steinernema* spp.) on mortality of *spodoptera exigua* hub in onions. *CROPSAVER: Journal of Plant Protection*, 6(1): 49. <https://doi.org/10.24198/CROPSAVER.V6I1.46681>
- Supyani. (2017). Mikovirus, pengembangannya sebagai agens pengendali hayati. *Jurnal Perlindungan Tanaman Indonesia*, 21(1): 1–9. <https://doi.org/10.22146/jpti.17874>
- Susilawati, S., Audia, M., & Agustin, N. R. (2023). Peranan mikrobiologi dalam pengelolaan lingkungan (Studi tentang mikro organisme di lingkungan alamiah). *Jurnal Sains dan Teknologi*, 3(2): 359–363. <https://doi.org/10.47233/JSIT.V3I3.1186>
- Tirtana, A. (2024). Mikroba Tanah, Peran Mikroorganisme dalam Kesehatan Tanaman. <http://ari.blog.uma.ac.id/2024/01/31/mikroba-tanah-peran-mikroorganisme-dalam-kesehatan-tanaman/>
- Widiastuti, H., Panji, T., Yusup, C. A., Rusmana, I., & Wahyono, T. E. (2019). Formulasi bioinsektisida *Bacillus thuringiensis* isolat indigenos untuk pengendalian *Hyposidra talaca* pada tanaman teh. *E-Journal Menara Perkebunan*, 87(1). <https://doi.org/10.22302/IRIBB.JUR.MP.V87I1.329>

- Yu, X., Li, B., Fu, Y., Jiang, D., Ghabrial, S. A., Li, G., Peng, Y., Xie, J., Cheng, J., Huang, J., & Yi, X. (2010). A Geminivirus-related DNA Mycovirus That Confers Hypovirulence to a Plant Pathogenic Fungus. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 107(18): 8387–8392.
<https://doi.org/10.1073/PNAS.0913535107>
- Yu, X., Li, B., Fu, Y., Xie, J., Cheng, J., Ghabrial, S. A., Li, G., Yi, X., & Jiang, D. (2013). Extracellular Transmission of a DNA Mycovirus and Its Use as a Natural Fungicide. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 110(4): 1452–1457.
<https://doi.org/10.1073/PNAS.1213755110>
- Zheng, L., Zhang, M., Chen, Q., Zhu, M., & Zhou, E. (2014). A novel mycovirus closely related to viruses in the genus Alphapartitivirus confers hypovirulence in the phytopathogenic fungus *Rhizoctonia solani*. *Virology*, 456–457(1):220–226.
<https://doi.org/10.1016/J.VIROL.2014.03.029>

BAB 6

TEKNOLOGI DAN INOVASI DALAM PERLINDUNGAN TANAMAN

Oleh Encik Akhmad Syaifudin

6.1 Pendahuluan

Perlindungan tanaman memiliki peran penting dalam pertanian, yaitu tindakan bersistem dalam rangka meminimumkan magnitudo gangguan jasad pengganggu tanaman dengan cara mencegah, mengendalikan, mengelola, serta memusnahkan. Cara untuk mencegah jasad pengganggu tanaman dapat masuk ke dalam teritori wilayah maupun negara dengan menerbitkan aturan undang-undang-undang yang seperti di Indonesia dengan Undang-undang Karantina Hewan, Ikan dan Tumbuhan no 21 tahun 2019, Peraturan Pemerintah tentang Karantina Hewan, Ikan dan Tumbuhan no 29 Tahun 2023 serta diimplementasikan melalui institusi Karantina Tumbuhan yang umumnya memiliki stasiun di sekitar pelabuhan, maupun bandara. Tupoksi Karantina Hewan dan Tumbuhan adalah yaitu berupa Upaya pencegahan masuk dan tersebarnya Hama Penyakit Hewan Karantina (HPHK) serta Jasad Pengganggu Tumbuhan Karantina (JPTK), yang di lain pihak juga mengawasi lalu melakukan pengendalian keamanan serta

mutu pangan bagi manusia, lalu bagi hewan ternak adalah keamanan dan mutu pakan, Termasuk di dalamnya mengawasi dan mengendalikan produk rekayasa genetika, sumber daya genetik, agensia hayati, jenis asing invasif, tumbuhan dan satwa liar, serta tumbuhan dan satwa langka (<https://www.bkp-kupang.or.id/konten/detail/karantina-hewan-dan-tumbuhan>).

Pengendalian jasad pengganggu tanaman (JPT) adalah rangkaian tindakan untuk mengurangi atau mencegah kerusakan pada tanaman yang disebabkan oleh organisme seperti hama, penyakit, dan gulma. Teknik pengendalian melibatkan berbagai metode, di antaranya dengan cara fisik/mekanik, cara budidaya, cara biologis, dan cara kimiawi. Pengendalian fisik meliputi Manipulasi suhu (Régnière et al., 2012), yang terdiri atas penggunaan panas baik secara langsung misalnya menggunakan api yang membakar gulma, maupun penggunaan panas yang dibangkitkan dengan cahaya matahari diubah oleh plastik transparan dan lengas tanah sebagai penghantar (Hamdani & Susanto, 2020), penggunaan panas, uap air panas, penggunaan udara panas dapat untuk mengendalikan pathogen tular tanah, serangga hama dan propagule gulma (Braun & Supkoff, 1994) sementara pengendalian mekanik dapat berupa memungut hama atau gulma secara langsung dari tanaman, menggunakan perangkap cahaya, feromon, atau perangkap lem untuk menangkap serangga, memotong bagian tanaman yang terserang hama atau penyakit, mengganti jenis tanaman yang ditanam secara berkala untuk memutus siklus hidup hama, serta membersihkan area pertanaman dari sisa-sisa tanaman, gulma, atau hama.

Perkembangan berikutnya, agen hayati seperti bakteri *Bacillus thuringiensis* untuk mematikan hama mulai diperankan (BTgen.pdf (orst.edu). Bt adalah bakteri yang ditemukan secara alami di tanah di seluruh dunia. Untuk bereproduksi, Bt membentuk spora yang tumbuh menjadi bakteri baru. Spora Bt memiliki protein yang beracun bagi larva serangga saat dimakan. Karena Bt berasal dari sumber alami, maka Bt disebut biopestisida. Secara umum, biopestisida cenderung menimbulkan risiko yang lebih kecil daripada pestisida buatan manusia pada umumnya. *Bacillus thuringiensis* dapat dianggap sebagai bakteri promosi pertumbuhan tanaman baru yang menjanjikan yang secara bersamaan bertindak melawan fitopatogen dan hama serangga di bidang pertanian (Gomis-Cebolla, 2023). Strain *Bacillus thuringiensis* HA dapat secara efektif mengurangi kerusakan karena kumbang sawit merah pada pohon palem dan tebu dengan mengendalikan serangga secara efektif (Pu, et al, 2017) Selain hama serangga, Filtrat bebas sel *Bacillus thuringiensis* secara efektif menekan layu bakteri pada tanaman tomat dengan menginduksi ekspresi gen terkait pertahanan dan mengurangi pertumbuhan patogen di jaringan batang (Hyakumachi et al., 2013)

6.2 Teknologi Perlindungan Tanaman

Munculnya serangan serangga hama maupun pathogen yang menyerang tanaman menjadi penyadar dan penanda dimulainya sejarah perlindungan tanaman. Salah satu penyakit tanaman yang paling merusak di Eropa pada masanya adalah penyakit hawar daun kentang akibat serangan jamur *Phytophthora infestans* pada 1840an

(Patogen Kelaparan Kentang Irlandia Memicu Wabah di 6 Benua | Berita Negara Bagian NC (ncsu.edu). Untuk mengatasi masalah ini, para petani melakukan berbagai percobaan, dan akhirnya menemukan dua jenis fungisida sederhana yang sangat efektif, yaitu Bubur Bordeaux (BB), yang dibuat dari campuran senyawa $CuSO_4$ dengan CaO . Dikenal pula Bubur California (BC) yaitu campuran $CuCO_3$ dengan NH_4 , di mana baik BB Bubur California (BC) sangat ampuh mengendalikan penyakit tanaman, wabilkhusus penyakit yang disebabkan oleh jamur (Wahyuni et al., 2023).

Pasca Perang Dunia II muncul penggunaan suatu senyawaan organoklorin yaitu *Dichloro Di-phenyl Trichlor Ethane* (DDT), yang dalam sejarahnya efektif membasmi nyamuk malaria (*Anopheles*), karena diketahui bahwa nyamuk ini adalah vektor parasit *Plasmodium*, suatu genus protozoa yang menyebabkan malaria pada burung, reptil, dan mamalia, termasuk manusia. Spesies nyamuk rawa yang paling terkenal yang menularkan *Plasmodium falciparum*, parasit malaria yang membunuh manusia. (*Anopheles* - Wikipedia akses 11 Sept 2024). Tifus, kutu tubuh, dan wabah pes bubo diketahui juga dibasmi oleh senyawa DDT secara signifikan. Kasus malaria di Italia dan Amerika Serikat pada tahun 1946 hingga 1950 secara signifikan dapat reda dengan penggunaan DDT (Turusov et al., 2002 ; (Mansouri, et al., , 2017). Setelah munculnya DDT yang dipandang sukses mengatasi problema lingkungan Kesehatan, segera dimanfaatkan untuk mengatasi hama pada tanaman pangan yang saat itu sedang dalam peningkatan produksi mengingat ada permintaan yang besar untuk kebutuhan pangan penduduk dunia yang dikenal sebagai Revolusi hijau (*Green Revolution*). Di masa Orde

Baru, segenap bangsa Indonesia dikenalkan Revolusi Hijau untuk program pembangunan pedesaan. Revolusi Hijau merupakan Pembangunan Nasional yang fokus terhadap sektor pertanian, dengan mengubah Teknik Bertani dari tradisional ke modern, yang kemudian di-Indonesiakan menjadi Panca Usaha. Terjadi perubahan mendasar akibat modernisasi di bidang pertanian ini, baik dari segi bahan, alat dan kelengkapan bertani, maupun pola hidup dan kultur masyarakat pedesaan. Pertanian Tradisional yang dulunya senantiasa berbasis Spesifik Lokasi seperti benih unggul lokal, penggunaan pupuk kompos, dan pupuk kandang, peralatan yang mengandalkan bentuk-bentuk dengan penghela mekanis seperti hewan kerbau atau sapi, telah berubah ke benih unggul nasional hasil perakitan balai penelitian atau Perusahaan benih, penggunaan alat-alat pertanian yang canggih, penggunaan irigasi modern, alat mesin pertanian (alsintan), penggunaan pupuk serta pestisida. Pelan namun pasti, terjadi sikap sosial dan budaya dalam kehidupannya (Gultom & Harianto, 2021). Panca usaha telah menghantarkan peningkatan produksi padi di Indonesia, dan telah dicatat dalam sejarah bahwa Presiden Soeharto telah menerima penghargaan FAO di Roma karena keberhasilannya menghantar Indonesia swasembada pangan pada 1984. Selain paket teknologi yang diberikan yaitu berupa benih padi unggul, pupuk N P K, Pestisida khususnya insektisida, paket irigasi, dan perbaikan cara-cara bercocok tanam, Soeharto melakukan manajemen Panca Usaha dengan melibatkan seluruh para pihak yang terlibat untuk memastikan keberhasilannya.

Praktek pelaksanaan Panca Usaha senantiasa memperhatikan jadwal, seperti saat persiapan lahan sawah, pembibitan, penanaman, pemupukan, pemeliharaan, pemberian air irigasi, persiapan panen, pelaksanaan panen, serta pascapanen. Untuk menjaga momentum itu maka dibuat jadwal penyemprotan hama serangga, pemberian umpan tikus dan sebagainya, untuk menghindari turunnya hasil panen padi akibat serangan hama, dan untuk sementara momentum ini tetap terjaga untuk menghasilkan panen padi yang diharapkan. Namun demikian besarnya momentum ini tidak cukup kuat melawan pemikiran dan kesadaran tentang pentingnya arti kesehatan serta lingkungan hidup yang lestari, tatkala hadir buku *Silent Spring* (Musim Semi Yang Sunyi) tulisan Carson (1962). Isi buku ini langsung menggugah pikiran banyak pembaca dan menyadarkan, karena penulis menganggap terjadi sebuah kemalangan karena seharusnya pada musim semi kota-kota ramai dengan berbagai suara makhluk hidup di alam, kini telah berubah sunyi, karena ada yang membungkam suara-suara musim semi itu. Secara ilmiah dapat disebutkan bahwa sejak digunakannya DDT sebagai pembasmi nyamuk maka terjadi perbesaran daya peracunan secara biologis mengikuti rantai atau jejaring makanan di mana serangga dimakan oleh pemangsa di atasnya, dan terus berlanjut hingga pemangsa akhir.

Dengan meningkatnya kesadaran tentang Kesehatan dan lingkungan hidup, praktek perlindungan tanaman bergeser dari yang semula sistem penyemprotan serangga hama yang terjadwal dengan pestisida kemudian berubah menggunakan besaran ambang ekonomi pengendalian untuk memberikan penilaian bagi dibenarkannya

penggunaan pestisida. Ambang ekonomi pengendalian yaitu Kepadatan populasi hama tertentu di mana harus diambil langkah-langkah pengendalian untuk mencegah peningkatan populasi hama mencapai tingkat cedera ekonomi (Weersink et al., 1991) Pengendalian dengan pembatasan penggunaan pestisida, mendorong pengarus-utamaan budidaya tanaman yang sehat serta pemanfaatan agensia pengendali lokal seperti serangga musuh alami dan dikenal dengan pengendalian / pengelolaan jasad pengganggu tanaman terpadu (PJPT)

Praktik Pengelolaan jasad pengganggu tanaman terpadu (PJPT) telah terbukti meningkatkan hasil panen secara signifikan sekaligus mengurangi penggunaan pestisida. Misalnya, sebuah studi di 85 proyek PJPT di Asia dan Afrika melaporkan peningkatan hasil rata-rata dan penurunan penggunaan pestisida dari tingkat dasar (Pretty, J., & Bharucha, 2015). Temuan serupa diamati di pertanian sayuran petani kecil di Nepal, di mana praktik PJPT menghasilkan hasil yang lebih tinggi dan mengurangi semprotan pestisida (Paudel et al., 2020). Peran PJPT dalam mengurangi kerugian tanaman dan meningkatkan produktivitas juga disoroti dalam berbagai penelitian, menekankan potensinya untuk meningkatkan ketahanan pangan dan profitabilitas pertanian (Nwilene & Nwanze, 2008; Razaq, & Shah, 2019; Angon, et al., 2023)

Penggunaan pupuk dan pestisida secara signifikan mempengaruhi hasil panen. Di negara-negara seperti Rumania dan Hongaria, ada korelasi yang kuat antara penggunaan pupuk dan hasil gandum, meskipun dampak pestisida bervariasi (Tudor et al., 2023). Menurut Rempelos

et al., (2023). Metode pemupukan konvensional umumnya menghasilkan hasil yang lebih tinggi dibandingkan dengan metode organik, sementara metode organik dapat meningkatkan kualitas nutrisi dan mengurangi konsentrasi logam beracun pada tanaman. Pergeseran ke arah sistem tanam mineral ke ekologis bertujuan untuk menghilangkan produk perlindungan tanaman sintetis kimia, sehingga meningkatkan kinerja lingkungan dan jasa ekosistem (Zimmermann et al., 2021; Nicolopoulou-Stamati et al., 2016)

Pengelolaan Jasad Pengganggu Tanaman Terpadu (PJPT) telah pula selangkah maju dengan menggabungkan metode kimia, biologi, dan bioteknologi untuk meminimalkan kerusakan lingkungan sekaligus melindungi tanaman (Vozik & Bélafi-Bakó, 2020). Tanaman dapat digunakan dalam fitoremediasi untuk mengurangi konsentrasi polutan di tanah, air, dan udara, sehingga memulihkan lingkungan yang terkontaminasi dan mengurangi risiko Kesehatan (Stanković & Devetaković, 2016), penggunaan signal-signal kimia bawah tanah oleh akar tanaman membantu menjaga keseimbangan ekosistem tanah dengan membentuk bioma akar, meningkatkan ketersediaan nutrisi, dan menarik organisme yang bermanfaat (Guerrieri et al., 2019).

Kawasan lindung efektif dalam menjaga produksi tanaman dan fungsi ekologis, yang dibuktikan dengan tingkat produksi tanaman yang lebih tinggi atau berkelanjutan di kawasan lindung hutan dibandingkan dengan sekitarnya (Tang et al., 2011). Pendekatan jasa ekosistem digunakan untuk mengembangkan tujuan perlindungan khusus untuk penilaian risiko lingkungan pestisida, memastikan perlindungan jasa ekosistem utama

dan keanekaragaman hayati (Maltby et al., 2017) dan penggunaan metabolit sekunder tanaman, seperti terpen, menawarkan alternatif berkelanjutan untuk melindungi tanaman dari hama dan penyakit, mempromosikan keanekaragaman hayati dan mengurangi ketergantungan pada bahan kimia sintetis (Ninkuu et al., 2021)

6.3 Inovasi Perlindungan Tanaman

Perlindungan tanaman terpadu bersifat kompleks dan mencakup: pemilihan varietas yang tahan secara genetik; penyiapan benih secara fitosanitari; pemantauan terkomputerisasi terhadap jenis hama berbahaya; penggunaan perlindungan tanaman secara biologis dan kimia; rotasi tanaman yang kompeten; rotasi varietas, dll. Penelitian telah menunjukkan bahwa biaya perlindungan tanaman terpadu hampir sama dengan perlindungan kimia. Namun, perlindungan terpadu memberikan efek jangka panjang, berkontribusi pada peningkatan hasil panen, meningkatkan karakteristik kualitas produk, mengurangi risiko iklim, dan memiliki keuntungan lingkungan yang nyata. Perlindungan tanaman terpadu telah mengembangkan inovasi yang berhubungan dengan meminimumkan penggunaan pestisida, misalnya menurut (Sutriyono et al., 2019) bahwa penanaman refugia sebagai mikrohabitat serangga musuh alami yang keberadaannya mampu menekan serangga hama. Di sisi lain, misalnya untuk pengendalian pathogen, pemanfaatan jamur endofit padi yang mampu menghambat penyakit padi telah dilaporkan oleh Sopialena, et al., (2021)

Prinsip PJPT yaitu ada upaya internal (tanaman) dan eksternal (masukan) sebagai bentuk dalam sebuah proses perlindungan tanaman. Membudidayakan tanaman sehat adalah modal utama dalam proses perlindungan tanaman, sehingga perlu seleksi benih, tidak dipermasalahkan apakah benih itu unggul bersertifikat, ataupun unggul lokal, namun terpenting proses seleksi benih memperoleh benih dengan keseragaman yang tinggi, daya kecambah tinggi, dan tidak tercemar biji gulma. Dalam proses budidaya sebelumnya perbenihan adalah sesuatu prosedur biasa, namun di sisi perlindungan tanaman, perbenihan yang sehat merupakan inovasi penting sebelum melangkah ke proses budidaya selanjutnya. Upaya memperkuat perbenihan hingga menjadi bibit yang sehat dapat diupayakan dengan masukan seperti penggunaan PGPR dan Trichoderma, sebagai pengendali *Fusarium*, yang sudah dilaporkan pada bawang merah dan mampu menekan *Fusarium* (Syaifudin, et al., 2023) insektisida botani dapat berkontribusi untuk mengurangi kerugian dalam produksi pangan. Penggunaan insektisida botani berbahan daun brotowali (*Tinospora crispa*) dapat mengendalikan *Plutella xylostella*, pada kubis (*Brassica oleraceae*). Efek signifikan diperoleh pada aplikasi minyak kemangi (*Oecimum tenuiflorum*) mengurangi serangan lalat buah (*Bactrocera dorsalis*). Penggunaan *Alpinia galanga* (lengkuas) efektif menghambat *Ceratocystis* sp yang menyerang buah-buahan di lihat pada PDA. Ekstrak daun Piper beetle dan *Alpinia galanga* yang dikombinasikan dapat menekan penyakit layu pisang karena *Fusarium oxysporum* serta *Ralstonia solanacearum*. Penggunaan ekstrak 'lengkuas' (*A. galanga*) dengan konsentrasi 5%, juga dapat menghambat pertumbuhan penyakit busuk batang (*F.*

oxisporum) pada bibit vanilla (I Putu Sudiarta, 2010). Laporan dari Syaifudin et al., (2023), tentang kemampuan ekstrak gulma patikan kebo (*Euphorbia hirta*) dan Saliara (*Lantana camara*) menekan penyakit antraknosa (*Colletotrichum* sp.) cabai, atau sari daun *Ageratum conyzoides*, *Tagetes erecta*, *Chromolaena odorata* baik secara Tunggal maupun dikombinasikan yang dapat mengendalikan *Aphis gossypii* pada cabai rawitn(*Capsicum frutescens*) (Syaifudin et al., 2023), demikian pula karena penelitian lebih lanjut diperlukan untuk lebih memahami variabel kemanjuran dan potensi risiko kesehatan dan lingkungan, mereka yang mempromosikan penggunaan insektisida botani buatan sendiri juga harus mengomunikasikan hal yang tidak diketahui tersebut kepada petani yang menggunakan produk tersebut(Dougoud et al., 2019)

Dalam kondisi modern, produsen pertanian harus berkembang dalam format teknologi digital, hal ini akan mengarah pada peningkatan efisiensi dan daya saing Perusahaan (Mironkina et al., 2020) Laporan Wu et al., (2020) telah berhasil menunjukkan kemampuan robot dalam mengendalikan gulma di lahan pertanian. Inovasi ini memerlukan berbagai algoritma untuk menyusun masukan bagi mesin robot supaya bekerja dengan baik yaitu yang dapat membedakan masukan citra sebagai gulma atau tanaman.

Bumi yang sehat akan mampu menghidupi milyaran penghuninya. Amanat Perserikatan Bangsa-Bangsa kepada seluruh pemerintahan negara-negara di dunia adalah bagaimana lingkungan bumi dan atmosfernya diselamatkan

untuk mendukung kehidupan dan Pembangunan yang berkelanjutan. Amanat ini memerlukan rencana aksi dari segenap pemerintahan termasuk Indonesia, di mana Pemerintah Pusat melakukan derivasi amanat ini menjadi rencana aksi nasional, yang ditindak-lanjuti oleh pemerintah provinsi serta kabupaten/kota untuk menyusun rencana aksi daerah. Sebagaimana diketahui Pembangunan di sektor pertanian adalah subsistem Pembangunan Nasional sehingga program Pembangunan pertanian yang wajib melaksanakan aksi-aksi mencapai Tujuan Pembangunan Berkelanjutan ini dengan melaksanakan program Pertanian Berkelanjutan yang menjamin produksi optimal serta lingkungan Lestari.

6.4 Penutup

Teknologi perlindungan tanaman yang berkembang menjadi inovasi pertanian harus menjamin keberkelanjutan baik produksi pertanian maupun lingkungan hidup, karena hanya dengan lingkungan hidup yang lestari maka akan diperoleh jaminan kehidupan yang berkualitas hingga anak cucu.

DAFTAR PUSTAKA

- Braun, A., D Supkoff. 1994. Options on methyl bromide for the control of soil borne disease and pest in California with reference to the Netherlands. *Pest Manag. Anal. Plann. Prog. State of California*, 52 pp
- Dougoud, J., Toepfer, S., Bateman, M., & Jenner, W. H. (2019). Efficacy of homemade botanical insecticides based on traditional knowledge. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 39(4). <https://doi.org/10.1007/s13593-019-0583-1>
- F. E. Nwilene, K. F. Nwanze, A. Y. (2008). Impact of integrated pest management on food and horticultural crops in Africa. *Entomologia Experimentalis et Applicata*, 128:, 355–363.
- Gomis-Cebolla, J., C Berry. (2023). *Bacillus thuringiensis* as a biofertilizer in crops and their implications in the control of phytopathogens and insect pests. *Pest Manag Sci*, 79, 2992–3001.
- Guerrieri, A., Dong, L., & Bouwmeester, H. J. (2019). Role and exploitation of underground chemical signaling in plants. *Pest Management Science*, 75(9), 2455–2463. <https://doi.org/10.1002/ps.5507>
- Gultom, F., & Harianto, S. (2021). Revolusi Hijau Merubah Sosial-Ekonomi Masyarakat Petani. *TEMALI: Jurnal Pembangunan Sosial*, 4(2), 145–154. <https://doi.org/10.15575/jt.v4i2.12579>

- Hamdani, K. K., & Susanto, H. (2020). Pengendalian Organisme Pengganggu Tanaman Melalui Solarisasi Tanah. *AGROSAINSTEK: Jurnal Ilmu dan Teknologi Pertanian*, 4(2), 146–154. <https://doi.org/10.33019/agrosainstek.v4i2.127>
- Hyakumachi, M., Nishimura, M., Arakawa, T., Asano, S., Yoshida, S., Tsushima, S., & Takahashi, H. (2013). *Bacillus thuringiensis* suppresses bacterial wilt disease caused by *Ralstonia solanacearum* with systemic induction of defense-related gene expression in tomato. *Microbes and Environments*, 28(1), 128–134. <https://doi.org/10.1264/jsme2.ME12162>
- I Putu Sudiarta. (2010). Peranan Pestisida Botani Dalam Mendukung Pertanian Organik. *AGRICA*, 3 (1) : 63 – 69, 3(1), 63–69. <https://e-journal.uniflor.ac.id/index.php/Agr/article/view/494/484>
- Maltby, L., Jackson, M., Whale, G., Brown, A. R., Hamer, M., Solga, A., Kabouw, P., Woods, R., & Marshall, S. (2017). Is an ecosystem services-based approach developed for setting specific protection goals for plant protection products applicable to other chemicals? *Science of the Total Environment*, 580(December 2016), 1222–1236. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.12.083>
- Mansouri, A., M. Cregut, C. Abbes, Marie-Jose Durand, A. Landoulsi. (2017). The Environmental Issues of DDT Pollution and Bioremediation: a Multidisciplinary Review. *Appl Biochem Biotechnol*, 181(1), 309–339.

- Mironkina, A., Kharitonov, S., Kuchumov, A., & Belokopytov, A. (2020). Digital technologies for efficient farming. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 578(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/578/1/012017>
- Muhammad Razaq, Farhan Mahmood Shah, S. A. & M. A. (2019). Pest Management for Agronomic Crops. *Agronomic Crop*, 365–384.
- Nicolopoulou-Stamati, P., Maipas, S., Kotampasi, C., Stamatis, P., & Hens, L. (2016). Chemical Pesticides and Human Health: The Urgent Need for a New Concept in Agriculture. *Frontiers in Public Health*, 4(July), 1–8. <https://doi.org/10.3389/fpubh.2016.00148>
- Ninkuu, V., Zhang, L., Yan, J., Fu, Z., Yang, T., & Zeng, H. (2021). Biochemistry of terpenes and recent advances in plant protection. *International Journal of Molecular Sciences*, 22(11). <https://doi.org/10.3390/ijms22115710>
- Pretty, J., & Bharucha, Z. (2015). Integrated Pest Management for Sustainable Intensification of Agriculture in Asia and Africa.,. *Insects*, 6, 152-182.
- Pu, Y., Ma, T., Hou, Y., & Sun, M. (2017). An entomopathogenic bacterium strain, *Bacillus thuringiensis*, as a biological control agent against the red palm weevil, *Rhynchophorus ferrugineus* (Coleoptera: Curculionidae). *Pest management science*, 73(7), 1494–1502.

- Rempelos, L., Barański, M., Sufar, E. K., Gilroy, J., Shotton, P., Leifert, H., Średnicka-Tober, D., Hasanaliyeva, G., Rosa, E. A. S., Hajslova, J., Schulzova, V., Cakmak, I., Ozturk, L., Brandt, K., Seal, C., Wang, J., Schmidt, C., & Leifert, C. (2023). Effect of Climatic Conditions, and Agronomic Practices Used in Organic and Conventional Crop Production on Yield and Nutritional Composition Parameters in Potato, Cabbage, Lettuce and Onion; Results from the Long-Term NFSC-Trials. *Agronomy*, 13(5). <https://doi.org/10.3390/agro-nomy13051225>
- Sopialena, Syaifudin E.A, Rusdiana. (2021). Kemampuan Jamur Endofit Padi dalam Menghambat Pertumbuhan Jamur Penyebab Penyakit Tanaman Padi (*Oryza sativa* L) secara In Vitro. *Jurnal Agroekoteknologi Tropika Lembab*, 4(1), 42–49.
- Syaifudin, E.A, N Akhsan, Sabriani. (2023). Mortalitas *Aphis gossypii* pada Tanaman Cabai Rawit (*Capsicum frutescens*) dengan Aplikasi Ekstrak Daun *Ageratum conyzoides*, *Tagetes erecta*, dan *Chromolaena odorata* *Aphis gossypii* Mortality on Cayenne Pepper (*Capsicum frutescens*) with the Application of Lea. *Jurnal Agroekoteknologi Tropika Lembab*, 6 (1), 21–27.
- Syaifudin, E.A, T. Subiono, S. Sila, N. Akhsan, Kristiadi. (2023). Pengaruh Aplikasi Plant Growth Promoting Rhizobacteria DAN *Trichoderma* sp Terhadap Penyakit Layu *Fusarium* Pada Tanaman Bawang Merah (*Allium cepa* L.) . *Jurnal Pertanian Terpadu*, 11(2), 175–184.

- Syaifudin, E. A., Akhsan, N., A. Aryubi, (2023). Efektivitas Ekstrak Gulma dalam Menghambat Penyakit Antraknosa (Colletotrichum sp.) Tanaman Cabai (*Capsicum annuum* L.) secara In Vitro. *Jurnal Agroekoteknologi Tropika Lembab*, 5(2), 136–142.
- Stanković, D. M., & Devetaković, J. R. (2016). Application of plants in remediation of contaminated sites. *Reforesta*, 1, 300–320. <https://doi.org/10.21750/refor.1.15.15>
- Paudel, S., Lalit P. Sah, Mukti Devkota, Vijaya Poudyal, P. V. V. P. M. R. R. (2020). Conservation Agriculture and Integrated Pest Management Practices Improve Yield and Income while Reducing Labor, Pests, Diseases and Chemical Pesticide Use in Smallholder Vegetable Farms in Nepal. *sustainability*, 12(16), 1–16.
- Sutriono, Purba, E., & Marheni. (2019). Insect management with refugia plant in upland rice (*Oryza sativa* L.). *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 260(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/260/1/012138>
- Tang, Z., Fang, J., Sun, J., & Gaston, K. J. (2011). Effectiveness of protected areas in maintaining plant production. *PLoS ONE*, 6(4). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0019116>
- Tudor, V. C., Stoicea, P., Chiurciu, I. A., Soare, E., Iorga, A. M., Dinu, T. A., David, L., Micu, M. M., Smedescu, D. I., & Dumitru, E. A. (2023). The Use of Fertilizers and Pesticides in Wheat Production in the Main European Countries. *Sustainability (Switzerland)*, 15(4), 1–22. <https://doi.org/10.3390/su15043038>

- Vozik, D., & Bélafi-Bakó, K. (2020). Combination of Chemical and Biological Methods for Effective Plant Protection. *Hungarian Journal of Industry and Chemistry*, 48(2), 1–4. <https://doi.org/10.33927/hjic-2020-20>
- Wahyuni, W. S., Nurcahyanti, S. D., & Nurhayati, N. (2023). The effectivity of bordeaux and california slurries to control wet diplodia disease on citrus siem variety. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1168(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1168/1/012022>
- Weersink, A., Deen, W., & Weaver, S. (1991). Defining and Measuring Economic Threshold Levels. *Canadian Journal of Agricultural Economics/Revue canadienne d'agroeconomie*, 39(4), 619–625. <https://doi.org/10.1111/j.1744-7976.1991.tb03613.x>
- Zimmermann, B., Claß-Mahler, I., Von Cossel, M., Lewandowski, I., Weik, J., Spiller, A., Nitzko, S., Lippert, C., Krimly, T., Pergner, I., Zörb, C., Wimmer, M. A., Dier, M., Schurr, F. M., Pagel, J., Riemenschneider, A., Kehlenbeck, H., Feike, T., Klocke, B., ... Bahrs, E. (2021). Mineral-ecological cropping systems—a new approach to improve ecosystem services by farming without chemical synthetic plant protection. *Agronomy*, 11(9). <https://doi.org/10.3390/agronomy11091710> (<https://www.bkp-kupang.or.id/konten/detail/karantina-hewan-dan-tumbuhan>).

Patogen Kelaparan Kentang Irlandia Memicu Wabah di 6
Benua | Berita Negara Bagian NC (ncsu.edu)
Anopheles - Wikipedia
BTgen.pdf (orst.edu)

BAB 7

PRAKTIK TERBAIK DALAM MANAJEMEN TANAMAN

Oleh M. Akhyar Roeslan

7.1 Pendahuluan

Rotasi tanaman dan teknik budidaya yang tepat merupakan bagian integral dari praktik manajemen tanaman yang efektif dan berkelanjutan. Rotasi tanaman, atau pergiliran jenis tanaman yang ditanam pada suatu lahan dalam siklus tertentu, membantu menjaga kesuburan tanah, mengurangi risiko serangan hama dan penyakit, serta meningkatkan keanekaragaman hayati (Gliessman, 2014). Teknik ini meminimalkan ketergantungan pada pestisida dan pupuk sintetis dengan mengganggu siklus hidup hama dan mengoptimalkan penggunaan nutrisi tanah (Liebman et al., 2001). Selain itu, penggunaan teknik budidaya seperti penanaman tumpangsari, agroforestri, dan penggunaan tanaman penutup tanah dapat meningkatkan kesehatan tanah dan memperbaiki iklim mikro, sehingga tanaman dapat tumbuh lebih sehat dan produktif.

Pengelolaan sumber daya alam yang bijaksana juga menjadi elemen kunci dalam manajemen tanaman yang berkelanjutan. Penggunaan air secara efisien melalui metode irigasi yang tepat, seperti irigasi tetes atau sistem sprinkler, dapat mengurangi pemborosan air dan memastikan pasokan

yang memadai untuk tanaman (Scherr, S. J., and McNeely, 2007). Selain itu, pengelolaan tanah yang baik, termasuk pengendalian erosi dan penambahan bahan organik, dapat menjaga struktur tanah dan meningkatkan kemampuan tanah dalam menyimpan air dan nutrisi (Pretty, 2002). Pengelolaan sumber daya alam juga mencakup pemanfaatan sumber daya lokal, seperti penggunaan pupuk organik dan bahan alami lainnya, untuk mengurangi dampak lingkungan dan biaya produksi. Dengan menerapkan praktik-praktik terbaik ini, petani dapat meningkatkan produktivitas tanaman sekaligus menjaga keberlanjutan ekosistem.

7.2 Rotasi Tanam dan Teknik Budidaya

7.2.1 Rotasi Tanaman untuk Mengurangi Hama dan Penyakit

Rotasi tanaman merupakan strategi kunci dalam pertanian berkelanjutan yang bertujuan untuk mengelola hama dan penyakit secara efektif. Dengan mengganti jenis tanaman yang ditanam di suatu lahan setiap musim tanam, petani dapat memutus siklus hidup hama dan patogen yang spesifik pada tanaman tertentu (Altieri, M. A., 2004). Hama dan penyakit sering kali memiliki siklus hidup yang terkait erat dengan tanaman inang mereka; oleh karena itu, rotasi tanaman dapat mengganggu habitat dan sumber makanan mereka, sehingga mengurangi populasi hama dan patogen tersebut secara alami.

Contohnya, tanaman tertentu mungkin rentan terhadap serangan penyakit jamur atau bakteri spesifik.

Dengan menggantinya dengan tanaman yang tidak rentan terhadap penyakit tersebut pada musim tanam berikutnya, peluang patogen untuk bertahan dan berkembang biak berkurang (Luna, J. M., and Staben, 2003). Selain itu, tanaman yang berbeda sering kali memiliki kebutuhan nutrisi dan karakteristik tanah yang berbeda, yang juga membantu dalam menyeimbangkan nutrisi tanah dan mencegah penumpukan spesifik patogen (Gliessman, 2014).

Melalui penerapan rotasi tanaman, petani dapat mengurangi ketergantungan pada pestisida kimia, yang sering kali membawa risiko lingkungan dan kesehatan. Pengurangan penggunaan pestisida tidak hanya mengurangi biaya produksi tetapi juga melindungi ekosistem pertanian, termasuk organisme non-target yang bermanfaat, seperti predator alami hama. Dengan demikian, rotasi tanaman menjadi bagian integral dari sistem manajemen tanaman yang lebih luas dan holistik, yang berfokus pada kesehatan tanaman dan keberlanjutan lingkungan.

7.2.2 Perbaikan Struktur dan Kesuburan Tanah

Rotasi tanaman memainkan peran penting dalam perbaikan struktur dan kesuburan tanah, yang merupakan faktor kunci dalam meningkatkan produktivitas pertanian. Tanaman yang berbeda memiliki kebutuhan nutrisi yang berbeda dan mempengaruhi tanah dengan cara yang unik. Misalnya, tanaman leguminosa seperti kacang-kacangan dan kedelai memiliki kemampuan untuk mengikat nitrogen dari atmosfer melalui simbiosis dengan bakteri rhizobium di akarnya (Liebman et al., 2001). Nitrogen yang terikat ini kemudian dilepaskan ke dalam tanah, memperkaya kandungan nutrisi yang bermanfaat bagi tanaman

selanjutnya. Dengan memasukkan tanaman leguminosa dalam rotasi tanaman, petani dapat secara alami menambahkan nitrogen ke dalam tanah, mengurangi kebutuhan akan pupuk kimia sintetis, dan menghindari potensi pencemaran lingkungan akibat penggunaan pupuk yang berlebihan (Altieri, 1995).

Selain memperbaiki kesuburan tanah, rotasi tanaman juga berkontribusi pada perbaikan struktur tanah. Tanaman dengan sistem perakaran yang berbeda dapat membantu menguraikan dan memperbaiki struktur tanah yang padat, meningkatkan porositas tanah, dan memperbaiki kemampuan tanah untuk menyerap dan menahan air (Scherr et al., 2007). Hal ini sangat penting dalam mencegah erosi tanah dan memfasilitasi pergerakan air dan udara di dalam tanah, yang esensial bagi kesehatan akar tanaman. Dengan meningkatkan struktur dan kesuburan tanah, rotasi tanaman tidak hanya mendukung pertumbuhan tanaman yang lebih sehat dan produktif tetapi juga membantu menjaga keberlanjutan ekosistem pertanian secara keseluruhan.

7.2.3 Teknik Budidaya untuk Meningkatkan Kelembaban dan Mengurangi Erosi

Teknik budidaya yang tepat memainkan peran penting dalam praktik pertanian berkelanjutan, khususnya dalam menjaga kelembaban tanah dan mengurangi erosi. Penggunaan mulsa organik merupakan salah satu metode efektif yang sering digunakan. Mulsa organik, seperti jerami, kompos, atau daun kering, ditempatkan di permukaan tanah untuk membentuk lapisan pelindung. Lapisan ini membantu mengurangi penguapan air dari tanah, menjaga kelembaban

tanah, dan menyediakan kondisi mikroklimat yang stabil untuk tanaman (Francis et al., 2009). Selain itu, mulsa juga berfungsi sebagai penahan panas, yang membantu menjaga suhu tanah dan melindungi akar tanaman dari suhu ekstrem.

Selain menjaga kelembaban tanah, mulsa organik juga efektif dalam mengurangi erosi tanah. Dengan melindungi permukaan tanah dari dampak langsung tetesan air hujan, mulsa mengurangi potensi terjadinya aliran air permukaan yang dapat membawa lapisan atas tanah yang subur (Luna et al., 2003). Tanpa perlindungan ini, tanah rentan terhadap erosi, terutama di daerah dengan curah hujan tinggi atau tanah yang miring. Erosi yang berlebihan dapat mengakibatkan penurunan kesuburan tanah dan degradasi lahan, yang akhirnya merugikan produktivitas pertanian.

Teknik budidaya lain yang efektif untuk mencegah erosi adalah penanaman penutup tanah. Penutup tanah adalah tanaman yang ditanam untuk menutupi tanah dan bukan untuk dipanen. Tanaman ini membantu menjaga integritas tanah dengan menstabilkan permukaan tanah melalui jaringan akarnya, yang mengurangi risiko erosi akibat angin dan air (Gliessman, 2014). Selain itu, penutup tanah juga meningkatkan aktivitas biologi di dalam tanah dengan menyediakan habitat bagi mikroorganisme dan fauna tanah, seperti cacing tanah. Mikroorganisme ini berperan penting dalam dekomposisi bahan organik dan siklus nutrisi, yang pada gilirannya memperbaiki struktur tanah dan meningkatkannya. Dengan demikian, penggunaan teknik budidaya seperti mulsa organik dan penanaman penutup tanah berkontribusi signifikan terhadap kesehatan dan keberlanjutan ekosistem pertanian.

7.2.4 Pengolahan Tanah Minimal untuk Menjaga Kesehatan Tanah

Pengolahan tanah minimal atau konservatif merupakan pendekatan dalam pertanian berkelanjutan yang menekankan pengurangan pembalikan tanah dan gangguan fisik pada lahan. Teknik ini bertujuan untuk mempertahankan struktur alami tanah, yang penting untuk menjaga porositas dan kemampuan tanah untuk menahan air. Dengan mengurangi pembalikan tanah, residu tanaman yang tersisa di permukaan tanah dapat berfungsi sebagai mulsa alami, melindungi tanah dari erosi dan membantu menjaga kelembaban. Selain itu, residu tanaman ini juga menjadi sumber bahan organik yang, ketika terurai, meningkatkan kandungan humus dan kesuburan tanah, serta menyediakan nutrisi bagi tanaman berikutnya (Altieri, 1995).

Keuntungan lain dari pengolahan tanah minimal adalah peningkatan aktivitas mikroorganisme yang bermanfaat dalam tanah. Mikroorganisme ini, termasuk bakteri, jamur, dan fauna tanah lainnya, berperan penting dalam proses dekomposisi bahan organik dan siklus nutrisi. Dengan mengurangi gangguan mekanis pada tanah, mikroorganisme dapat berkembang lebih baik, yang pada gilirannya meningkatkan kesehatan tanah secara keseluruhan. Selain itu, teknik ini juga mengurangi emisi karbon dari tanah karena gangguan tanah yang minimal, membantu mitigasi perubahan iklim (Pretty, 2002). Dengan demikian, pengolahan tanah minimal tidak hanya mendukung kesehatan tanah jangka panjang tetapi juga berkontribusi pada keberlanjutan ekosistem pertanian dan lingkungan secara umum.

7.2.5 Peningkatan Aktivitas Mikroorganisme Tanah

Peningkatan aktivitas mikroorganisme tanah merupakan salah satu manfaat utama dari penerapan rotasi tanaman dan teknik budidaya yang tepat. Mikroorganisme tanah, seperti bakteri, jamur, dan aktinomisetes, berperan krusial dalam dekomposisi bahan organik. Proses ini mengubah sisa-sisa tanaman dan hewan menjadi humus dan nutrisi yang tersedia bagi tanaman, seperti nitrogen, fosfor, dan kalium. Dengan rotasi tanaman, berbagai jenis residu organik disediakan sepanjang musim, yang mendukung perkembangan komunitas mikroorganisme yang beragam. Diversifikasi tanaman dalam rotasi juga membantu mencegah dominasi spesies patogen tertentu, karena beberapa mikroorganisme bermanfaat dapat bertindak sebagai agen biokontrol terhadap patogen tanaman (Luna et al., 2003).

Teknik budidaya yang baik, seperti pengolahan tanah minimal dan penggunaan mulsa organik, juga dapat meningkatkan aktivitas mikroorganisme tanah. Pengolahan tanah minimal mengurangi gangguan pada habitat mikroorganisme, memungkinkan mereka untuk berkembang biak dan berfungsi secara optimal. Selain itu, mulsa organik menyediakan sumber makanan tambahan bagi mikroorganisme, mendukung siklus hidup mereka dan meningkatkan populasi. Dengan meningkatkan aktivitas mikroorganisme, tanah menjadi lebih hidup dan kaya akan nutrisi, yang pada akhirnya meningkatkan kesuburan tanah dan kesehatan tanaman. Hal ini berkontribusi pada produktivitas pertanian yang lebih tinggi dan lebih berkelanjutan dalam jangka panjang.

7.2.6 Efisiensi Penggunaan Sumber Daya

Rotasi tanaman dan teknik budidaya yang baik juga berkontribusi pada efisiensi penggunaan sumber daya, seperti air, pupuk, dan tenaga kerja. Dengan memilih tanaman yang sesuai dengan kondisi lahan dan iklim, petani dapat memaksimalkan penggunaan air dan nutrisi. Teknik seperti irigasi tetes dan pengelolaan air yang tepat dapat mengurangi pemborosan air dan meningkatkan efisiensi penggunaan air. Pengelolaan nutrisi yang tepat, melalui penggunaan pupuk organik dan kompos, juga dapat mengurangi ketergantungan pada input kimia dan meningkatkan keberlanjutan pertanian (Pretty, 2002).

7.2.7 Kontribusi terhadap Keberlanjutan Lingkungan

Kontribusi rotasi tanaman dan teknik budidaya yang tepat terhadap keberlanjutan lingkungan pertanian sangat signifikan. Praktik-praktik ini tidak hanya meningkatkan produktivitas pertanian dan kesehatan tanaman tetapi juga memainkan peran penting dalam mengurangi dampak negatif terhadap lingkungan. Misalnya, rotasi tanaman dapat mengurangi kebutuhan akan pestisida kimia dengan memutus siklus hidup hama dan patogen. Ini tidak hanya mengurangi risiko pencemaran tanah dan air, tetapi juga melindungi organisme non-target yang berperan dalam ekosistem pertanian. Dengan demikian, praktik ini membantu mempertahankan kualitas tanah dan air, serta mencegah kerusakan ekosistem.

Selain itu, teknik budidaya yang tepat, seperti pengolahan tanah minimal dan penggunaan mulsa organik, juga berkontribusi pada keberlanjutan lingkungan. Pengolahan tanah minimal mengurangi emisi karbon dari

tanah dan menjaga struktur tanah, yang pada gilirannya mendukung penyerapan air dan mengurangi erosi. Penggunaan mulsa organik membantu menjaga kelembaban tanah, mengurangi kebutuhan irigasi, dan mengurangi aliran permukaan yang dapat menyebabkan pencemaran air (Francis et al., 2009). Dengan mengurangi ketergantungan pada input kimia dan praktik yang merusak, teknik budidaya ini membantu melestarikan sumber daya alam dan mendukung keseimbangan ekosistem.

Keseimbangan ekosistem pertanian yang tercapai melalui rotasi tanaman dan teknik budidaya yang tepat juga penting untuk menjaga keanekaragaman hayati. Keanekaragaman hayati yang sehat membantu menyediakan layanan ekosistem yang penting, seperti penyerbukan, pengendalian hama alami, dan penguraian bahan organik. Dengan menjaga keberagaman tanaman dan habitat dalam sistem pertanian, petani dapat mendukung populasi organisme yang bermanfaat, baik flora maupun fauna. Hal ini tidak hanya mendukung keberlanjutan pertanian tetapi juga menjaga ekosistem alami yang berinteraksi dengan lahan pertanian. Dengan menjaga keseimbangan ini, pertanian dapat memenuhi kebutuhan pangan masa depan tanpa merusak lingkungan.

7.3 Pengelolaan Sumber Daya Alam

7.3.1 Penggunaan Air Secara Efisien

Pengelolaan air yang bijaksana merupakan elemen kunci dalam pengelolaan sumber daya alam yang berkelanjutan, khususnya dalam sektor pertanian. Salah satu

metode irigasi yang efisien adalah irigasi tetes, yang dirancang untuk mengantarkan air langsung ke zona akar tanaman (Kashyap et al., 2019). Metode ini mengurangi penguapan karena air diberikan dalam jumlah kecil tetapi kontinu, tepat di mana tanaman membutuhkannya. Dengan mengarahkan air langsung ke akar, irigasi tetes meminimalkan pemborosan air yang sering terjadi pada metode irigasi tradisional seperti irigasi permukaan atau semprotan. Ini memungkinkan penggunaan air yang lebih hemat, yang sangat penting terutama di daerah yang memiliki keterbatasan sumber air.

Di daerah dengan sumber air terbatas, penerapan teknik irigasi yang efisien seperti irigasi tetes menjadi sangat penting untuk menjaga kelangsungan pertanian dan menghindari overeksploitasi sumber daya air (Altieri, 1995). Penggunaan air secara efisien tidak hanya memastikan bahwa tanaman mendapatkan air yang mereka butuhkan untuk pertumbuhan optimal tetapi juga melindungi lingkungan dari degradasi. Dengan mengurangi konsumsi air, petani dapat mempertahankan sumber daya air untuk penggunaan masa depan dan mengurangi tekanan pada ekosistem lokal (Francis et al., 2009). Ini adalah langkah penting dalam mendukung pertanian berkelanjutan dan memastikan bahwa praktik pertanian dapat terus berkembang tanpa merusak lingkungan atau menguras sumber daya alam.

7.3.2 Manajemen Nutrisi Tanah dengan Pupuk Organik

Manajemen nutrisi tanah dengan menggunakan pupuk organik dan kompos adalah praktik penting dalam pertanian berkelanjutan yang semakin banyak diterapkan oleh petani.

Pupuk organik, seperti pupuk kandang, kompos, dan sisa tanaman, menyediakan nutrisi penting seperti nitrogen, fosfor, dan kalium bagi tanaman. Nutrisi ini dilepaskan secara perlahan, memberikan pasokan yang stabil dan terus-menerus selama musim tanam. Selain itu, bahan organik dalam pupuk organik membantu memperkaya kandungan organik tanah, yang pada gilirannya meningkatkan aktivitas mikroorganisme dan fauna tanah. Mikroorganisme ini memainkan peran penting dalam dekomposisi bahan organik dan siklus nutrisi, yang membantu meningkatkan kesuburan tanah secara alami (Francis et al., 2009).

Selain menyediakan nutrisi, penggunaan pupuk organik juga memperbaiki struktur tanah. Bahan organik yang terkandung dalam pupuk organik dapat meningkatkan agregasi partikel tanah, yang memperbaiki porositas tanah dan memungkinkan pergerakan air dan udara yang lebih baik. Hal ini sangat penting untuk mempertahankan kesehatan akar tanaman dan mencegah masalah seperti penggenangan air atau tanah yang terlalu padat. Peningkatan kandungan bahan organik juga meningkatkan kapasitas tanah untuk menahan air, yang sangat bermanfaat terutama di daerah dengan curah hujan yang tidak teratur atau selama periode kekeringan. Dengan demikian, pupuk organik tidak hanya membantu dalam menyediakan nutrisi tetapi juga dalam menjaga kondisi fisik tanah yang optimal untuk pertumbuhan tanaman (Gliessman, 2014).

Penggunaan pupuk organik juga berkontribusi pada keberlanjutan ekosistem pertanian dengan mengurangi risiko pencemaran lingkungan. Pupuk kimia sintetis sering kali mengandung senyawa yang dapat larut dalam air dan

terbawa oleh aliran air permukaan ke badan air, menyebabkan eutrofikasi dan merusak ekosistem akuatik. Sebaliknya, pupuk organik, yang berasal dari bahan alami, memiliki risiko yang jauh lebih rendah untuk mencemari air tanah atau permukaan. Dengan meminimalkan penggunaan bahan kimia sintesis, petani dapat menjaga keseimbangan ekosistem dan melindungi keanekaragaman hayati. Oleh karena itu, manajemen nutrisi tanah dengan pupuk organik adalah praktik yang tidak hanya mendukung produktivitas tanaman tetapi juga menjaga keseimbangan dan keberlanjutan lingkungan secara keseluruhan (Luna et al., 2003).

7.3.3 Konservasi Keanekaragaman Hayati

Konservasi keanekaragaman hayati adalah komponen penting dalam pengelolaan sumber daya alam yang berkelanjutan. Salah satu cara efektif untuk menjaga keanekaragaman hayati di lahan pertanian adalah dengan penggunaan tanaman penutup tanah dan tanaman perantara. Tanaman penutup tanah membantu mencegah erosi, memperbaiki struktur tanah, dan meningkatkan kesuburan tanah (Altieri, M. A., 2004). Selain itu, mereka menyediakan habitat yang ideal bagi berbagai spesies organisme, seperti serangga bermanfaat, burung, dan mikroorganisme tanah. Keberadaan berbagai spesies ini berperan penting dalam menjaga keseimbangan ekosistem, termasuk dalam pengendalian hama alami dan penyerbukan.

Sistem agroforestri, yang menggabungkan pepohonan dengan tanaman pertanian, adalah metode lain yang efektif untuk meningkatkan keanekaragaman hayati. Pohon-pohon

dalam sistem ini menyediakan naungan, yang dapat mengurangi suhu tanah dan melindungi tanaman dari angin kencang. Selain itu, akar pohon membantu menstabilkan tanah dan mencegah erosi, sementara dedaunan yang gugur memperkaya tanah dengan bahan organik. Sistem agroforestri juga mendukung keanekaragaman flora dan fauna, karena pepohonan menyediakan tempat berlindung dan sumber makanan bagi berbagai spesies hewan. Dengan demikian, konservasi keanekaragaman hayati melalui praktik-praktik ini tidak hanya mendukung produksi pertanian yang berkelanjutan tetapi juga menjaga keseimbangan ekosistem alami (Francis et al., 2009).

7.3.4 Penerapan Sistem Agroforestri

Agroforestri adalah praktik pengelolaan lahan yang mengintegrasikan pepohonan dan semak-semak dengan tanaman atau ternak dalam suatu sistem pengelolaan yang terpadu. Sistem ini tidak hanya membantu menjaga keanekaragaman hayati, tetapi juga meningkatkan ketahanan lahan terhadap perubahan iklim (Altieri, 1995). Pohon-pohon dalam sistem agroforestri dapat berfungsi sebagai penyerap karbon, mengurangi erosi, dan memperbaiki siklus nutrisi tanah. Selain itu, agroforestri dapat memberikan hasil tambahan seperti kayu bakar, buah-buahan, atau bahan bangunan, yang mendukung keberlanjutan ekonomi bagi petani.

7.3.5 Pengelolaan Tanah yang Berkelanjutan

Pengelolaan tanah yang berkelanjutan merupakan kunci untuk menjaga kesehatan tanah dan mencegah degradasi, yang penting untuk keberlanjutan pertanian

jangka panjang. Salah satu pendekatan yang efektif dalam hal ini adalah pengolahan tanah konservatif, yang melibatkan pengurangan gangguan fisik pada tanah. Teknik ini, seperti pengolahan tanah minimal atau tidak sama sekali, membantu mempertahankan bahan organik di lapisan atas tanah dan menjaga kelembaban tanah (Liebman et al., 2001). Dengan mengurangi pembalikan tanah, pengolahan tanah konservatif juga meminimalkan kehilangan karbon dari tanah, yang penting untuk menjaga keseimbangan ekosistem dan mengurangi emisi gas rumah kaca.

Selain menjaga kelembaban dan bahan organik, pengolahan tanah konservatif juga efektif dalam mengurangi erosi tanah. Dengan membiarkan sisa-sisa tanaman di permukaan tanah, metode ini menciptakan penutup alami yang melindungi tanah dari dampak tetesan air hujan dan aliran permukaan. Ini membantu mempertahankan struktur tanah dan mencegah hilangnya partikel tanah yang subur. Selain itu, praktik ini meningkatkan biodiversitas mikroba tanah, karena mikroorganisme dapat berkembang biak dengan lebih baik di tanah yang tidak terlalu sering diganggu (Luna et al., 2003). Mikroorganisme ini memainkan peran penting dalam dekomposisi bahan organik dan siklus nutrisi, yang langsung berpengaruh pada kesehatan tanaman.

Pengelolaan tanah yang berkelanjutan juga mencakup penggunaan teknik lain seperti rotasi tanaman dan penanaman penutup tanah, yang berkontribusi pada peningkatan kesehatan tanah dan keberlanjutan lingkungan. Rotasi tanaman membantu mencegah penumpukan hama dan penyakit serta memperkaya tanah dengan berbagai jenis

nutrisi. Sementara itu, tanaman penutup tanah tidak hanya melindungi tanah dari erosi tetapi juga menambah bahan organik ketika terurai. Dengan mengadopsi pendekatan-pendekatan ini, petani dapat menjaga kualitas tanah, memastikan produktivitas yang berkelanjutan, dan melindungi ekosistem yang lebih luas dari kerusakan. Hal ini tidak hanya bermanfaat bagi pertanian saat ini tetapi juga bagi generasi mendatang yang akan bergantung pada lahan yang sama untuk memenuhi kebutuhan pangan mereka.

7.3.6 Penggunaan Energi Terbarukan dalam Pertanian

Penggunaan energi terbarukan dalam pertanian, seperti tenaga surya atau tenaga angin, adalah bagian dari upaya pengelolaan sumber daya alam yang berkelanjutan (Pretty, 2002). Teknologi ini dapat digunakan untuk menggerakkan sistem irigasi, pemompaan air, atau fasilitas penyimpanan hasil pertanian. Dengan mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil, petani dapat mengurangi jejak karbon mereka dan mendukung transisi menuju sistem energi yang lebih berkelanjutan. Investasi dalam energi terbarukan juga dapat memberikan penghematan biaya jangka panjang dan meningkatkan ketahanan energi.

7.3.7 Penerapan Praktik Pertanian Presisi

Penerapan praktik pertanian presisi melibatkan integrasi teknologi canggih dan analisis data untuk mengoptimalkan penggunaan sumber daya di lahan pertanian (Scherr et al., 2007). Teknologi seperti sensor

tanah, citra satelit, drone, dan perangkat IoT memungkinkan petani untuk memantau kondisi tanah dan tanaman secara real-time. Misalnya, sensor tanah dapat mengukur kelembaban, suhu, dan kadar nutrisi, sementara citra satelit dan drone memberikan informasi tentang kesehatan tanaman dan variabilitas lahan. Dengan data ini, petani dapat melakukan aplikasi input seperti air, pupuk, dan pestisida secara tepat sesuai kebutuhan tanaman di berbagai bagian lahan.

Keuntungan dari pertanian presisi adalah peningkatan efisiensi penggunaan sumber daya, yang pada akhirnya mengurangi limbah dan dampak lingkungan. Dengan aplikasi input yang tepat dan berbasis data, petani dapat mengurangi penggunaan air dan pupuk secara berlebihan, yang sering kali menyebabkan pencemaran air dan tanah. Selain itu, pengurangan penggunaan pestisida yang tidak diperlukan juga melindungi keanekaragaman hayati dan mengurangi risiko bagi kesehatan manusia. Pertanian presisi memungkinkan petani membuat keputusan yang lebih informasional dan berbasis data, yang tidak hanya mendukung keberlanjutan tetapi juga meningkatkan produktivitas dan efisiensi operasional. Dengan demikian, praktik ini berkontribusi pada keberlanjutan pertanian jangka panjang dan ketahanan pangan (Altieri, M. A., 2004).

7.3.8 Pentingnya Pendidikan dan Penyuluhan Pertanian

Pendidikan dan penyuluhan pertanian memainkan peran penting dalam pengelolaan sumber daya alam yang berkelanjutan. Petani perlu mendapatkan akses terhadap

informasi dan pelatihan tentang praktik terbaik dalam pengelolaan air, tanah, dan energi. Melalui program penyuluhan, petani dapat belajar tentang teknologi baru, teknik budidaya yang efisien, dan strategi konservasi yang dapat meningkatkan produktivitas sekaligus menjaga kelestarian lingkungan. Dengan dukungan pendidikan yang memadai, petani dapat lebih siap menghadapi tantangan dan peluang dalam pertanian berkelanjutan (Scherr, S. J., and McNeely, 2007).

7.4 Kesimpulan

Dalam buku **Urgensi dan Konsep Perlindungan Tanaman Berkelanjutan**, bab mengenai **Praktik Terbaik dalam Manajemen Tanaman** menyoroti pentingnya penerapan teknik yang mendukung keberlanjutan pertanian dan perlindungan lingkungan. **Rotasi tanaman** dan teknik budidaya yang tepat merupakan fondasi dari praktik ini, dengan tujuan utama untuk meningkatkan kesehatan tanah, mengurangi masalah hama dan penyakit, serta memperbaiki struktur dan kesuburan tanah. Rotasi tanaman mengurangi ketergantungan pada pestisida dan pupuk kimia, sementara teknik budidaya seperti penggunaan mulsa organik dan penanaman penutup tanah berkontribusi pada pengurangan erosi dan peningkatan kelembaban tanah. Melalui pendekatan ini, petani dapat menjaga produktivitas lahan secara berkelanjutan dan mendukung kesehatan ekosistem pertanian.

Selain itu, **pengelolaan sumber daya alam** yang bijaksana memainkan peran krusial dalam keberlanjutan pertanian. Penggunaan air secara efisien melalui teknik

irigasi seperti irigasi tetes, serta penerapan pupuk organik, membantu menjaga kualitas tanah dan mengurangi pencemaran. Konservasi keanekaragaman hayati dengan mengintegrasikan tanaman penutup tanah dan sistem agroforestri juga mendukung kesehatan ekosistem dan keberlanjutan lingkungan. Dengan mengadopsi praktik-praktik ini, petani tidak hanya meningkatkan efisiensi produksi tetapi juga melindungi dan mempertahankan sumber daya alam yang penting untuk generasi mendatang. Implementasi teknik-teknik ini secara konsisten akan memastikan bahwa lahan pertanian tetap produktif dan ekosistem tetap sehat, menciptakan keseimbangan yang mendukung keberlanjutan pertanian secara keseluruhan.

Untuk mendukung bab tentang "Praktik Terbaik dalam Manajemen Tanaman" dalam buku Anda berjudul Urgensi dan Konsep Perlindungan Tanaman Berkelanjutan, berikut adalah beberapa referensi yang dapat Anda gunakan untuk topik "Rotasi Tanaman dan Teknik Budidaya" serta "Pengelolaan Sumber Daya Alam":

DAFTAR PUSTAKA

- Altieri, M. A., and N. (2004) 'Biodiversity and Pest Management in Agroecosystems.', *CRC Press*. [Preprint].
- Altieri, M.A. (1995) 'agroecology: The Science of Sustainable Agriculture (2nd ed.)', *Boulder: Westview Press*. [Preprint].
- Francis, C. A., Florentin, M. A., and Poincelot, R.P. (2009) 'Organic Farming: The Ecological System.', *American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, and Soil Science Society of America*. [Preprint].
- Gliessman, S.R. (2014) 'Agroecology: The Ecology of Sustainable Food Systems', *CRC Press*. [Preprint].
- Kashyap PL, Kumar S, Jasrotia P, Singh DP, S.G. (2019) 'Nanosensors for plant disease diagnosis: Current understanding and future perspectives.', *Nanoscience for Sustainable Agriculture*, pp. 189–205.
- Liebman, M., Mohler, C. L., and Staver, C.P. (2001) 'Ecological Management of Agricultural Weeds.', *Cambridge University Press*. [Preprint].
- Luna, J. M., and Staben, M.L. (2003) 'Sustainable Vegetable Production from Start-Up to Market.', *Natural Resource, Agriculture, and Engineering Service (NRAES)*. [Preprint].
- Pretty, J. (2002) 'Agri-Culture: Reconnecting People, Land and Nature.', *Earthscan Publications*. [Preprint].
- Scherr, S. J., and McNeely, J.A. (2007) 'Farming with Nature: The Science and Practice of Ecoagriculture.', *Island Press*. [Preprint].

BAB 8

MASA DEPAN PERLINDUNGAN TANAMAN BERKELANJUTAN

Oleh Rosfiansyah

Perlindungan tanaman berkelanjutan merupakan aspek krusial dari pertanian yang berfokus pada cara-cara yang ramah lingkungan dan efisien untuk melindungi tanaman dari organisme pengganggu tanaman yang meliputi hama, penyakit, dan gulma.

8.1 Aspek Perlindungan Tanaman Berkelanjutan

Masa depan perlindungan tanaman berkelanjutan di masa mendatang kemungkinan akan melibatkan beberapa aspek penerapan dan perkembangan penting, yaitu: penerapan teknologi tinggi seperti drone, sensor, sistem AI, pemantauan berbasis satelit maupun pemanfaatan biopestisida, pupuk hayati, varietas tahan yang mana kesemuanya dapat dikombinasikan dalam pengelolaan hama terpadu (PHT).

8.1.1 Pertanian Presisi dan Penerapan Teknologi Tinggi

Teknologi seperti drone, sensor, sistem AI dan sistem pemantauan berbasis satelit akan semakin banyak digunakan untuk memantau kondisi tanaman dan

mendeteksi masalah lebih awal (Belyakov & Nikolina, 2021; Kreuze, et.al, 2022; Reinders, et.al, 2021; Zhai, et.al, 2023). Data yang dikumpulkan tersebut dapat membantu dalam membuat keputusan yang lebih tepat dan lebih informatif. Teknologi pertanian tersebut merupakan wujud dari pertanian presisi yang memudahkan petani dalam menerapkan perlindungan tanaman hanya pada area yang membutuhkan, mengurangi penggunaan bahan kimia dan meminimalkan dampak terhadap lingkungan.

Pertanian presisi adalah strategi manajemen yang berfokus pada observasi, pengukuran, dan respons terhadap variabilitas pada tanaman, lahan, dan hewan menggunakan sejumlah teknologi yang berbeda (Anastasiou, et.al, 2023). Pertanian presisi merupakan pendekatan modern dalam pertanian yang memanfaatkan teknologi tinggi untuk meningkatkan efisiensi dan produktivitas sambil mengurangi dampak lingkungan. Prinsip dasarnya adalah memberikan perlakuan yang tepat pada waktu yang tepat dan di tempat yang tepat dengan memanfaatkan teknologi canggih seperti sensor, drone maupun analisis data untuk memantau dan mengelola tanaman dengan akurasi yang belum pernah ada sebelumnya (Sishodia et.al, 2020). Penggunaan sensor untuk memantau kesehatan tanaman, analisis Data maupun sistem AI untuk mendeteksi dan mengendalikan hama, serta drone untuk pemantauan dan aplikasi pestisida yang lebih efisien dapat memudahkan dan berkontribusi pada pengelolaan OPT yang lebih presisi dan ramah lingkungan.

Berikut adalah beberapa teknologi utama yang digunakan dalam pertanian presisi dalam perlindungan tanaman berkelanjutan:

1. Sensor dan IoT (*Internet of Things*):

Sensor dan satelit memberikan informasi untuk diproses dalam algoritma AI sehingga dapat memprediksi dan mengidentifikasi potensi ancaman terhadap OPT (Zhang et al., 2019).

Sensor Tanah: Mengukur kelembapan, pH, nutrisi tanah maupun perkembangan mikroorganisme tanah untuk memberikan data yang akurat dan real-time tentang kondisi tanah, sehingga mampu memprediksi adanya gangguan OPT ataupun ketahanan tanaman ketika diserang OPT.

Sensor Cuaca: Memantau kondisi cuaca seperti suhu, kelembapan, dan curah hujan yang dapat mempengaruhi pertumbuhan tanaman maupun perkembangan OPT sehingga mampu meramalkan tingkat perkembangan OPT.

Sensor Tanaman: Memantau kesehatan tanaman dengan mendeteksi tanda-tanda stres atau adanya gangguan OPT seperti adanya gejala kerdil, layu pada daun, klorosis pada tanaman maupun adanya tanaman yang mati.

Pemanfaatan *Internet of Things* (IoT) dimana sensor dan perangkat mengumpulkan dan mengirimkan informasi tentang kelembapan tanah, kondisi cuaca, dan kesehatan tanaman (Shafi et al., 2020), sehingga memungkinkan pengambilan keputusan yang tepat dalam perlindungan tanaman. Aplikasi IoT dapat membantu deteksi OPT secara dini, serta

mengotomatiskan respons untuk pengendalian OPT yang ditargetkan (Subeesh et al., 2021)

2. Sistem Pengolahan Data dan Analitik

Pengumpulan dan menganalisis *Big Data* dari berbagai sumber dapat menghasilkan keputusan yang lebih baik dan berbasis data dalam tindakan pengendalian OPT.

AI dan Machine Learning melalui algoritma merupakan alat yang dapat dimanfaatkan untuk memproses data, mendeteksi maupun mengidentifikasi adanya OPT, serta membuat prediksi dan rekomendasi mengenai tindakan yang harus diambil (Mishra et al., 2023), seperti waktu yang tepat untuk pengendalian OPT.

Pemodelan prediktif pemanfaatan algoritma AI untuk memperkirakan potensi ledakan OPT berdasarkan data historis dan terkini dengan pertimbangan beberapa faktor seperti kondisi cuaca, kesehatan tanah, dan karakteristik tanaman, model-model ini dapat membantu petani sehingga bisa proaktif dalam strategi perlindungan tanaman (Chete et al., 2019)

3. Teknologi GPS dan Sistem Pemetaan:

GPS (*Global Positioning System*) merupakan alat yang dapat digunakan untuk pemetaan presisi lahan pertanian dan untuk navigasi titik koordinat adanya gangguan OPT di lahan pertanian. Kemudian GIS (*Geographic Information Systems*) membantu dalam pembuatan peta tematik yang menunjukkan distribusi

nutrisi tanah, potensi hasil, dan kebutuhan irigasi maupun adanya gangguan OPT

4. Drone dan Citra Satelit:

Drone merupakan alat yang digunakan untuk pemantauan tanaman dari udara, penilaian kerusakan karena adanya OPT, dan penyemprotan pestisida atau pupuk dengan presisi tinggi. Kemudian dengan citra satelit menyediakan gambaran besar dari kondisi tanaman dan lahan karena gangguan OPT, serta perubahan lingkungan yang dapat mempengaruhi hasil pertanian.

5. Sistem Otomatisasi

Mesin dan alat Pertanian Otomatis dapat dioperasikan secara otomatis atau semi-otomatis, memungkinkan pengolahan lahan, pemupukan, penyemprotan pestisida dan panen dengan presisi yang lebih tinggi.

Adanya penerapan teknologi-teknologi ini, dapat meningkatkan hasil panen dalam budidaya pertanian, mengurangi penggunaan sumber daya, penyemprotan pestisida secara tepat dosis dan meminimalkan dampak negatif terhadap lingkungan. Ini juga memungkinkan petani untuk membuat keputusan yang lebih informasional dan strategis berdasarkan data yang akurat dan real-time.

6. Biopestisida dan Produk Alami

Biopestisida dan produk alami menawarkan alternatif ramah lingkungan untuk perlindungan

tanaman. Di Indonesia, pengelolaan OPT ramah lingkungan diperkuat dengan adanya undang-undang PHT Nomor 22 Tahun 2019 tentang Sistem Budi Daya Pertanian Berkelanjutan pada pasal 48 dengan harapan mulai sekarang hingga dimasa mendatang para pelaku budidaya pertanian memiliki kecenderungan yang meningkat untuk beralih ke biopestisida yang berbasis bahan alami ataupun mikroorganisme yang dapat mengendalikan OPT secara terarah dengan dampak lingkungan yang minimal (Lengai et al., 2018). Biopestisida dapat berasal dari organisme hidup seperti bakteri, jamur, virus, nematoda, protozoa maupun bahan nabati dari tumbuhan.

Selain itu, produk alami yang berasal dari tumbuhan, berupa ekstrak bahan nabati yang mengandung metabolit sekunder memiliki sifat pestisida sehingga penerapannya sejalan dengan permintaan akan pertanian berkelanjutan, sehingga mengurangi ketergantungan pada bahan kimia sintetis (Lamichhane et al., 2016). Walaupun masih terdapat tantangan dalam formulasi dan standarisasi, pemanfaatan pestisida nabati berkontribusi pada lanskap pertanian yang lebih sadar lingkungan dan beragam secara biologis, dengan menekankan pentingnya memanfaatkan pertahanan alam untuk perlindungan tanaman yang efektif (Egan *et al.*, 2021).

Biopestisida dalam perlindungan tanaman berkelanjutan merupakan alternatif yang layak sebagai pengganti pestisida kimia konvensional. Pemanfaatan mikroorganisme baik sebagai patogen hama invertebrata, mikroorganisme antagonis,

mikroorganisme endofit ataupun ekstrak nabati tanaman merupakan alternatif pengendalian yang tepat sasaran sekaligus meminimalkan dampak buruk pada spesies nontarget dan lingkungan (Verma et al., 2021). Penerapannya sebagai alternatif pengendalian OPT tersebut sejalan dengan pergeseran global menuju pertanian berkelanjutan, yang menekankan pentingnya memanfaatkan mekanisme perlindungan bawaan dalam tanaman dan mengeksplorasi biopestisida untuk mendorong pendekatan yang seimbang dan ramah lingkungan terhadap pengelolaan OPT (Nollet et al., 2023)

7. Pengembangan Varietas Tanaman Tahan

Dengan kemajuan dalam bioteknologi dan rekayasa genetika, varietas tanaman yang lebih tahan terhadap hama dan penyakit dapat dikembangkan. Ini akan mengurangi ketergantungan pada pestisida kimia dan mengurangi kerugian panen.

Varietas tanaman tahan merupakan komponen kunci dari pengelolaan OPT dan salah satu taktik pengendalian yang paling diapresiasi dalam pertanian berkelanjutan (Horgan et al., 2020 ; El-Dessouki et al., 2022). Konsekuensi dari karakteristik tanaman yang diwariskan membuat tingkat kerusakan tanaman menjadi rendah daripada tanaman yang tidak memiliki kualitas ketahanan. Varietas tanaman yang tahan OPT mengurangi jumlah OPT dengan meningkatkan toleransi mereka terhadap kerusakan. Pada hubungan interaksi antara serangga dan tanaman terdapat tiga jenis

resistensi, yaitu antibiosis, antixenosis (non-preferensi), dan toleransi (Koch et al., 2016 ; Iqbal et al., 2018).

Resistensi antibiotik mempengaruhi biologi serangga untuk mengurangi populasinya dan kerusakan selanjutnya sehingga mengakibatkan kematian yang lebih tinggi atau berkurangnya umur dan reproduksi serangga. Resistensi antixenosis merupakan ketidaksukaan hama terhadap tanaman yang resisten dan memengaruhi sifat perilaku hama (Painter, 1951; Smith, 2005). Toleransi merupakan resistensi di mana tanaman dapat bertahan atau pulih dari kerusakan yang disebabkan oleh populasi hama (Smith, 2005).

8. Nanoteknologi

Nanoteknologi merevolusi perlindungan tanaman melalui ketepatan dan keberlanjutan. Nanopartikel yang direkayasa memungkinkan pengendalian OPT dengan pestisida yang tepat sasaran sehingga mengurangi dampak lingkungan (De et al., 2014). Nanosensor menyediakan pemantauan waktu nyata, memungkinkan deteksi dini OPT (Kashyap et al., 2019). Pendekatan nanoteknologi membantu meningkatkan kesehatan dan ketahanan tanaman secara keseluruhan.

Meskipun nanoteknologi sangat menjanjikan dimasa mendatang tapi masih memerlukan berbagai pertimbangan untuk kerangka peraturan dan implikasi lingkungan untuk memastikan implementasi yang dapat dipertanggung jawabkan dan aman dalam pertanian (Iavicoli et al., 2017).

Seiring dengan kemajuan penelitian, nanoteknologi muncul sebagai alat yang efektif dalam mengatasi tantangan pada perlindungan tanaman berkelanjutan. Penggunaan nanomaterial untuk pemanfaatan pestisida dalam mengendalikan OPT secara tepat sasaran merupakan aplikasi inovatif dalam perlindungan tanaman (Mittal et.al., 2020).

Nanocarrier yang direkayasa yang memungkinkan aplikasi pestisida yang tepat dan terkendali, mengurangi dampak lingkungan dan meningkatkan daya bunuh. Nanomaterial ini dapat membungkus bahan aktif, melindunginya dari degradasi dan memastikan pengendalian yang optimal ke hama target (Khandelwal et.al., 2016). Pendekatan yang ditargetkan ini meminimalkan efek yang tidak sesuai target dan kebutuhan penggunaan pestisida yang berlebihan.

Nanosensor mengubah pemantauan kesehatan tanaman. Perangkat mini ini dapat mendeteksi perubahan pada tingkat molekuler, memberikan wawasan waktu nyata tentang kondisi tanaman (Giraldo et.al., 2019). Nanosensor mengukur parameter seperti kadar nutrisi, kadar air, dan penyebab OPT, sehingga petani dapat membuat keputusan proaktif untuk pengelolaan tanaman yang lebih optimal (Mahesho et al., 2023). Integrasi nanomaterial dan nanosensor menggambarkan potensi nanoteknologi untuk merevolusi perlindungan tanaman yang menawarkan solusi yang berkelanjutan, efisien, dan ramah lingkungan untuk pertanian modern (Sohail et al., 2019).

8.2 Penunjang Perlindungan Tanaman Berkelanjutan

Perlindungan tanaman berkelanjutan perlu ditunjang beberapa aspek penting agar dapat berjalan dengan baik diantaranya pendidikan dan kesadaran masyarakat, regulasi dan kebijakan pemerintah serta adanya kolaborasi dan penelitian.

8.2.1 Pendidikan dan Kesadaran

Meningkatnya kesadaran tentang pentingnya perlindungan tanaman berkelanjutan akan memotivasi petani untuk mengadopsi praktik yang lebih ramah lingkungan dan efisien.

Pendidikan dan kesadaran tentang perlindungan tanaman berkelanjutan sangat penting untuk memastikan praktik pertanian yang ramah lingkungan dan berkelanjutan. Berikut adalah beberapa aspek penting dalam hal ini:

1. Pendidikan tentang Perlindungan Tanaman Berkelanjutan
 - a. Kurikulum Pendidikan: Pendidikan tentang perlindungan tanaman berkelanjutan harus dimasukkan dalam kurikulum di sekolah-sekolah pertanian dan universitas. Ini termasuk pemahaman tentang pestisida organik, teknik pengelolaan hama terpadu (PHT), dan praktik pertanian yang ramah lingkungan.
 - b. Pelatihan Praktis: Program pelatihan untuk petani dan praktisi pertanian (PPL dan POPT) tentang metode perlindungan tanaman berkelanjutan sangat

penting seperti workshop, kursus, dan demonstrasi lapangan, termasuk dalam hal ini informasi mengenai pengelolaan tanah, teknik irigasi, dan penggunaan teknologi baru yang dapat dipadukan dalam PHT.

- c. Sumber Daya dan Teknologi: Menyediakan akses ke buku panduan, video tutorial, dan alat digital yang membantu petani dan praktisi pertanian dalam memahami dan menerapkan teknik perlindungan tanaman yang berkelanjutan yang ramah lingkungan.

2. Kesadaran dan Perilaku

Mendidik, memberi informasi, dan meningkatkan kesadaran di antara masyarakat umum mengenai penggunaan metodologi perlindungan tanaman berkelanjutan sangat diperlukan agar keberhasilan implementasi kebijakan mengenai pengendalian hayati dapat tercapai (Basir et. al., 2018). Hal ini dapat dilakukan dengan dua cara yaitu:

- a. Kampanye Kesadaran: Kampanye untuk meningkatkan kesadaran masyarakat tentang pentingnya perlindungan tanaman yang berkelanjutan yang dapat dilakukan melalui media sosial, seminar, dan program komunitas.
- b. Demonstrasi dan Contoh Kasus: Menampilkan contoh nyata dari petani yang berhasil menerapkan praktik berkelanjutan dapat memberikan inspirasi dan motivasi kepada petani yang lain.

8.2.2 Regulasi dan Kebijakan

Kebijakan Pemerintah dalam penyusunan dan penerapan kebijakan dapat mendukung praktik perlindungan tanaman dalam budidaya pertanian berkelanjutan, kemudian adanya pemberian insentif bagi petani dapat memotivasi petani dalam menerapkan teknik perlindungan tanaman yang ramah lingkungan.

Mendorong adanya penggunaan standar dan sertifikasi untuk produk pertanian berkelanjutan yang memberikan pengakuan bagi praktik yang baik dapat juga memotivasi petani agar tetap konsisten dalam perlindungan tanaman berkelanjutan, disamping itu juga membantu konsumen membuat pilihan yang informatif terhadap produk pertanian yang sehat karena adanya penerapan perlindungan tanaman ramah lingkungan.

Kerja sama dengan pembuat kebijakan untuk mengembangkan regulasi yang mendukung praktik perlindungan tanaman berkelanjutan dan penggunaan teknologi baru dapat membantu petani agar tetap konsisten dalam penerapan perlindungan tanaman berkelanjutan dengan hasil tetap melimpah, kemudian hal tersebut juga sekaligus akan memudahkan bagi praktisi pertanian dalam mentransfer pemahaman perlindungan tanaman berkelanjutan bagi petani.

8.2.3 Kolaborasi dan Penelitian

Mendorong kerjasama antara pemerintah, lembaga swadaya masyarakat, universitas, dan sektor swasta untuk menyebarluaskan pengetahuan dan teknologi. Penelitian yang berkelanjutan dan adanya kolaborasi antara peneliti,

petani, swasta dan pihak-pihak terkait lainnya akan penting untuk mengembangkan solusi baru dan memperbaiki metode perlindungan tanaman yang ada.

Kolaborasi dan penelitian dalam perlindungan tanaman berkelanjutan adalah kunci untuk menciptakan sistem pertanian yang efisien, ramah lingkungan, dan mampu memenuhi kebutuhan pangan global. Berikut adalah beberapa aspek penting dalam kolaborasi dan penelitian untuk perlindungan tanaman berkelanjutan:

1. Pendekatan Multidisipliner

Kolaborasi Ilmiah: Peneliti dari lintas disiplin ilmu seperti agribisnis, agronomi, pemuliaan tanaman, ilmu tanah, mikrobiologi, entomologi, dan patologi tanaman perlu bekerja sama untuk memahami dan mengatasi tantangan dalam perlindungan tanaman sehingga implementasi perlindungan tanaman berkelanjutan tidak menjadi parsial.

Partisipasi Industri: Kerjasama dengan industri pertanian dan teknologi untuk mengembangkan alat dan teknologi baru serta biopestisida yang dapat meningkatkan efisiensi perlindungan tanaman.

2. Teknologi dan Inovasi

Riset terbaru dapat mendukung penelitian untuk mengembangkan teknik perlindungan tanaman baru dan inovatif yang lebih efisien dan ramah lingkungan.

Penelitian bioteknologi mengenai penggunaan organisme genetik rekayasa untuk menciptakan varietas tanaman yang lebih tahan terhadap gangguan OPT

ataupun pemanfaatan mikroorganisme sebagai sumber biopestisida.

Teknologi Digital dengan pemanfaatan sensor, drone, dan teknologi informasi untuk pemantauan tanaman dan deteksi dini terhadap penyakit serta hama.

Kemudian adanya adopsi teknologi terbaru seperti aplikasi berbasis data dan alat monitoring, untuk meningkatkan efektivitas perlindungan tanaman berkelanjutan

3. Pendekatan Berkelanjutan

Pengelolaan Hama Terpadu (PHT) dapat mengintegrasikan berbagai teknik perlindungan tanaman seperti pengendalian fisik dan mekanik, pengendalian secara kultur teknis, pengendalian hayati, penggunaan varietas tahan, dan aplikasi pestisida yang tepat untuk mengurangi dampak lingkungan. Kemudian keterpaduan tersebut bisa dilanjutkan dengan adanya penelitian dan penerapan metode pertanian organik yang minim penggunaan bahan kimia sintetis dan lebih bergantung pada teknik alami untuk menjaga kesehatan tanah dan tanaman.

4. Penguatan Kapasitas

Memberikan pelatihan dan edukasi kepada petani dan profesional pertanian tentang praktik perlindungan tanaman yang berkelanjutan dan teknologi terbaru dapat memperkuat kapasitas mereka dalam perlindungan tanaman. Kemudian dari sisi kelembagaan adanya kolaborasi internasional dengan lembaga dan organisasi internasional untuk berbagi pengetahuan, pengalaman, dan teknologi dalam perlindungan tanaman akan dapat

mempercepat kapasitas petani, praktisi maupun peneliti dalam perlindungan tanaman berkelanjutan.

5. Pengumpulan dan Analisis Data

Melakukan penelitian lapangan untuk memahami interaksi antara tanaman, OPT dan lingkungan serta mengembangkan solusi berbasis data dapat menambah wawasan dan pengalaman dalam melakukan strategi perlindungan tanaman.

Adanya pemanfaatan model matematis dan simulasi komputer untuk memprediksi penyebaran OPT serta merancang strategi pengendalian dapat membantu dalam menganalisis strategi yang tepat dalam pengendalian OPT berkelanjutan.

Perlindungan tanaman berkelanjutan adalah tentang mencari keseimbangan antara produktivitas, kesehatan lingkungan, dan kesejahteraan ekonomi. Masa depan akan menuntut inovasi perlindungan tanaman ramah lingkungan secara terus-menerus yang harus diselaraskan dengan pendekatan yang adaptif untuk menghadapi tantangan yang ada sehingga perlindungan tanaman berkelanjutan dapat berkembang dan lebih maju mengikuti perkembangan zaman.

DAFTAR PUSTAKA

- Anastasiou, E, Fountas, S, Voulgaraki M, Psiroukis V, Koutsiaras M, Kriezi O, Lazarou E, Vatsanidou A, Fu L, Di Bartolo F, Barreiro-Hurle J, Gomez-Barbero M. 2023. Precision farming technologies for crop protection: A meta-analysis. *Smart Agriculture Technology*, 5(100323) .
<https://doi.org/10.1016/j.atech.2023.100323>.
- Basir FA, Banerjee A, Ray S. 2019. Role of farming awareness in crop pest management - A mathematical model. *Journal of Theoretical Biology*, 461 (59-67).
<https://doi.org/10.1016/j.jtbi.2018.10.043>.
- Belyakov NV, Nikolina NV. 2021. Plant protection technologies: from advanced to innovative. *IOP Publishing: Journal of Physics, Conference Series*, 1942 (012072)
- De A, Bose R, Kumar A, Mozumdar S. Targeted delivery of pesticides using biodegradable polymeric nanoparticles. New Delhi: Springer India. 2014;10:978-81. doi:10.1088/1742-6596/1942/1/012072
- Egan PA, Chikoye D, Green KK, Tamò M, Feit B, Kumar PL, Bandyopadhyay R, Tepa-Yotto G, Ortega-Beltran A, Sæthre M-G, Coyne DL, Legg JP, Jonsson M. 2021. Harnessing nature-based solutions for smallholder plant health in a changing climate. *SLU Global*, p 1-31.

- El-Dessouki, W. A., Mansour, M. R. K., and Eryan, N. L. 2022. Effects of Certain Weather, Biotic Factors and Chemical Components on the Population of Aphids in Egyptian Wheat Fields. *Egypt. Acad. J. Biol. Sci. A, Entomology*, 15 (1), 1–13. doi:10.21608/eajbsa.2022.212703
- Giraldo JP, Wu H, Newkirk GM, Kruss S. 2019. Nanobiotechnology approaches for engineering smart plant sensors. *Nature Nanotechnology*, 14(6):541-553.
- Horgan, F. G., Garcia, C. P. F., Haverkort, F., de Jong, P. W., and Ferrater, J. B. 2020. Changes in Insecticide Resistance and Host Range Performance of Planthoppers Artificially Selected to Feed on Resistant Rice. *Crop Prot.*, 127(104963). doi:10.1016/j.cropro.2019.104963
- Iavicoli I, Leso V, Beezhold DH, Shvedova AA. 2017. Nanotechnology in agriculture: Opportunities, toxicological implications, and occupational risks. *Toxicology and applied pharmacology*, 329(96-111).
- Iqbal, M. A., Hassan, M. W., Hafiz, M. U. R., Muhammad, A., and Moazzam, J. 2018. Evaluation of Different Wheat Varieties for Resistance against Aphid, *Schizaphis graminum* R. (Homoptera: Aphididae) under Laboratory Conditions. *Asian J. Agric. Biol.*, (6) 549–555.

- Kashyap PL, Kumar S, Jasrotia P, Singh DP, Singh GP. 2019. Nanosensors for plant disease diagnosis: Current understanding and future perspectives. *Nanoscience for Sustainable Agriculture*, p. 189-205
- Khandelwal N, Barbole RS, Banerjee SS, Chate GP, Biradar AV, Khandare JJ, et al. 2016. Budding trends in integrated pest management using advanced micro- and nano-materials: Challenges and perspectives. *Journal of Environmental Management*, 184:157-169.
- Koch, M. S., Ward, J. M., Levine, S. L., Baum, J. A., Vicini, J. L., and Hammond, B. G. (2015). The Food and Environmental Safety of Bt Crops. *Front. Plant Sci.* 06(283). doi:10.3389/fpls.2015.00283
- Kreuze J, Adewopo J, Selvaraj M, Mwanzia L, Kumar PL, Cuellar WJ, Legg JP, Hughes DP, Blomme G. 2022. in Chapter 9. Innovative Digital Technologies to Monitor and Control Pest and Disease Threats in Thiele G, Friedmann M, Campos H, Polar V, Bentley JW. Ed. Root, Tuber, and Banana (RT&B) Cropping Systems: Progress and Prospects. Springer Cham.
- Lamichhane JR, Dachbrodt-Saaydeh S, Kudsk P, Messéan A. 2016. Toward a reduced reliance on conventional pesticides in European agriculture. *Plant Disease*, 100(1):10-24.
- Lengai GM, Muthomi JW. 2018. Biopesticides and their role in sustainable agricultural production. *Journal of Biosciences and Medicines*, 6(6):7

- Mahesha KN, Guddaraddi A, Reddy H, GV SK. 2023. Unleashing the Potential of Nanotechnology in Agriculture. *Advanced Innovative Technologies in Agricultural Engineering for Sustainable Agriculture*; p. 97.
- Mittal D, Kaur G, Singh P, Yadav K, Ali SA. 2020. Nanoparticle-based sustainable agriculture and food science: Recent advances and future outlook. *Frontiers in Nanotechnology*, 2(579954).
- Nollet LM, Mir SR. (Eds.). 2023. Biopesticides Handbook. CRC Press.
- Painter, R. H. 1951. Insect Resistance in Crop Plants. *Soil Sci.* 72 (6), 481. LWW. doi:10.1097/00010694-195112000-00015
- Reinders MJ, Riemens MM, & Bremmer J. 2021. The future of crop protection in Europe. EU. <https://doi.org/10.2861/086545>
- Sishodia RP, Ray RL, Singh SK. 2020. Applications of remote sensing in precision agriculture: A review. *Remote Sensing*, 12(19):3136
- Smith, C. M. (Editor) (2005). Plant Resistance to Arthropods: Molecular and Conventional Approaches. Dordrecht: Springer Netherlands.
- Sohail MI, Waris AA, Ayub MA, Usman M, Ur Rehman, MZ, Sabir M, et al. 2019. Environmental application of nanomaterials: A promise to sustainable future. In Comprehensive analytical chemistry. *Sustainable Agriculture*, 87(1-54).

- Verma DK, Guzmán KNR, Mohapatra B, Talukdar D, Chávez-González ML, Kumar V, Srivastava S, Singh S, Yulianto R, Malar SE, Ahmad A, Utama GL, Aguilar CN. 2021. Recent trends in plant-and microbe-based biopesticide for sustainable crop production and environmental security. *Recent Developments in Microbial Technologies*, p. 1-37
- Zhai C, Qiu W, Weckler P, He X, Jabran K. 2023. Editorial: Advanced application technology for plant protection: Sensing, modelling, spraying system and equipment. *Front. Plant Sci.* 14 (1113359). doi:10.3389/fpls.2023.1113359

BIODATA PENULIS



Sofian, S.P., M.Sc

Dosen Program Studi Agroekoteknologi
Fakultas Pertanian Universitas Mulawarman

Penulis lahir di Samarinda tanggal 18 Agustus 1980. Penulis adalah dosen tetap pada Program Studi Agroekoteknologi Universitas Mulawarman. Penulis menyelesaikan pendidikan Sarjana pada program studi Ilmu Hama dan Penyakit tumbuhan Universitas Mulawarman pada tahun 2004 dan melanjutkan studi Master of Science pada Program Studi Fitopatologi Universitas Gajah Mada lulus tahun 2012.

BIODATA PENULIS



Kadis Mujiono, S.P., M.Sc., Ph.D

Dosen Program Studi Agroekoteknologi Fakultas Pertanian,
Universitas Mulawarman

Penulis lahir di Banyuwangi tanggal 23 Maret 1981. Dosen Program Studi Agroekoteknologi Fakultas Pertanian, Universitas Mulawarman. Penulis menyelesaikan pendidikan Sarjana Pertanian pada Program Studi Ilmu Hama dan Penyakit Tumbuhan Fakultas Pertanian Universitas Mulawarman lulus pada tahun 2005, dan melanjutkan studi Master of Science pada Program Studi Ilmu Hama Tumbuhan (Agriculture entomology) Fakultas Pertanian Universitas Gadjah Mada lulus tahun 2012. Kemudian penulis melanjutkan studi doktoral pada Institute of Plant Science and Resources, Graduate School of Enviromental and Life Science, Okayama University, Japan, lulus pada tahun 2020. Penulis aktif melakukan penelitian dengan bidang kajian *Plant-Insect Interactions*, ketahanan tanaman terhadap hama, dan pengendalian hama tanaman. Beberapa publikasi hasil penelitian telah diterbitkan pada jurnal-jurnal internasional pereputasi dan jurnal nasional terakreditasi. Penulis juga aktif mengajar pada jenjang S1 Program Studi Agroekoteknologi, S2 Ilmu Pertanian Tropika

Basah, dan S3 Ilmu Pertanian Fakultas Pertanian, Universitas Mulawarman. Selain itu, penulis juga aktif dalam organisasi keilmuan seperti Perhimpunan Entomologi Indonesia, Perhimpunan Ilmu Gulma Indonesia, dan International society of chemical ecology.

BIODATA PENULIS



Dr. Ir. Encik Akhmad Syaifudin, M.P
Dosen Program Studi Agroekoteknologi
Fakultas Pertanian Universitas Mulawarman

Penulis lahir di Tenggarong, Kutai Kartanegara pada 24 Agustus 1962. Sebagai dosen yang berkair dari awal di Prodi Agroekoteknologi Fakultas Pertanian, Universitas Mulawarman, penulis yang biasa dipanggil pak Encik ini mengabdikan diri sejak 1988. Lulus Sarjana Pertanian dari Jurusan Budidaya Pertanian, Fakuktas Pertanian Universitas Mulawarman (1987), Lulus Magister Pertanian pada Jurusan Ilmu Tanaman Program Pascasarjana UB-UGM (1993) dan lulus Doktor Jurusan Ilmu-ilmu Pertanian Universitas Padjadjaran (1996).

Saat ini penulis mengampu matakuliah Ilmu Gulma, Pengendalian Gulma dan Tumbuhan Invasif Terpadu, Statistika Pertanian, dan Rancangan Percobaan di S1 Agroekoteknologi, serta Ilmu Gulma Lanjutan dan Statistika lanjutan di S2 Ilmu Pertanian.

Penulis Menikah dengan Dr. Ir Hj Ni'matuljannah Akhsan MP, dan dikaruniai dua anak yaitu dr. E. Azizannury Mahfud dan E. Ahmad Shafwan Mahfud, serta dikarunian dua cucu.

BIODATA PENULIS



Rosfiansyah, SP, M.Si, Ph.D

Dosen Program Studi Agroekoteknologi
Fakultas Pertanian Universitas Mulawarman

Penulis lahir di Balikpapan tanggal 23 Desember 1979. Penulis adalah dosen tetap pada Program Studi Agroekoteknologi Universitas Mulawarman. Menyelesaikan pendidikan S1 pada program studi Ilmu Hama dan Penyakit Tumbuhan Universitas Mulawarman pada tahun 2003 dan menyelesaikan S2 pada program Entomologi pasca sarjana Institut Pertanian Bogor pada tahun 2009. Penulis berkesempatan melanjutkan studi Doktor pada tahun 2019 pada Graduate School of Bioresource and Bioenvironmental Sciences pada laboratorium Entomologi di Kyushu University, Jepang dan menyelesaikannya pada tahun 2022. Penulis pernah bergabung pada Entomological Society of Japan dari 2020-2022 dan Perhimpunan Entomologi Indonesia (PEI) dari 2022 hingga sekarang dan aktif sebagai sekretaris PEI cabang Samarinda.