

SISTEM PERTANIAN BERKELANJUTAN



**Roosganda Elizabeth, Silvia Permata Sari, Ika Purnamasari, Ilham,
Eliyani, Hermawati Cahyaningrum, Jefri Sembiring, I Wayan Suanda,
Rivandi Pranandita Putra, Indah Sriwahyuni, Victor Bintang Panunggul**

SISTEM PERTANIAN BERKELANJUTAN

**Roosganda Elizabeth
Silvia Permata Sari
Ika Purnamasari
Ilham
Eliyani
Hermawati Cahyaningrum
Jefri Sembiring
I Wayan Suanda
Rivandi Pranandita Putra
Indah Sriwahyuni
Victor Bintang Panunggul**



GET PRESS INDONESIA

SISTEM PERTANIAN BERKELANJUTAN

Penulis :

Roosganda Elizabeth

Silvia Permata Sari

Ika Purnamasari

Ilham

Eliyani

Hermawati Cahyaningrum

Jefri Sembiring

I Wayan Suanda

Rivandi Pranandita Putra

Indah Sriwahyuni

Victor Bintang Panunggul

ISBN : 978-623-125-231-9

Editor : Ari Yanto., M.Pd

Penyunting : Tri Putri Wahyuni., S.Pd

Desain Sampul dan Tata Letak : Atyka Trianisa, S.Pd

Penerbit : GET PRESS INDONESIA

Anggota IKAPI No. 033/SBA/2022

Redaksi :

Jln. Palarik Air Pacah No 26 Kel. Air Pacah

Kec. Koto Tangah Kota Padang Sumatera Barat

Website : www.getpress.co.id

Email : adm.getpress@gmail.com

Cetakan pertama, Juni 2024

Hak cipta dilindungi undang-undang

Dilarang memperbanyak karya tulis ini dalam bentuk dan
dengan cara apapun tanpa izin tertulis dari penerbit.

KATA PENGANTAR

Segala Puji dan syukur atas kehadiran Allah SWT dalam segala kesempatan. Sholawat beriring salam dan doa kita sampaikan kepada Nabi Muhammad SAW. Alhamdulillah atas Rahmat dan Karunia-Nya penulis telah menyelesaikan Buku Sistem Pertanian Berkelanjutan ini.

Buku Ini Membahas Pengantar Pertanian Berkelanjutan, Paradigma Pembangunan Pertanian Berkelanj Utan, Tantangan Perubahan Iklim Global, Pupuk Organik, Pengembangan Pupuk Hayati (Biofertilizer), Agen Hayati Pengendali Penyakit Tanaman, Biopestisida Dari Bahan Alam Dan Mikroorganisme, Rhizobia Pendukung Pertanian Berkelanjutan, Manipulasi Iklim Mikro Dalam Pertanian Berkelanjutan, Mikrobiom dan komunitas sintetik, Polutan Dan Agroekosistem.

Proses penulisan buku ini berhasil diselesaikan atas kerjasama tim penulis. Demi kualitas yang lebih baik dan kepuasan para pembaca, saran dan masukan yang membangun dari pembaca sangat kami harapkan.

Penulis ucapkan terima kasih kepada semua pihak yang telah mendukung dalam penyelesaian buku ini. Terutama pihak yang telah membantu terbitnya buku ini dan telah mempercayakan mendorong, dan menginisiasi terbitnya buku ini. Semoga buku ini dapat bermanfaat bagi masyarakat Indonesia.

Padang, Juni 2024

Penulis

DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR	i
DAFTAR ISI	ii
DAFTAR GAMBAR	vi
DAFTAR TABEL	viii
BAB 1 PENGANTAR PERTANIAN BERKELANJUTAN.....	1
1.1 Pendahuluan.....	1
1.2 Tinjauan Literatur	3
1.3 Hambatan, Kendala, Peluang, dan Tantangan:	7
1.4 Perspektif Inovasi dalam Model Bisnis Pertanian Berkelanjutan:	7
1.5 Penutup	10
DAFTAR PUSTAKA.....	11
BAB 2 PARADIGMA PEMBANGUNAN PERTANIAN BERKELANJUTAN.....	13
2.1 Pendahuluan.....	13
2.2 Pengenalan Paradigma Pembangunan Pertanian Berkelanjutan.....	14
2.3 Konsep dan Prinsip Pembangunan Pertanian Berkelanjutan.....	15
2.4 Teknik dan Praktik Pertanian Berkelanjutan.....	17
2.5 Peran Teknologi dalam Pembangunan Pertanian Berkelanjutan.....	19
2.6 Tantangan dan Peluang dalam Implementasi Pembangunan Pertanian Berkelanjutan	20
2.6.1 Tantangan Utama.....	20
2.6.2 Peluang yang Ada	21
2.7 Studi Kasus Pembangunan Pertanian Berkelanjutan.....	22
2.7.1 Implementasi Praktik Berkelanjutan.....	22
2.7.2 Hasil dan Dampak.....	23
2.7.3 Tantangan dan Pelajaran yang Dipetik.....	24
DAFTAR PUSTAKA.....	25
BAB 3 TANTANGAN PERUBAHAN IKLIM GLOBAL.....	27
3.1 Pendahuluan.....	27
3.2 Perubahan Iklim Global.....	28
3.3 Dampak Perubahan Iklim Terhadap Pertanian	30

3.3.1 Kenaikan tinggi muka air laut.....	32
3.3.2 Peningkatan kejadian iklim ekstrim	33
3.3.3 Kenaikan suhu udara	34
3.3.4 Perubahan pola dan intensitas curah hujan.....	36
DAFTAR PUSTAKA	38
BAB 4 PUPUK ORGANIK	41
4.1 Pendahuluan	41
4.2 PupukiOrganik Padat.....	42
4.2.1 PupukiKandang.....	42
4.2.2 Pupuk Kompos	46
4.2.3 Pupuk iHijau.....	49
4.3 PupukiOrganikiCair.....	51
DAFTAR PUSTAKA	54
BAB 5 PENGEMBANGAN PUPUK HAYATI.....	57
5.1 Pendahuluan	57
5.2 Bahan Baku Dan Proses Pembuatan Pupuk Hayati.....	59
5.2.1 Kompos.....	59
5.2.2 Pupuk Kandang.....	60
5.2.3 Limbah Pertanian	63
5.3 Mikroorganisme dalam Pupuk Hayati	68
5.4 Tantangan dan Peluang dalam Pengembangan Pupuk Hayati.....	75
DAFTAR PUSTAKA	78
BAB 6 AGEN PENGENDALI HAYATI PENYAKIT TUMBUHAN	81
6.1 Pendahuluan	81
6.2 Konsep Pengendalian Hayati.....	82
6.3 Agen Pengendali Hayati Penyakit Tumbuhan.....	85
6.3.1 Kelompok Jamur Antagonis.....	85
6.3.2 Kelompok Bakteri Antagonis	88
6.4 Mekanisme Pengendalian Hayati.....	89
6.5 Faktor – Faktor Yang Berpengaruh Terhadap Efektivitas Agen Hayati Penyakit Tumbuhan	92
DAFTAR PUSTAKA	94
BAB 7 BIOPESTISIDA DARI BAHAN ALAM DAN MIKROORGANISME.....	97
7.1 Pendahuluan	97

7.2 Tanaman sebagai Pestisida Nabati	100
7.3 Mikroorganisme	103
7.4 Patogen Serangga	104
7.4.1 Patogenesis Entomopatogen	105
7.5 Bakteri	108
7.6 Nematoda Entomopatogen	110
7.7 Virus Entomopatogenik	110
DAFTAR PUSTAKA.....	114
BAB 8 RHIZOBIA PENDUKUNG PERTANIAN	
BERKELANJUTAN	119
8.1 Pendahuluan.....	119
8.2 Rhizobia	121
8.3 Rizosfer	123
8.4 PGPR	127
8.4.1 Bacillus sp.	129
8.4.2 Pseudomonas sp.	131
8.4.3 Fungi Mikoriza Arbuskula (FMA)	132
8.4.4 Jamur Trichoderma sp.	134
8.5 Pertanian Berkelanjutan.....	135
DAFTAR PUSTAKA.....	141
BAB 9 MANIPULASI IKLIM MIKRO DALAM	
PERTANIAN BERKELANJUTAN.....	155
9.1 Pendahuluan.....	155
9.2 Komponen Iklim Mikro	156
9.3 Model Manipulasi Iklim Mikro dalam Pertanian	161
9.4 Upaya-Upaya Manipulasi Iklim Mikro Semi Terkendali dalam Pertanian	162
9.5 Penutup	169
DAFTAR PUSTAKA.....	171
BAB 10 MIKROBIOM DAN KOMUNITAS SINTETIK.....	175
10.1 Pendahuluan.....	175
10.2 Manfaat Mikrobiom Bagi Tanaman.....	177
10.3 Komunitas Mikroba Sintetik.....	180
DAFTAR PUSTAKA.....	185
BAB 11 POLUTAN DAN AGROEKOSISTEM.....	187
11.1 Pendahuluan.....	187
11.2 Polusi Udara	188

11.3 Polusi Air 189

11.4 Polusi Tanah..... 191

DAFTAR PUSTAKA 202

BIODATA PENULIS

DAFTAR GAMBAR

Gambar 3.1. Rata-rata karbon dioksida atmosfer bulanan yang diukur di Observatorium Mauna Loa, Hawai	29
Gambar 3.2. Konsentrasi CO ₂ Atmosfer lima tahun terakhir di Observatorium Mauna Loa, Hawai	30
Gambar 3.3. Dampak perubahan iklim pada sektor pertanian.....	31
Gambar 3.4. Dampak scenario kenaikan 1mm muka air laut terhadap kehilangan produksi padi dalam ton	33
Gambar 3.5. Data historis produksi padi Indonesia tahun 1985-2015 berdasarkan data BPS dan Kementerian Pertanian.....	35
Gambar 3.6. Luas tanaman padi terkena kekeringan dan banjir periode 1989-2015.....	34
Gambar 3.7. Perubahan suhu udara rata-rata tahunan di Indonesia (dalam °C) berdasarkan rata-rata ensambel multimodel dari 24 model GCM CMIP5 untuk skenario RCP (RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0 dan RCP8.5) pada periode 30 tahunan 2011-2040, 2041-2070 dan 2071-2100. Perubahan dihitung relatif terhadap periode baseline 1981-2010.....	35
Gambar 3.8. Proyeksi perubahan produksi padi pada tahun 1939-2042 dengan menggunakan indikator perubahan suhu udara.....	36
Gambar 3.9. Proyeksi perubahan produksi padi pada tahun 1939-2042 dengan menggunakan indikator perubahan suhu udara.....	37
Gambar 4.1. Pupuk Kandang	43
Gambar 4.2. Ilustrasi Pupuk Kompos	47
Gambar 4.3. Sumber Pupuk Hijau	50
Gambar 4.4. Bioaktivator EM4.....	52

Gambar 4.5. Proses Pembuatan Organik Cair.....	53
Gambar 6.1. Kelebihan dan kekurangan agen pengendali hayati dibandingkan pestisida sintetis.....	84
Gambar 6.2. Mekanisme pengendalian hayati penyakit tumbuhan.....	91
Gambar 6.3. Mekanisme hiperparasit <i>Trichoderma</i> <i>harzianum</i> terhadap <i>Rhizoctonia solani</i>	92
Gambar 7.1. Serangan Hama wereng	98
Gambar 7.2. Pengendalian serangga hama	99
Gambar 7.3. Tanaman berpotensi sebagai insektisida.....	101
Gambar 7.5. Serangga terpapar entomopathogen	108
Gambar 7.6. <i>B.thuringiensis</i> subsp. spora israelensis dalam vakuola makanan <i>T. pyriformis</i> (A) dan larva <i>Aedes aegypti</i> instar kedua (B).	109
Gambar 8.1. Bintil (Nodul) pada Akar Kacang Tanah yang dibentuk Rhizobium	122
Gambar 8.2. Beberapa Jalur Biokimia Pelarutan Fosfat oleh Bakteri Tanah	129
Gambar 8.3. Pembuatan Pupuk Biodinamik dari Tanduk Sapi Berbasis Mikroba.....	138
Gambar 9.1. Transformasi pestisida dan pengaruhnya.....	159
Gambar 10.1. (Mikrobioma Tanah).....	176
Gambar 10.2. (Simbiosis bakteri Rhizobium sp. dengan akar tanaman)	178
Gambar 10.3. (Siklus Karbon)	179
Gambar 10.4. (Mikroorganisme fungsional melindungi perakaran dari patogen penyakit akar).....	180
Gambar 10.5. (Kolonisasi mikroba digambarkan dalam relung tanaman yang berbeda: Rhizosfer, filosfer dan endosfer akar, batang, daun, dan biji-bijian.)	181
Gambar 10.6. (Kolonisasi mikroba digambarkan dalam relung tanaman yang berbeda: Rhizosfer, filosfer dan endosfer akar, batang, daun, dan biji-bijian.)	181

DAFTAR TABEL

Tabel 4.1. Kandungan Unsur Hara Berbagai Hewan Ternak	44
Tabel 6.1. Agen pengendali hayati dari kelompok jamur	86
Tabel 6.2. Agen pengendali hayati dari kelompok bakteri	88
Tabel 6.3. Mekanisme pengendalian hayati penyakit tumbuhan	90
Tabel 10.1. Status berbagai inokulan mikroba dikembangkan sebagai komunitas mikroba tersintesis yang digunakan untuk meningkatkan serapan hara dan perlindungan terhadap patogen tanaman.....	182

BAB 1

PENGANTAR PERTANIAN BERKELANJUTAN

Oleh Roosganda Elizabeth

1.1 Pendahuluan

Pembangunan pertanian berkelanjutan selalu menjadi tren issue dan krusial dalam menghadapi tantangan global terkait pangan, lingkungan, dan ketahanan ekonomi. Dalam menghadapi kompleksitas ini, penyuluhan diidentifikasi sebagai kunci untuk meningkatkan pengetahuan dan keterampilan petani. Pendahuluan ini membahas latar belakang, urgensi, dan peran penyuluhan dalam mencapai pembangunan SDM pertanian. Tulisan ini menyajikan pembahasan lebih mengenai peran penyuluhan dalam pembangunan pertanian berkelanjutan, fokus pada pengembangan Sumber Daya Manusia (SDM) pertanian. Dalam konteks ini, dijelaskan konsep penyuluhan, strategi efektif, dan dampak positifnya terhadap pertumbuhan ekonomi sektor pertanian. Kesimpulan artikel memberikan saran kebijakan untuk mendukung pembangunan SDM pertanian melalui penyuluhan.

Sebagai sektor vital dalam kehidupan manusia dan perekonomian global, dalam beberapa dekade terakhir, pertanian mengalami transformasi signifikan akibat perubahan iklim, urbanisasi, dan perkembangan teknologi. Kondisi ini menciptakan tantangan baru yang memerlukan pendekatan inovatif, terutama dengan adanya kebutuhan untuk mencapai keberlanjutan dalam praktik pertanian. Berbagai literatur telah menyoroti kompleksitas perubahan ini, diantaranya yang mengidentifikasi dan mengkaji dampak perubahan iklim pada produksi pangan (Smith. 2010), maupun yang membahas dari sisi pentingnya pertanian berkelanjutan dalam menghadapi tekanan lingkungan (Davis. 2015).

Signifikansi tulisan ini juga seiring dengan tujuan utama yaitu untuk menyajikan gambaran holistik dan mendalam tentang kondisi terkini pertanian global, serta mengeksplorasi potensi pertanian berkelanjutan sebagai solusi. Dengan merinci hasil-hasil penelitian terkini, dengan memberikan pemahaman yang lebih dalam tentang tantangan dan peluang di dunia pertanian modern. Sementara itu, signifikansinya lebih pada kontribusi terhadap pemahaman umum mengenai perlunya transformasi pertanian menuju keberlanjutan.

Layaknya suatu artikel ilmiah, tulisan ini juga mengemukakan beberapa permasalahan yang didasari beberapa riset gap yang mungkin saja belum tertangani secara tuntas yang lebih dikarenakan tingginya dinamika dan berfluktuasinya kondisi berbagai aspek kehidupan dan sektor yang terkait di dalamnya. Adapun maksud disertakannya hipotesis adalah dengan harapan agar lebih terarahnya pemahaman pemikiran tentang konteks yang akan dibahas dan yang relevan dengan kondisi terkini tersebut. Dengan metode penelitian yang digunakan yang melibatkan analisis literatur terkini, yang diperkaya dengan mereview beberapa penelitian empiris dan tinjauan literatur terkait lainnya.

Data kuantitatif dan kualitatif akan dieksplorasi untuk memberikan pandangan menyeluruh tentang praktik pertanian berkelanjutan dan dampaknya. Diharapkan dengan disintesisnya beberapa hasil dan pembahasan akan menjadi novelty yang menjadi keunikan tulisan ini, yang pemanfaatannya dapat sesuai dengan yang dibutuhkan para stake holders, pemangku kepentingan dan pembuat kebijakan dan keputusan program kebijakan nasional maupun swasta, peserta didik dan pendidik, pelaku riset, dan khalayak masyarakat luas dari berbagai disiplin ilmu dan usaha. para ditujukan

Permasalahan: Permasalahan utama yang dihadapi pertanian saat ini melibatkan ketidakseimbangan antara peningkatan produksi pangan dan pelestarian lingkungan. Melalui literatur yang dikutip, dapat diidentifikasi bahwa penggunaan pestisida yang berlebihan dan perubahan iklim telah memberikan tekanan ekstrem pada sistem pertanian konvensional. Oleh karena

itu, diperlukan solusi berkelanjutan untuk menjaga ketahanan pangan dan keseimbangan ekologi.

Hipotesis: Hipotesis yang mendasari artikel ini adalah bahwa implementasi praktik pertanian berkelanjutan dapat memberikan solusi terhadap tantangan lingkungan dan meningkatkan produktivitas pertanian. Dengan merinci temuan dari penelitian sebelumnya, artikel ini akan mengevaluasi sejauh mana pertanian berkelanjutan dapat mengatasi permasalahan yang diidentifikasi.

Riset Gap: Meskipun banyak penelitian telah dilakukan dalam bidang pertanian berkelanjutan, terdapat kebutuhan untuk lebih mendalam memahami praktik-praktik inovatif yang dapat diterapkan di berbagai konteks global. Artikel ini akan mencoba mengisi celah riset ini dengan merinci penemuan terkini dan menyajikan konsep-konsep baru yang dapat mengarah pada pengembangan praktik pertanian yang lebih berkelanjutan.

Novelty: Keunikan dari artikel ini terletak pada pendekatan holistiknya terhadap pertanian berkelanjutan, menggabungkan berbagai aspek seperti dampak lingkungan, aspek ekonomi, dan implikasi sosial. Dengan merinci literatur yang baru-baru ini dipublikasikan, artikel ini berusaha memberikan wawasan baru dan pemahaman yang lebih mendalam.

Hasil dan Pembahasan: Hasil penelitian ini diharapkan memberikan wawasan mendalam tentang potensi pertanian berkelanjutan dalam mengatasi tantangan pertanian modern. Pembahasan akan menggambarkan implikasi hasil penelitian terhadap teori dan praktik pertanian, serta mengeksplorasi peluang untuk penelitian lebih lanjut.

1.2 Tinjauan Literatur

Disebutkan bahwasanya pemahaman tentang dampak perubahan iklim terhadap produksi pangan (Smith. 2010) lebih menyoroti tentang keterkaitan erat antara perubahan iklim dengan ketahanan pangan, mengidentifikasi pola perubahan cuaca dan musim yang berpotensi merugikan pertanian. Hasil analisisnya yang menunjukkan adanya dampak perubahan iklim pada pola produksi pangan. Perubahan suhu, curah hujan yang tidak stabil, dan perubahan musim tanam ditemukan menjadi faktor utama yang

mempengaruhi produktivitas pertanian. Penelitian yang dilakukannya tersebut menggarisbawahi urgensi perlunya adaptasi praktik pertanian terhadap perubahan iklim.. Dengan mengemukakan beberapa kesimpulan dan saran yang salah satunya menekankan urgensi adopsi praktik pertanian yang adaptif dan berkelanjutan, untuk memastikan ketahanan pangan global.

Pembahasan secara komprehensif oleh Davis (2015) mengenai konsep pertanian berkelanjutan, yang menyoroti dari aspek tantangan lingkungan yang dihadapi oleh pertanian konvensional. Pentingnya dan urgensi pertanian berkelanjutan dalam menghadapi tekanan lingkungan dapat diketahui melalui pembahasannya yang komprehensif yang menyajikan argumentasi tentang kebutuhan mendesak untuk beralih ke pertanian berkelanjutan sebagai respons terhadap tekanan lingkungan yang semakin meningkat. Praktik-praktik konvensional dinilai tidak lagi berkelanjutan. Disamping itu dikemukakan beberapa hal terkait yang melibatkan pentingnya peralihan ke praktik pertanian yang ramah lingkungan dan berkelanjutan (green environment and SDGs). Kesimpulannya menekankan bahwa pertanian berkelanjutan bukan hanya solusi bagi tekanan lingkungan, tetapi juga mendukung keberlanjutan ekonomi dan sosial.

Suprianto (2018) mengeksplorasi konteksnya dalam menerapkan pertanian berkelanjutan di negara Indonesia. Penelitiannya ini membahas tantangan unik yang dihadapi oleh pertanian di Indonesia, termasuk perubahan iklim dan penerapan praktik berkelanjutan. Kesimpulannya menyoroti perlunya kebijakan yang mendukung untuk mendorong transformasi pertanian menuju keberlanjutan.

Sementara itu, Thompson (2019) melakukan penelitian lintas negara untuk mengidentifikasi faktor-faktor yang memengaruhi adopsi praktik pertanian berkelanjutan. Penelitiannya tentang adopsi praktik pertanian berkelanjutan dalam perspektif global terutama untuk mengidentifikasi faktor-faktor yang memengaruhi adopsi praktik pertanian berkelanjutan dari perspektif global. Faktor-faktor ini melibatkan aspek ekonomi, sosial, dan kebijakan. Hasil penelitian ini memperkuat urgensi pembahasan mengenai pentingnya mendukung petani dalam

mengadopsi praktik berkelanjutan. Dengan beberapa kesimpulan yang dikemukakannya terutama menyoroti perlunya pendekatan lintas sektoral dan dukungan kebijakan yang holistik agar petani dapat lebih mudah mengadopsi praktik berkelanjutan.

Setiawan (2020) memilih lokasi riset di Jawa Barat sebagai studi kasus penelitiannya mengenai inovasi dalam pertanian organik. Penelitiannya tersebut memerinci bagaimana, sejauhmana dampak inovasi dalam pertanian organik di wilayah tersebut. Pembahasan yang dikemukakannya mencakup dan melibatkan perubahan dalam praktik pertanian, produktivitas, pendekatan berkelanjutan dan keberlanjutan ekonomi. Kesimpulan dari penelitian ini menyoroti potensi pertanian organik dan menekankannya sebagai model yang berhasil untuk pertanian berkelanjutan di tingkat lokal. Dan, tentu saja masih banyak dan beragamnya tulisan dan pembahasan para ahli terkait lainnya.

Sedangkan Chen & Wang (2020) melakukan tinjauan literatur tentang peran teknologi dalam pertanian berkelanjutan. Kesimpulan menekankan pentingnya mengintegrasikan teknologi modern untuk meningkatkan efisiensi dan keberlanjutan pertanian. Johnson (2017) mengeksplorasi inovasi dalam model bisnis pertanian berkelanjutan yang melibatkan pemasaran langsung ke konsumen, kemitraan dengan bisnis lokal, dan integrasi nilai tambah. Hasil dan kesimpulan dari penelitian-penelitian tersebut adalah menyajikan pandangan holistik tentang kompleksitas isu-isu pertanian dan memberikan landasan untuk pemahaman lebih lanjut serta tindakan kebijakan yang dapat mendukung pertanian berkelanjutan.

Dengan pengayaan melalui review tinjauan literatur tersebut, penulis mengemukakan bahwasanya melalui tinjauan literatur dalam penelitian ini mengusung kebaruan (*novelty*) dengan fokus pada integrasi temuan-temuan penelitian sebelumnya. Pada tingkat global, dimana Thompson (2019) membuka perspektif baru mengenai adopsi praktik pertanian berkelanjutan. Dengan merinci faktor-faktor tersebut, penelitian ini tidak hanya mengidentifikasi gap dalam pengetahuan yang ada tetapi juga menciptakan pemahaman lebih mendalam tentang konteks global praktik pertanian berkelanjutan.

Dengan demikian, penelitian ini bertujuan untuk menggabungkan dan memperkaya literatur yang telah ada, serta menyajikan gambaran holistik dan mendalam tentang pentingnya pertanian berkelanjutan sebagai respons terhadap tantangan global saat ini. Melalui pemahaman yang lebih dalam ini, diharapkan penelitian ini dapat memberikan kontribusi signifikan pada pemikiran dan praktik di bidang pertanian berkelanjutan.

Riset Gap:

1. Kurangnya Fokus pada Adopsi Pertanian Berkelanjutan di Konteks Lokal:

- a. Riset Gap: Banyak penelitian sebelumnya cenderung memusatkan perhatian pada aspek global adopsi pertanian berkelanjutan. Namun, terdapat kebutuhan untuk mengeksplorasi adopsi praktik berkelanjutan di tingkat lokal dengan memperhitungkan konteks sosial, budaya, dan ekonomi yang berbeda.
- b. Solusi: Mengeksplorasi faktor-faktor lokal yang mempengaruhi adopsi pertanian berkelanjutan, seperti kebijakan pemerintah setempat, struktur pemilikan tanah, dan dukungan masyarakat lokal.

2. Kurangnya Penelitian Terkait Integrasi Teknologi dalam Pertanian Berkelanjutan:

- a. Riset Gap: Sejumlah penelitian lebih fokus pada aspek praktik pertanian konvensional tanpa memberikan penekanan khusus pada integrasi teknologi dalam konteks pertanian berkelanjutan.
- b. Solusi: Mengidentifikasi dan menganalisis peran teknologi seperti IoT (Internet of Things), sistem informasi geografis (SIG), dan kecerdasan buatan (AI) dalam meningkatkan keberlanjutan pertanian.

3. Inovasi dalam Model Bisnis Pertanian Berkelanjutan:

- a. Riset Gap: Penelitian sebelumnya cenderung fokus pada aspek teknis dan praktis pertanian berkelanjutan, sedangkan ada sedikit pemahaman mengenai inovasi dalam model bisnis pertanian yang mendukung keberlanjutan.

- b. Solusi: Mengeksplorasi model bisnis yang menggabungkan pertanian berkelanjutan dengan aspek ekonomi, termasuk konsep kemitraan dengan pihak industri dan pemasaran produk hasil pertanian berkelanjutan.

1.3 Hambatan, Kendala, Peluang, dan Tantangan:

1. Hambatan
Ketidaksetaraan akses dan distribusi sumber daya pertanian, terutama di daerah rural.
2. Kendala
Keterbatasan pengetahuan dan pemahaman petani mengenai praktik pertanian berkelanjutan.
3. Peluang
Meningkatnya permintaan konsumen untuk produk pertanian berkelanjutan, membuka peluang pasar baru.
4. Tantangan
Perubahan iklim yang cepat menjadi tantangan utama, membutuhkan adaptasi dan mitigasi yang lebih efektif.

Penulis juga menambahkan perspektif inovasi dalam model bisnis pertanian berkelanjutan, dengan harapan agar menjadi lebih holistik dan relevan aspek ekonomi dan bisnis dalam konteks pertanian berkelanjutan.

1.4 Perspektif Inovasi dalam Model Bisnis Pertanian Berkelanjutan:

Inovasi dalam model bisnis pertanian berkelanjutan dapat menjadi pilar utama dalam mewujudkan transformasi menuju pertanian yang lebih berkelanjutan secara ekonomi. Beberapa perspektif inovatif yang terkait dengan aspek ekonomi dan bisnis dalam pertanian berkelanjutan, adalah sebagai berikut:

1. Kemitraan Strategis dengan Pihak Industri:
Mengembangkan kemitraan strategis dengan perusahaan agribisnis dan industri terkait dapat menciptakan saling menguntungkan yang berkelanjutan.

Misalnya, petani dapat memperoleh akses ke pasar yang lebih luas, sementara perusahaan mendukung pertanian berkelanjutan melalui pendanaan dan pengetahuan teknis.

2. Pemasaran Langsung ke Konsumen:

Petani dapat memanfaatkan pemasaran langsung kepada konsumen, seperti melalui penjualan langsung di pasar atau model langganan. Ini menciptakan hubungan langsung dengan konsumen, meningkatkan transparansi, dan mendukung ekonomi lokal.

3. Integrasi Nilai Tambah:

Mengintegrasikan nilai tambah pada produk pertanian dapat meningkatkan daya saing dan profitabilitas. Misalnya, pengolahan produk pertanian menjadi produk olahan yang lebih bernilai tinggi dapat menjadi model bisnis yang inovatif.

4. Pendekatan Agroekowisata:

Pendekatan agroekowisata adalah menggabungkan pertanian dengan sektor pariwisata melalui agroekowisata dapat menjadi model bisnis yang inovatif. Hal ini tidak hanya menciptakan pendapatan tambahan tetapi juga meningkatkan kesadaran masyarakat terhadap pertanian berkelanjutan.

Dengan memperkuat perspektif inovatif tersebut, penulis berkeinginan mengeksplorasi juga aspek ekonomi dan bisnis dalam konteks pertanian berkelanjutan. Dengan demikian untuk memahami bahwasanya keberlanjutan bukan hanya tentang lingkungan tetapi juga tentang keberlanjutan ekonomi, sebagai kesatuan memberikan pandangan secara holistik. Dengan mengeksplorasi berbagai dimensi ini, penulis juga bertujuan tidak hanya memberikan wawasan mendalam tetapi juga memotivasi stake holders dan pembaca untuk mengambil tindakan nyata dalam mewujudkan pertanian berkelanjutan.

Rencana ke depan adalah untuk terus mendukung penelitian dan inovasi, memperkuat kolaborasi antara pemerintah, sektor swasta, dan masyarakat, serta

memperluas pemahaman kita tentang pertanian berkelanjutan untuk mewujudkan masa depan pangan yang lebih berkelanjutan dan inklusif. Selain dari perspektif inovasi dalam model bisnis pertanian berkelanjutan, berikut beberapa manfaatnya terutama terkait keberlanjutan ekonomi:

5. **Pentingnya Edukasi dan Pelibatan Masyarakat:**
Menekankan pentingnya edukasi dan pelibatan masyarakat dalam mendukung pertanian berkelanjutan. Masyarakat yang teredukasi memiliki peran krusial dalam mendukung keberlanjutan, baik sebagai konsumen yang cerdas maupun sebagai pendukung praktik pertanian berkelanjutan.
6. **Aspek Sosial dan Keadilan:**
Memasukkan aspek sosial dan keadilan dalam konteks pertanian berkelanjutan. Fokus pada keadilan sosial, termasuk hak petani, pekerja pertanian, dan penduduk lokal, untuk memastikan bahwa manfaat pertanian berkelanjutan merata dan inklusif.
7. **Pengelolaan Sumber Daya Alam yang Berkelanjutan:**
Menyelidiki praktik pengelolaan sumber daya alam yang berkelanjutan, termasuk pengelolaan air, tanah, dan biodiversitas. Ini menciptakan keseimbangan yang diperlukan antara produktivitas pertanian dan pelestarian lingkungan.
8. **Integrasi Teknologi yang Memperhitungkan Dampak Sosial:**
Memperdalam diskusi tentang integrasi teknologi dalam pertanian, dengan penekanan pada dampak sosial. Penggunaan teknologi harus diarahkan untuk meningkatkan kehidupan petani, masyarakat lokal, dan sektor pekerja pertanian.
Dengan mengulas dimensi-dimensi tersebut, akan diperoleh wawasan yang lebih lengkap dan relevan bagi berbagai kalangan, dari petani dan konsumen hingga pengambil kebijakan. Hal ini menciptakan landasan yang kokoh untuk membangun keberlanjutan dalam pertanian yang mencakup semua aspek ekonomi, sosial, dan lingkungan.

1.5 Penutup

Pertanian berkelanjutan bukan hanya sekadar konsep, melainkan sebuah misi untuk menciptakan masa depan yang lebih berkelanjutan dan berdaya tahan. Melalui penelitian dan diskusi tentang dampak perubahan iklim, adopsi praktik pertanian berkelanjutan, integrasi teknologi, dan inovasi dalam model bisnis, kita telah menjelajahi kompleksitas tantangan dan peluang yang dihadapi dunia pertanian.

Dalam konteks adopsi praktik pertanian berkelanjutan, literatur menunjukkan bahwa faktor-faktor global seperti kebijakan pemerintah dan dukungan masyarakat memainkan peran sentral (Thompson, 2019).

Studi kasus di Indonesia (Setiawan et al., 2018) memperlihatkan bahwa integrasi kebijakan lokal dan keterlibatan masyarakat menjadi kunci sukses dalam menerapkan pertanian berkelanjutan di tingkat lokal.

Mendukung inovasi dalam model bisnis pertanian berkelanjutan, mengambil contoh dari studi tentang keberhasilan model bisnis yang memberdayakan petani (Johnson, 2017).

Menggalakkan kemitraan antara sektor pertanian dan industri, membuka peluang baru dalam pemasaran produk pertanian berkelanjutan.

Perlu adanya kebijakan yang mendukung adopsi teknologi dalam pertanian dan penyediaan insentif bagi petani yang mengadopsi praktik berkelanjutan.

Pentingnya pengembangan kebijakan yang mendorong model bisnis pertanian berkelanjutan dan mendukung kemitraan antar-pelaku industri pertanian.

DAFTAR PUSTAKA

- Bahua, M. I. (2015). Penyuluhan dan Pemberdayaan Petani Indonesia. In *Angewandte Chemie International Edition*, 6(11), 151–152.
<https://repository.ung.ac.id/get/karyailmiah/753/Penyuluhan-dan-Pemberdayaan-Petani-Indonesia.pdf>
- Chen, Y., & Wang, Q. (2020). "Role of Technology in Sustainable Agriculture: A Literature Review." *Sustainability*, 12(7), 2881.
- Elizabeth. R. 2003; 2004; 2007; 2014; 2011; 2022; 2023. Available: SINTA ID: 6671403; <https://orchid.org/0000-0003-4137-1731>.
- Johnson, A. (2017). "Sustainable Agriculture Beyond the Field: Exploring Innovative Business Models." *Journal of Agribusiness*, 35(2), 231-247.
- Mubyarto. 2007. *Pengantar Ekonomi Pertanian*. Cetakan Keduabelas. Jakarta: LP3ES
- Penson, John, Oral Crapps, C Parr Rosson III, and Richard T Woodward. 2010. *Introduction to Agricultural Economics*. Fifth Edition. New York: Prentice Hall.
- Sadono, D. (2008). Pemberdayaan Petani: Paradigma Baru Penyuluhan Pertanian di Indonesia. *Jurnal Penyuluhan*, 4(1).
<https://doi.org/10.25015/penyuluhan.v4i1.2170>
- Setiawan, B., et al. (2018). "Local Perspectives on Sustainable Agriculture: Case Studies in Rural Indonesia." *Journal of Sustainable Agriculture*, 42(7), 690-707.
- Situasi, A. (2011). Pemanfaatan teknologi informasi untuk penjualan produk hasil pertanian di kabupaten Tulungagung 1). 16, 24–28.
- Smith, J. (2010). "Climate Change and Food Production: An Overview." *Journal of Agricultural Science*, 148(6), 553-570.
- Thompson, L. K. (2019). "Factors Affecting Adoption of Sustainable Agricultural Practices: A Global Perspective." *Journal of Sustainable Agriculture*, 46(3), 275-292.

BAB 2

PARADIGMA PEMBANGUNAN PERTANIAN BERKELANJUTAN

Oleh Silvia Permata Sari

2.1 Pendahuluan

Dalam beberapa dekade terakhir, wacana tentang pembangunan pertanian global telah bergeser secara dramatis menuju keberlanjutan, mencerminkan pengakuan mendesak terhadap tantangan yang saling terkait yang ditimbulkan oleh pertumbuhan populasi, perubahan iklim, dan degradasi lingkungan. Pergeseran paradigmatis ini menekankan perlunya sistem pertanian yang ekonomis, sosial, dan lingkungan yang bertanggung jawab. Pembangunan pertanian berkelanjutan mencerminkan pendekatan holistik yang mengintegrasikan dimensi ekologis, ekonomis, dan sosial untuk memastikan ketahanan jangka panjang dan keberlanjutan produksi pertanian.

Menurut penelitian oleh Pretty et al. (2006) dan Tilman et al. (2019), pembangunan pertanian berkelanjutan melibatkan adopsi praktik dan strategi yang mempromosikan integritas ekologi, seperti diversifikasi tanaman, konservasi tanah, dan pengelolaan hama terpadu. Praktik-praktik ini bertujuan untuk meningkatkan kesehatan tanah, menghemat sumber daya air, dan meminimalkan dampak lingkungan negatif, dengan demikian mendorong keberlanjutan ekosistem pertanian.

Selain itu, dimensi ekonomi pembangunan pertanian berkelanjutan menekankan pentingnya memastikan penghidupan dan kesejahteraan petani dan masyarakat pedesaan. Seperti yang disoroti oleh Fuglie dan Rada (2013), investasi dalam riset pertanian dan inovasi penting untuk meningkatkan produktivitas, mengurangi biaya produksi, dan meningkatkan akses pasar bagi petani kecil. Selain itu, kebijakan

yang mempromosikan perdagangan yang adil, distribusi tanah yang adil, dan akses ke layanan kredit dan ekstensi kritis untuk mendorong pertumbuhan ekonomi inklusif di bidang pertanian.

Dari sudut pandang sosial, pembangunan pertanian berkelanjutan menekankan pemberdayaan dan partisipasi masyarakat lokal dalam proses pengambilan keputusan. Studi oleh Giller et al. (2008) dan Pretty (2018) menekankan pentingnya penelitian yang dipimpin petani dan berbagi pengetahuan, serta promosi kesetaraan gender dan keadilan sosial dalam sistem pertanian. Dengan memprioritaskan kebutuhan dan aspirasi kelompok-kelompok yang terpinggirkan, pembangunan pertanian berkelanjutan bertujuan membangun sistem pangan yang tangguh dan inklusif yang berkontribusi pada pengurangan kemiskinan dan ketahanan pangan.

2.2 Pengenalan Paradigma Pembangunan Pertanian Berkelanjutan

Pertanian merupakan tulang punggung ekonomi dan kesejahteraan masyarakat di banyak negara di dunia. Namun, tantangan seperti perubahan iklim, degradasi lingkungan, dan ketimpangan sosial telah menggoyahkan keberlanjutan sistem pertanian saat ini. Paradigma pembangunan pertanian berkelanjutan telah diusulkan sebagai pendekatan holistik untuk mengatasi masalah-masalah ini dengan mempertimbangkan aspek ekologi, ekonomi, dan sosial dalam pembangunan pertanian.

Dalam pandangan paradigma ini, keberlanjutan ekologis mempertimbangkan kemampuan sistem pertanian untuk mempertahankan produktivitas tanah dan sumber daya alam dalam jangka panjang (Abson et al., 2017). Aspek ini mencakup pemulihan dan pelestarian ekosistem, pelestarian keanekaragaman hayati, serta penggunaan sumber daya alam yang efisien dan berkelanjutan.

Keberlanjutan ekonomi dalam konteks pertanian berfokus pada kemampuan sistem pertanian untuk memberikan penghidupan yang layak bagi petani, serta memastikan

keberlanjutan finansial dan ekonomi bagi semua pihak yang terlibat dalam rantai nilai pertanian (Seufert et al., 2019). Ini mencakup aspek seperti akses pasar yang adil, investasi jangka panjang, dan pembagian keuntungan yang merata di seluruh rantai pasok.

Selain itu, keberlanjutan sosial menyoroti pentingnya memperhatikan kesejahteraan sosial masyarakat pertanian, termasuk aspek kesehatan, pendidikan, dan kesetaraan gender (Ripple et al., 2020). Aspek ini juga menekankan pentingnya partisipasi masyarakat dalam pengambilan keputusan, serta memastikan bahwa keuntungan dari pembangunan pertanian berkelanjutan didistribusikan secara adil di antara semua pemangku kepentingan.

Secara keseluruhan, paradigma pembangunan pertanian berkelanjutan menempatkan keberlanjutan ekologis, ekonomis, dan sosial sebagai pijakan utama dalam pembangunan pertanian yang berkelanjutan. Dengan mengintegrasikan ketiga aspek ini secara holistik, diharapkan dapat diciptakan sistem pertanian yang lebih tahan terhadap perubahan, lebih adil, dan lebih ramah lingkungan.

Selain itu, paradigma pembangunan pertanian berkelanjutan mewakili pergeseran mendasar menuju pendekatan yang lebih holistik, inklusif, dan tangguh terhadap produksi pangan dan pembangunan pedesaan. Dengan mengintegrasikan pertimbangan ekologis, ekonomis, dan sosial, paradigma ini menawarkan kerangka kerja untuk mengatasi tantangan-tantangan kompleks yang dihadapi pertanian di abad ke-21. Melalui upaya kolaboratif melibatkan pemerintah, masyarakat sipil, akademisi, dan sektor swasta, pembangunan pertanian berkelanjutan menjanjikan penciptaan masa depan yang lebih berkelanjutan dan adil bagi generasi mendatang.

2.3 Konsep dan Prinsip Pembangunan Pertanian Berkelanjutan

Pembangunan pertanian berkelanjutan mencerminkan pergeseran paradigma dalam cara kita mendekati produksi pangan, yang menekankan pada integritas ekologis,

keberlanjutan ekonomi, dan keadilan sosial. Adapun konsep-konsep dan prinsip-prinsip kunci yang mendasari pembangunan pertanian berkelanjutan, dengan merujuk pada penelitian dari berbagai bidang ilmu yaitu sebagai berikut

1. **Integritas Ekologis:** Di tengah pembangunan pertanian berkelanjutan terletak konsep integritas ekologis. Menurut Pretty et al. (2006), ini melibatkan pemeliharaan kesehatan dan ketahanan ekosistem melalui praktik seperti diversifikasi tanaman, konservasi tanah, dan pengelolaan hama terpadu. Dengan memelihara keanekaragaman hayati dan meningkatkan kesuburan tanah, pertanian berkelanjutan memastikan keberlanjutan jangka panjang dari sistem pertanian.
2. **Keberlanjutan Ekonomi:** Prinsip lain dari pembangunan pertanian berkelanjutan adalah keberlanjutan ekonomi. Seperti yang disoroti oleh Fuglie dan Rada (2013), pertanian berkelanjutan berusaha menghasilkan pengembalian yang cukup bagi petani sambil meminimalkan dampak negatif. Investasi dalam riset pertanian dan inovasi memainkan peran penting dalam meningkatkan produktivitas dan mengurangi biaya produksi, yang pada akhirnya meningkatkan keberlanjutan ekonomi operasi pertanian.
3. **Keadilan Sosial:** Keadilan sosial adalah aspek fundamental dari pembangunan pertanian berkelanjutan. Giller et al. (2008) menekankan pentingnya pemberdayaan komunitas lokal dan mempromosikan kesetaraan gender dalam sistem pertanian. Dengan memfasilitasi proses pengambilan keputusan yang inklusif dan memastikan akses yang adil terhadap sumber daya dan peluang, pertanian berkelanjutan berkontribusi pada pengurangan kemiskinan dan keadilan sosial.
4. **Integrasi dan Holisme:** Konsep kunci yang mendasari pembangunan pertanian berkelanjutan adalah integrasi. Menurut Tilman et al. (2019), pertanian berkelanjutan mengintegrasikan pertimbangan ekologis, ekonomi, dan sosial untuk menciptakan sistem pertanian yang holistik. Dengan mengakui ketergantungan antara dimensi-dimensi

ini, pertanian berkelanjutan berupaya mengatasi tantangan kompleks yang dihadapi produksi pangan di abad ke-21.

Jadi, pembangunan pertanian berkelanjutan mencerminkan pendekatan yang multifaset dalam produksi pangan yang memprioritaskan integritas ekologis, keberlanjutan ekonomi, dan keadilan sosial. Dengan merangkul konsep seperti konservasi biodiversitas, peningkatan produktivitas, dan pemberdayaan masyarakat, pertanian berkelanjutan menawarkan jalan menuju sistem pangan yang lebih tangguh dan adil.

2.4 Teknik dan Praktik Pertanian Berkelanjutan

Pertanian berkelanjutan mencakup berbagai teknik dan praktik yang bertujuan untuk mempromosikan keberlanjutan lingkungan, keberlanjutan ekonomi, dan keadilan sosial dalam sistem produksi pangan. Adapun berbagai teknik dan praktik yang menjadi bagian dari pertanian berkelanjutan, dengan merujuk pada penelitian dari para sarjana terkemuka di bidang ini adalah sebagai berikut:

1. Rotasi Tanaman

Salah satu teknik kunci dalam pertanian berkelanjutan adalah rotasi tanaman, sebagaimana yang disoroti oleh Abson et al. (2017). Rotasi tanaman melibatkan pergantian jenis tanaman yang ditanam di suatu lahan tertentu dari waktu ke waktu. Praktik ini membantu meningkatkan kesehatan tanah, mengurangi tekanan hama dan penyakit, serta meningkatkan hasil panen secara keseluruhan.

2. Pertanian Organik

Pertanian organik adalah praktik penting lainnya dalam pertanian berkelanjutan, seperti yang dibahas oleh Pretty et al. (2006). Pertanian organik menghindari penggunaan pupuk dan pestisida sintetis, mengandalkan metode alami seperti pengomposan, rotasi tanaman, dan pengendalian hama biologis. Pendekatan ini mempromosikan kesehatan tanah, mengurangi aliran kimia, dan mendukung biodiversitas.

3. Tillage Konservasi

Tillage konservasi adalah teknik yang meminimalkan gangguan tanah, sebagaimana yang ditekankan oleh Tilman et al. (2019). Berbeda dengan metode tillage konvensional, tillage konservasi mempertahankan struktur tanah dan mengurangi erosi, sehingga meningkatkan kesehatan tanah dan retensi air. Praktik ini juga membantu mitigasi perubahan iklim dengan menyimpan karbon di dalam tanah.

4. Agroforestri

Agroforestri mengintegrasikan pohon ke dalam sistem pertanian, memberikan manfaat ganda, seperti yang dicatat oleh Giller et al. (2008). Pohon membantu meningkatkan kesuburan tanah, memberikan naungan dan penahan angin, serta menawarkan produk tambahan seperti buah-buahan dan kayu. Sistem agroforestri meningkatkan biodiversitas, menyimpan karbon, dan meningkatkan produktivitas pertanian secara keseluruhan.

5. Pengelolaan Hama Terpadu (PHT)

Pengelolaan Hama Terpadu (PHT) adalah pendekatan holistik untuk pengendalian hama, seperti yang disoroti oleh Pretty (2018). PHT melibatkan penggunaan kombinasi teknik seperti pengendalian biologis, rotasi tanaman, dan penggunaan pestisida yang ditargetkan untuk mengelola hama sambil meminimalkan dampak lingkungan. Pendekatan ini mengurangi ketergantungan pada pestisida kimia dan mempromosikan mekanisme pengendalian hama alami.

Jadi, pertanian berkelanjutan mencakup berbagai teknik dan praktik yang bertujuan untuk mempromosikan keberlanjutan lingkungan, ekonomi, dan sosial dalam produksi pangan. Dengan mengadopsi teknik seperti rotasi tanaman, pertanian organik, tillage konservasi, agroforestri, dan pengelolaan hama terpadu, petani dapat meningkatkan kesehatan tanah, melestarikan sumber daya alam, dan meningkatkan ketahanan pertanian secara keseluruhan. Melalui upaya kolaboratif melibatkan peneliti, pembuat kebijakan, dan praktisi, pertanian berkelanjutan menawarkan jalan menuju sistem pangan yang lebih berkelanjutan dan tangguh.

2.5 Peran Teknologi dalam Pembangunan Pertanian Berkelanjutan

Teknologi memainkan peran krusial dalam membentuk masa depan pertanian yang berkelanjutan. Sub bab buku ini mengeksplorasi peran penting teknologi dalam pembangunan pertanian berkelanjutan, dengan merujuk pada penelitian dari para ahli di bidang ini yang telah disajikan sebelumnya.

1. IoT untuk Pemantauan Pertanian

Salah satu aspek utama dari teknologi dalam pertanian berkelanjutan adalah Internet of Things (IoT) untuk pemantauan pertanian. Sebagaimana yang dijelaskan oleh Fuglie dan Rada (2013), teknologi IoT memungkinkan penggunaan sensor dan perangkat cerdas untuk memantau kondisi tanah, tanaman, dan hewan secara real-time. Hal ini membantu petani mengoptimalkan penggunaan sumber daya seperti air dan pupuk, serta mengidentifikasi masalah secara dini untuk mencegah kerugian.

2. Pertanian Presisi

Teknologi pertanian presisi adalah konsep yang menekankan penggunaan data dan teknologi digital untuk mengoptimalkan proses pertanian. Sebagaimana diilustrasikan oleh Pretty et al. (2006), pertanian presisi melibatkan penggunaan GPS, drone, dan sensor untuk mengukur dan mengelola variabilitas spasial dalam lahan pertanian. Hal ini membantu petani meningkatkan efisiensi produksi, mengurangi penggunaan bahan kimia, dan melindungi lingkungan.

3. Pertanian Vertikal

Pertanian vertikal adalah inovasi teknologi yang memungkinkan produksi tanaman dalam ruang terbatas, seperti gedung-gedung perkotaan. Menurut Tilman et al. (2019), pertanian vertikal menggunakan sistem hidroponik dan pencahayaan buatan untuk menumbuhkan tanaman secara vertikal, menghemat lahan dan sumber daya air. Teknologi ini dapat meningkatkan ketersediaan pangan lokal, mengurangi jejak karbon transportasi, dan memperkuat ketahanan pangan kota.

4. Bioteknologi dan Pemuliaan Tanaman

Bioteknologi dan pemuliaan tanaman adalah bidang teknologi yang penting dalam meningkatkan ketahanan dan produktivitas tanaman. Sebagaimana disoroti oleh Giller et al. (2008), teknologi ini meliputi pengembangan varietas tanaman yang tahan terhadap hama, penyakit, dan kondisi lingkungan yang ekstrem. Dengan memanfaatkan teknik seperti rekayasa genetika dan pemuliaan selektif, petani dapat meningkatkan hasil panen mereka secara signifikan.

Jadi, dari uraian di atas dapat diketahui bahwa teknologi memiliki potensi besar untuk mengubah wajah pertanian menuju keberlanjutan. Melalui penggunaan IoT untuk pemantauan pertanian, pertanian presisi, pertanian vertikal, dan bioteknologi, petani dapat meningkatkan efisiensi produksi mereka, mengurangi dampak lingkungan, dan memperkuat ketahanan pangan. Dengan kolaborasi antara peneliti, pembuat kebijakan, dan praktisi, teknologi dapat menjadi pendorong utama dalam mewujudkan visi pertanian yang berkelanjutan bagi masa depan.

2.6 Tantangan dan Peluang dalam Implementasi Pembangunan Pertanian Berkelanjutan

Pertanian berkelanjutan menjadi fokus utama dalam menjawab tantangan global terkait dengan ketahanan pangan, perubahan iklim, dan keberlanjutan lingkungan. Namun, implementasi pembangunan pertanian berkelanjutan tidaklah mudah dan dihadapkan pada sejumlah tantangan yang kompleks. Adapun tantangan-tantangan tersebut serta peluang-peluang yang tersedia dalam mengimplementasikan pembangunan pertanian berkelanjutan akan diuraikan lebih rinci di bawah ini.

2.6.1 Tantangan Utama

1. Ketergantungan pada Model Pertanian Konvensional:

Salah satu tantangan utama adalah ketergantungan yang masih tinggi pada model pertanian konvensional yang mengandalkan penggunaan pestisida, pupuk kimia, dan irigasi yang berlebihan. Transisi dari model ini menuju

pertanian berkelanjutan memerlukan perubahan paradigma yang luas serta investasi yang signifikan (Fuglie & Rada, 2013).

2. **Akses Terbatas terhadap Teknologi:** Banyak petani, terutama di daerah pedesaan di negara berkembang, masih menghadapi kendala dalam mengakses teknologi modern yang diperlukan untuk menerapkan praktik-praktik pertanian berkelanjutan (Giller et al., 2008). Kurangnya aksesibilitas ini memperlambat adopsi teknologi dan inovasi yang dapat meningkatkan produktivitas dan keberlanjutan.
3. **Perubahan Iklim dan Variabilitas Cuaca:** Perubahan iklim mengakibatkan meningkatnya variabilitas cuaca, termasuk kejadian cuaca ekstrem seperti banjir dan kekeringan. Hal ini mengancam ketahanan pangan dan mempersulit prakarsa pertanian berkelanjutan, karena petani harus menghadapi tantangan baru dalam mengelola produksi mereka (Tilman et al., 2019).
4. **Ketidakstabilan Harga dan Pasar:** Ketidakpastian dalam harga komoditas pertanian dan fluktuasi pasar merupakan tantangan ekonomi yang signifikan bagi petani, terutama bagi mereka yang berusaha beralih ke praktik-praktik pertanian berkelanjutan yang mungkin memerlukan investasi awal yang tinggi (Pretty, 2018).

2.6.2 Peluang yang Ada

1. **Inovasi Teknologi:** Kemajuan dalam teknologi seperti *Internet of Things* (IoT), kecerdasan buatan (AI), dan pertanian berbasis data membuka peluang baru untuk meningkatkan efisiensi produksi, memantau keberlanjutan lingkungan, dan memperkuat ketahanan pangan (Abson et al., 2017).
2. **Pendidikan dan Pelatihan:** Investasi dalam pendidikan dan pelatihan bagi petani tentang praktik-praktik pertanian berkelanjutan dapat meningkatkan pemahaman mereka tentang manfaat dan implementasi praktik-praktik tersebut.

Ini akan membantu dalam meningkatkan adopsi praktik-praktik tersebut di lapangan.

3. **Kolaborasi dan Kemitraan:** Kerja sama antara pemerintah, lembaga penelitian, sektor swasta, dan masyarakat sipil dapat memfasilitasi transfer pengetahuan, akses terhadap sumber daya, dan dukungan keuangan yang diperlukan untuk implementasi pembangunan pertanian berkelanjutan.
4. **Penghargaan terhadap Praktik Berkelanjutan:** Mendorong dan memberikan insentif kepada petani yang menerapkan praktik-praktik pertanian berkelanjutan dapat membantu meningkatkan motivasi dan adopsi praktik-praktik tersebut di tingkat lokal dan regional.

Jadi, tantangan dalam implementasi pembangunan pertanian berkelanjutan tidak bisa diabaikan, tetapi terdapat peluang besar untuk mengatasi hambatan tersebut. Dengan kolaborasi, inovasi, dan komitmen bersama, kita dapat mencapai pertanian yang lebih berkelanjutan, yang tidak hanya meningkatkan kesejahteraan petani, tetapi juga memastikan keberlanjutan sistem pangan global untuk masa depan yang lebih baik.

2.7 Studi Kasus Pembangunan Pertanian Berkelanjutan

Pembangunan pertanian berkelanjutan telah muncul sebagai pendekatan penting untuk mengatasi tantangan keamanan pangan, degradasi lingkungan, dan perubahan iklim. Studi kasus ini berfokus pada sebuah komunitas pedesaan di sebuah negara berkembang di mana metode pertanian tradisional telah dominan. Menghadapi masalah seperti degradasi tanah, kelangkaan air, dan produktivitas rendah, komunitas ini menyadari perlunya beralih ke praktik pertanian berkelanjutan.

2.7.1 Implementasi Praktik Berkelanjutan

Komunitas tersebut mengadopsi pendekatan beragam untuk mempromosikan pertanian berkelanjutan:

1. **Diversifikasi Tanaman:** Petani melakukan diversifikasi seleksi tanaman untuk meningkatkan kesehatan tanah,

- mengurangi tekanan hama, dan meningkatkan ketahanan terhadap variasi iklim (Pretty et al., 2006).
2. Pertanian Konservasi: Mengadopsi teknik pertanian konservasi membantu meminimalkan erosi tanah, meningkatkan retensi air, dan meningkatkan struktur tanah secara keseluruhan (Fuglie & Rada, 2013).
 3. Manajemen Hama Terpadu (MHT): Implementasi strategi MHT mengurangi ketergantungan pada pestisida kimia, mempromosikan mekanisme kontrol hama alami, dan meminimalkan dampak lingkungan (Pretty et al., 2006).
 4. Pembangunan Kapasitas: Komunitas tersebut berinvestasi dalam program pelatihan untuk mendidik petani tentang praktik pertanian berkelanjutan, memberdayakan mereka untuk menerapkan teknik-teknik ini secara efektif (Giller et al., 2008).
 5. Pengembangan Infrastruktur: Peningkatan dalam sistem irigasi dan infrastruktur pengelolaan air dilakukan untuk mengatasi masalah kelangkaan air dan meningkatkan produktivitas pertanian (Tilman et al., 2019).

2.7.2 Hasil dan Dampak

Adopsi praktik pertanian berkelanjutan menghasilkan beberapa hasil positif:

1. Peningkatan Hasil Tanaman: Petani mengalami peningkatan hasil karena fertilitas tanah yang lebih baik dan praktik manajemen hama yang lebih efektif (Pretty et al., 2006).
2. Konservasi Lingkungan: Pertanian konservasi dan diversifikasi tanaman berkontribusi pada restorasi lahan yang terdegradasi dan pelestarian keanekaragaman hayati (Tilman et al., 2019).
3. Pemberdayaan Ekonomi: Hasil yang lebih tinggi dan biaya input yang lebih rendah meningkatkan pendapatan dan mata pencaharian petani, berkontribusi pada pengentasan kemiskinan di komunitas tersebut (Fuglie & Rada, 2013).

2.7.3 Tantangan dan Pelajaran yang Dipetik

Meskipun ada keberhasilan, implementasi praktik pertanian berkelanjutan menghadapi beberapa tantangan:

4. Resistensi Awal: Petani awalnya enggan untuk mengadopsi praktik baru karena ketidaktahuan dan risiko yang dirasakan.
5. Keterbatasan Sumber Daya: Akses terbatas terhadap sumber daya finansial dan teknologi menjadi hambatan untuk implementasi.
6. Transfer Pengetahuan: Memastikan transfer pengetahuan yang efektif dan pelatihan yang berkelanjutan menjadi penting untuk adopsi yang berkelanjutan dari praktik-praktik berkelanjutan.

Jadi, studi kasus ini menyoroti potensi transformatif pembangunan pertanian berkelanjutan dalam meningkatkan mata pencaharian, meningkatkan keamanan pangan, dan melestarikan sumber daya alam. Dengan mengatasi tantangan melalui keterlibatan komunitas, pembangunan kapasitas, dan intervensi yang ditargetkan, perjalanan menuju pertanian berkelanjutan menjadi dapat diwujudkan, menawarkan jalan yang menjanjikan untuk pembangunan pedesaan dan pengelolaan lingkungan.

DAFTAR PUSTAKA

- Abson, D. J., Fischer, J., Leventon, J., Newig, J., Schomerus, T., Vilsmaier, U., von Wehrden, H., Abernethy, P., Ives, C. D., Jager, N. W., Lang, D. J., & Leverage, L. (2017). Leverage points for sustainability transformation. *Ambio*, 46(1), 30-39.
- Fuglie, K., & Rada, N. (2013). Productivity growth and the revival of U.S. Agriculture. *American Journal of Agricultural Economics*, 95(5), 1229–1236.
- Giller, K. E., Tittonell, P., Rufino, M. C., van Wijk, M. T., Zingore, S., Mapfumo, P., Adjei-Nsiah, S., Herrero, M., Chikowo, R., Corbeels, M., Rowe, E. C., Baijukya, F., Mwijage, A., Smith, J., Yeboah, E., van der Burg, W. J., Sanogo, O. M., Misiko, M., de Ridder, N., Karanja, S., Kaizzi, C., K'ungu, J., Mwale, M., Nwaga, D., Pacini, C., Vanlauwe, B. (2008). Communicating complexity: Integrated assessment of trade-offs concerning soil fertility management within African farming systems to support innovation and development. *Agricultural Systems*, 98(2), 139–151.
- Pretty, J., Chambers, A., Nagy, J., & Bradford, N. (2006). Resource-conserving agriculture increases yields in developing countries. *Environmental Science & Technology*, 40(4), 1114–1119.
- Pretty, J. (2018). Intensification for redesigned and sustainable agricultural systems. *science*, 362(6417), eaav0294.
- Ripple, W. J., Wolf, C., Newsome, T. M., Barnard, P., Moomaw, W. R., & World Scientists' Warning of a Climate Emergency (2020). World Scientists' Warning of a Climate Emergency. *BioScience*, 70(1), 8-12.
- Seufert, V., Ramankutty, N., & Foley, J. A. (2019). Comparing the yields of organic and conventional agriculture. *Nature*, 485(7397), 229-232.
- Tilman, D., Balzer, C., Hill, J., & Befort, B. L. (2019). Future threats to biodiversity and pathways to their prevention. *Nature*, 546(7656), 73–81.

BAB 3

TANTANGAN PERUBAHAN IKLIM GLOBAL

Oleh Ika Purnamasari

3.1 Pendahuluan

Iklim dan cuaca pada lokasi geografis permukaan bumi dibentuk dari proses interaksi antara permukaan, atmosfer, hidrosfer (lapisan air yang menyelimuti bumi), kriosfer (permukaan bumi yang mengandung es), serta biosfer (suatu lapisan di mana semua makhluk hidup dan lingkungannya berada). Interaksi tersebut digerakkan oleh tenaga eksternal yang berasal dari matahari, lapisan atmosfer, angin, dan pergerakan massa udara, serta lautan dan arus laut sehingga membentuk cuaca dan karakteristik iklim di suatu tempat (June dan Sarvina 2023).

Unsur-unsur cuaca dan iklim yaitu suhu udara, curah hujan, tekanan udara, kecepatan dan arah angin, kelembapan udara, kelembapan tanah dan topografi memengaruhi seluruh komponen dari produksi dan produktivitas pertanian termasuk luas area yang ditanam, intensitas pertanaman dan produktivitas lahan. Permasalahan utama yang menjadi tantangan kita saat ini adalah emisi antropogenik gas-gas rumah kaca (GRK) yang bersumber dari aktivitas manusia (June dan Sarvina 2023). Gas karbondioksida (CO) merupakan gas rumah kaca atmosferogenik terbesar dan saat ini konsentrasinya di atmosfer terus meningkat secara tajam. Pada bulan Januari 2024, gas CO di atmosfer tercatat 422.80 ppm (NOAA 2024).

Gas rumah kaca bersifat menyerap radiasi gelombang panjang yang dipancarkan oleh permukaan bumi-atmosfer. Tingginya konsentrasi gas rumah kaca menyebabkan terakumulasinya energi di atmosfer sehingga suhu sistem bumi-atmosfer terus meningkat, yang kita kenal dengan istilah pemanasan global. Pemanasan global ini kemudian menyebabkan

dan memicu terjadinya perubahan iklim (June dan Sarvina 2023). Jika konsentrasi GRK terus meningkat dengan laju 2-3 ppm/tahun, kenaikan suhu bumi pada 2035-2052 diperkirakan mencapai 1.5oC (IPCC 2021). Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika BMKG Indonesia telah melakukan proyeksi kenaikan suhu di Indonesia dan diperkirakan Indonesia akan mengalami kenaikan suhu rata-rata sampai 1.3 °C pada 20 tahun ke depan (BMKG 2024).

Perubahan iklim ditandai dengan meningkatnya suhu sistem bumi-atmosfer, diikuti oleh perubahan pola curah hujan dan distribusinya, meningkatnya kejadian iklim ekstrem, mencairnya lapisan es dan kenaikan muka air laut serta penurunan pH air laut (June dan Sarvina 2023). Beberapa hasil penelitian menunjukkan (IPCC 2021) bahwa perubahan iklim secara signifikan menurunkan produktivitas pertanian tanaman pan utama, seperti gandum, padi, jagung dan kedelai, melalui pengaruh terhadap proses ekofisiologi tanaman terkait fotosintesis, respirasi, konduktansi stomata serta pertumbuhan dan perkembangan tanaman.

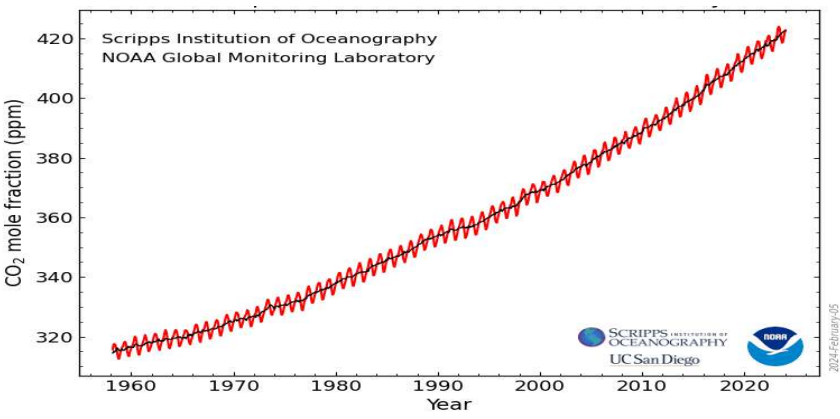
Perubahan iklim akan berdampak pada berkurangnya ketersediaan air dan perubahan waktu tanam yang tepat serta panjang masa tanam. Hal ini terkait akibat perubahan pola dan distribusi curah hujan. Perubahan iklim menjadikan periode musim hujan semakin pendek dengan curah hujan yang tinggi diikuti oleh musim kering yang lebih panjang. Perubahan iklim juga meningkatkan stress lingkungan dengan kejadian bencana hidrometeorologi yang semakin sering terjadi: banjir, kekeringan, erosi dan longsor oleh air hujan dan angin kencang; badai/topan, kebakaran hutan/ vegetasi, peningkatan kemasaman tanah dan salinitas serta degradasi biologis lahan pertanian. Secara keseluruhan, dampak perubahan iklim akan meningkatkan degradasi jasa lingkungan-pertanian/*agro-ecosystem services* yang diperlukan untuk keberlanjutan (*sustainability*) produktivitas pertanian (June dan Sarvina 2023).

3.2 Perubahan Iklim Global

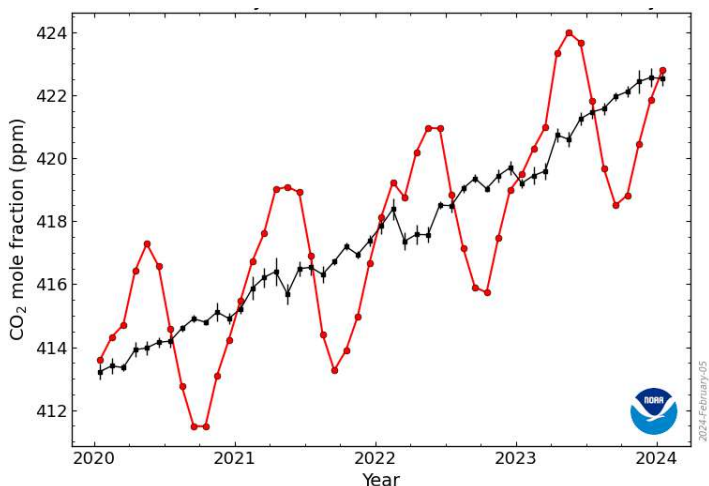
Perubahan iklim merupakan fenomena global yang mengacu pada perubahan kondisi lingkungan yang terjadi di bumi kita (IPCC 2007). Perubahan iklim juga diartikan sebagai perubahan unsur

iklim (seperti suhu dan curah hujan) dan peningkatan kejadian kondisi ekstrim akibat perubahan komposisi gas-gas pembentuk atmosfer seperti CO_2 , CH_4 dan N_2O yang bersifat menyerap radiasi gelombang panjang (June dan Sarvina 2023). Perubahan tersebut dapat terjadi dalam jangka waktu yang sangat lama, biasanya lebih dari 150 tahun, dan telah menunjukkan dampak yang signifikan terhadap berbagai ekosistem (Kumar dkk 2021). Perubahan iklim yang saat ini terjadi disebabkan oleh emisi antropogenik gas-gas rumah kaca yang terjadi akibat aktivitas manusia dengan laju dan intensitas yang terus meningkat (IPCC 2021).

Perubahan iklim terjadi akibat aktivitas manusia yang memanfaatkan bahan bakar fosil dan melakukan pembukaan hutan serta perubahan pengelolaan lahan yang menyebabkan meningkatnya konsentrasi gas rumah kaca, khususnya gas CO_2 , CH_4 , dan N_2O di atmosfer, yang memberikan dampak terhadap ekosistem biosfer (IPCC 2021). Gambar 3.1 menunjukkan peningkatan gas CO_2 di atmosfer wilayah subtropis bagian utara yang diukur pada ketinggian 3400m dari tahun 1960 hingga tahun 2024. Konsentrasi CO_2 di atmosfer mengalami fluktuasi secara musiman sebagaimana ditunjukkan oleh diagram garis berwarna merah pada Gambar 3.2. Namun demikian, rata-rata konsentrasinya terus meningkat sebagaimana ditampilkan oleh garis berwarna hitam.



Gambar 3.1. Rata-rata karbon dioksida atmosfer bulanan yang diukur di Observatorium Mauna Loa, Hawaii
Sumber: NOAA (2024)



Gambar 3.2. Konsentrasi CO₂ Atmosfer lima tahun terakhir di Observatorium Mauna Loa, Hawaii
Sumber: NOAA (2024)

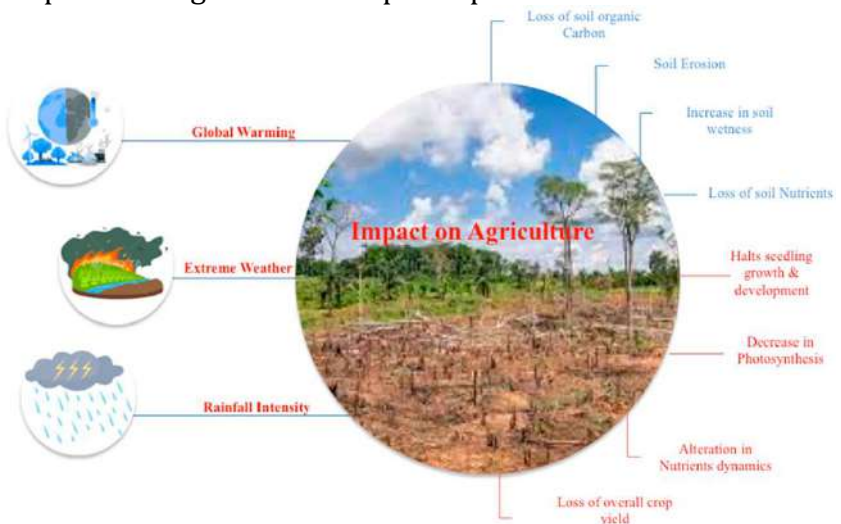
Perubahan terhadap sistem iklim bumi-atmosfer ditunjukkan oleh beberapa indikator sebagai berikut: 1) sekitar 30 miliar ton CO₂ dilepaskan ke atmosfer setiap tahun (2) panas yang dikembalikan ke permukaan bumi semakin tinggi, (3) karbon yang berasal dari pembakaran bahan bakar fosil diikat oleh terumbu karang semakin besar, (4) gas O₂ di atmosfer berkurang, (5) karbon di atmosfer akibat pembakaran bahan bakar fosil meningkat, (6) konsentrasi ozon dan tinggi troposfer meningkat, (7) suhu malam hari semakin tinggi. Beberapa kondisi perubahan pada sistem atmosfer-bumi tersebut menimbulkan dampak negatif yaitu suhu rata-rata bumi-atmosfer yang semakin tinggi, pola dan distribusi curah hujan yang berubah, pencairan lapisan es, kenaikan muka air laut, peningkatan kejadian bencana hidrometeorologis serta rusaknya ekosistem daratan dan lautan (June dan Sarvina 2023).

3.3 Dampak Perubahan Iklim Terhadap Pertanian

Perubahan iklim sangat berdampak pada sektor pertanian. Hal ini karena hampir semua proses dalam kegiatan pertanian baik dari pembukaan lahan, pembibitan, penanaman, perawatan (pengendalian hama dan penyakit), pengairan, pemanenan dan

kegiatan pasca panen sangat bergantung pada faktor iklim dan cuaca. Perubahan pada unsur-unsur iklim dan cuaca berpengaruh pada proses-proses tersebut. Penyusunan strategi adaptasi terhadap dampak perubahan iklim diperlukan untuk mendukung keberlanjutan sistem produksi pertanian di masa depan (June dan Sarvina 2023).

Produksi tanaman rentan terhadap perubahan iklim yang terkait dengan peningkatan suhu, peningkatan CO₂ dan perubahan pola curah hujan. Hal tersebut dapat menyebabkan penurunan produksi tanaman yang cukup besar (Eftekhari, 2023). Perubahan iklim diperkirakan mempunyai dampak yang signifikan pada pertanian melalui dampak langsung dan tidak langsung terhadap tanaman, tanah, ternak dan hama (Hatfield, et al. 2020). Bibi dan Rahman (2023) menggambarkan dampak perubahan iklim pada lahan pertanian diantaranya yaitu pengurangan bahan karbon organik tanah, erosi tanah, pengurangan hara tanah, penurunan fotosintesis, peningkatan kelembaban tanah serta pengurangan hasil panen sebagaimana ditampilkan pada Gambar 3.3.



Gambar 3.3. Dampak perubahan iklim pada sektor pertanian
Sumber: Bibi dan Rahman (2023)

World Food Program (2016) mengestimasi bahwa produksi pangan harus meningkat 50% di tahun 2030 agar dapat memenuhi

permintaan dari meningkatnya populasi. Pada saat yang sama, akibat perubahan iklim diproyeksikan akan terjadi penurunan produksi pangan dunia 1-7% sampai tahun 2060. Jika dampak perubahan iklim tidak diantisipasi, diperkirakan sekitar 20% penduduk dunia berisiko kelaparan (Surmaini dan Faqih, 2016). Dampak perubahan iklim secara garis besar terbagi dalam tiga kategori, yaitu dampak yang terus-menerus (continue) contohnya adalah kenaikan suhu udara, perubahan pola dan intensitas curah hujan, perubahan musim dan perubahan masa tanam. Dampak yang discontinue berupa kehilangan dan kegagalan produksi karena cuaca ekstrem dan juga serangan hama dan penyakit. Sementara dampak permanen contohnya adalah perubahan zona kesesuaian iklim komoditas pertanian dan pengurangan kawasan pertanian di Laerah pesisir karena peningkatan suhu muka laut (June dan Sarvina 2023).

3.3.1 Kenaikan tinggi muka air laut

Kenaikan permukaan air laut akan mempengaruhi wilayah pesisir dalam berbagai hal diantaranya banjir rob, erosi pantai, perubahan permukaan dan kualitas air tanah, penurunan produksi pertanian dan budidaya perairan akibat penggenangan air (Chen dan Chang 2012). Intrusi air laut akibat kenaikan muka air laut dan intrusi air asin akibat pemompaan berlebihan akan menyebabkan salinisasi kawasan pertanian pesisir (Corwin 2019). Hal tersebut dapat menyebabkan penurunan produktivitas tanaman khususnya padi.

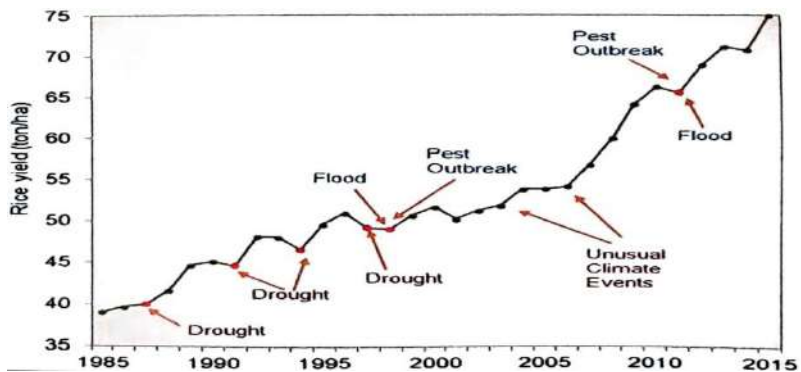
Kenaikan muka air laut secara permanen dapat mengurangi luasan lahan pertanian di seluruh wilayah pesisir Indonesia. Le Bars et al (2017) menyatakan bahwa pada skenario medium, kenaikan muka laut secara global mencapai 6,1 mm/tahun. Kenaikan ini akan berdampak pula pada pengurangan produksi pertanian pada 81 ribu km garis pantai Indonesia. Hasil skenario peningkatan 1mm muka air laut menyebabkan kehilangan hasil pertanian sebagaimana disajikan pada Gambar 4. Terlihat bahwa Pantai utara Pulau Jawa merupakan wilayah yang sangat terdampak, padahal wilayah tersebut merupakan lumbung padi nasional (June dan Sarvina 2023).



Gambar 3.4. Dampak scenario kenaikan 1mm muka air laut terhadap kehilangan produksi padi dalam ton (<http://cigrasp.pikpotsdam.de/maps/>)
Sumber: June dan Sarvina (2023).

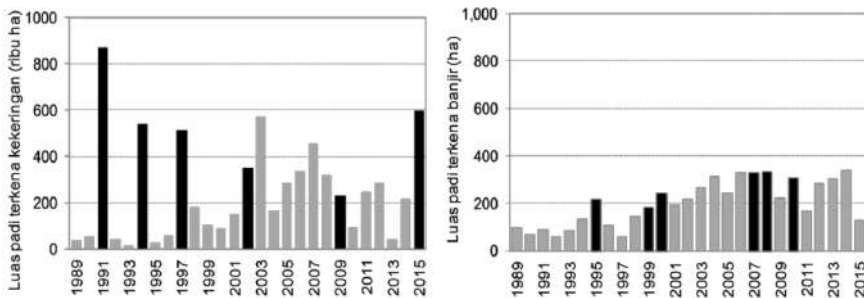
3.3.2 Peningkatan kejadian iklim ekstrim

Kejadian iklim ekstrem seperti kekeringan dan banjir diproyeksi akan lebih sering terjadi dengan durasi dan intensitas yang lebih tinggi. Kejadian bencana alam akibat iklim ekstrem yang menyebabkan kerugian terbesar pada sektor pertanian adalah banjir, kekeringan dan tanah longsor (Surmaini dan Faqih, 2016). Gambar 3.5 menunjukkan bahwa penurunan produksi padi di Indonesia berasosiasi dengan bencana terkait iklim seperti banjir, kekeringan, serta serangan hama dan penyakit tanaman (June dan Sarvina 2023).



Gambar 3.5. Data historis produksi padi Indonesia taun 1985-2015 berdasarkan data BPS dan Kementerian Pertanian
Sumber: June dan Sarvina (2023).

Pada sektor pertanian di Indonesia, kejadian iklim ekstrem yang paling besar pengaruhnya adalah kejadian El Niño dan La Niña. El Niño didominasi oleh penurunan curah hujan yang menyebabkan bencana kekeringan, sebaliknya La Niña berasosiasi dengan peningkatan curah hujan yang menjadi pemicu kejadian banjir. Dampak kejadian iklim ekstrem tersebut dapat berupa berkurangnya luas panen atau turunnya produktivitas. Gambar 6 menunjukkan luasan lahan padi yang terdampak kejadian iklim ekstrim kekeringan dan banjir. Namun, kejadian iklim ekstrem juga dapat menimbulkan kondisi iklim yang kondusif bagi komoditas pertanian tertentu, Sebagai contoh, musim hujan yang berkepanjangan akibat La Niña menimbulkan dampak positif pada produksi padi akibat meningkatnya luas tanam pada musim kemarau (Surmaini dan Faqih, 2016).



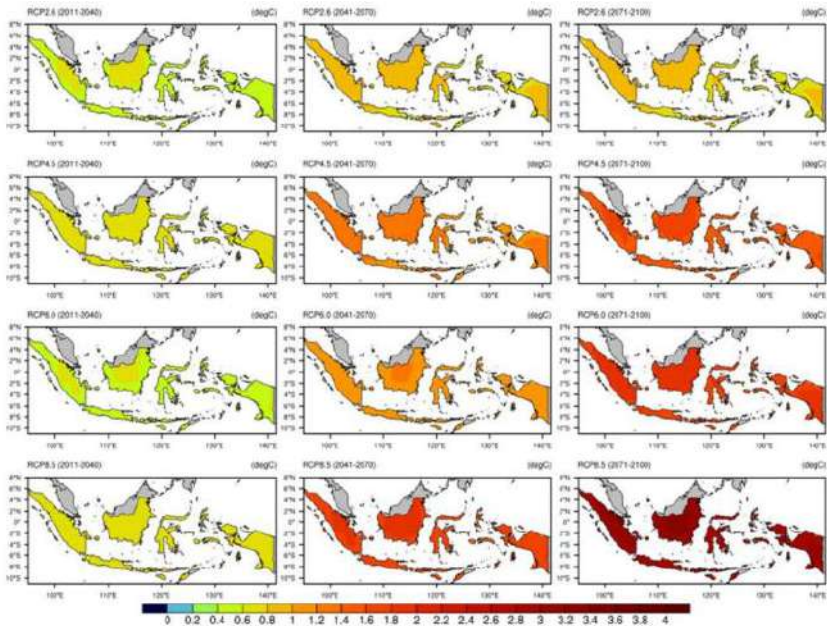
Gambar 3.6. Luas tanaman padi terkena kekeringan dan banjir periode 1989-2015

Sumber: Direktorat Perlindungan Tanaman Pangan

3.3.3 Kenaikan suhu udara

Boer et al. (2011) menyatakan bahwa penurunan produksi padi di Jawa pada tahun 2025 akibat kenaikan suhu dan konversi lahan mencapai 6 juta ton dan pada tahun 2050 mencapai lebih dari 12 juta ton dengan asumsi terjadi laju konversi lahan sawah 0,77% per tahun. Proyeksi suhu untuk Indonesia berdasarkan skenario RCP (*Representative Concentration Pathways*) disajikan pada Gambar 3.7. Gambar tersebut menunjukkan bahwa semakin ekstrem skenario RCP yang digunakan, maka peningkatan suhu semakin besar. Hal ini dapat terlihat dari perbandingan antara

skenario optimis dengan strategi mitigasi agresif (RCP 2,6) dan skenario yang pesimis (RCP 8.5). Perbedaan dari peningkatan suhu rata-rata semakin besar pada periode 2071-2100, dimana pada RCP 8.5 mengalami peningkatan mencapai 4 °C, sementara pada RCP 2.6 berada di bawah 1°C (Surmaini dan Faqih, 2016).

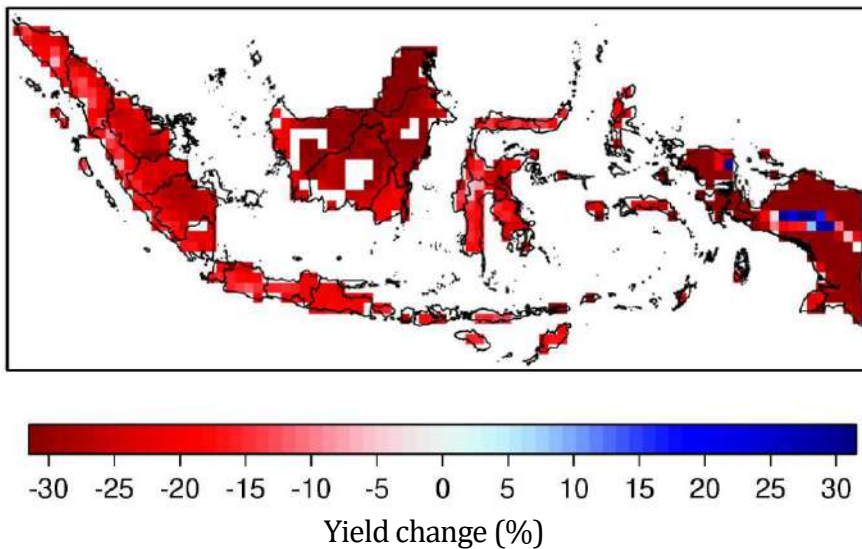


Gambar 3.7. Perubahan suhu udara rata-rata tahunan di Indonesia (dalam °C) berdasarkan rata-rata ensembel multimodel dari 24 model GCM CMIP5 untuk skenario RCP (RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0 dan RCP8.5) pada periode 30 tahunan 2011-2040, 2041-2070 dan 2071-2100. Perubahan dihitung relatif terhadap periode baseline 1981-2010

Sumber: Faqih et al. (2016)

Kinose *et al.* (2020) telah melakukan penilaian pengaruh kenaikan suhu udara terhadap produksi padi di Indonesia dengan menggunakan beberapa pemodelan iklim. Gambar 8 menunjukkan proyeksi perubahan produksi padi akibat suhu udara. Terlihat bahwa perubahan signifikan terhadap produksi padi disebabkan

oleh kenaikan suhu udara. Kenaikan suhu udara diproyeksikan menurunkan hasil hingga 30%.



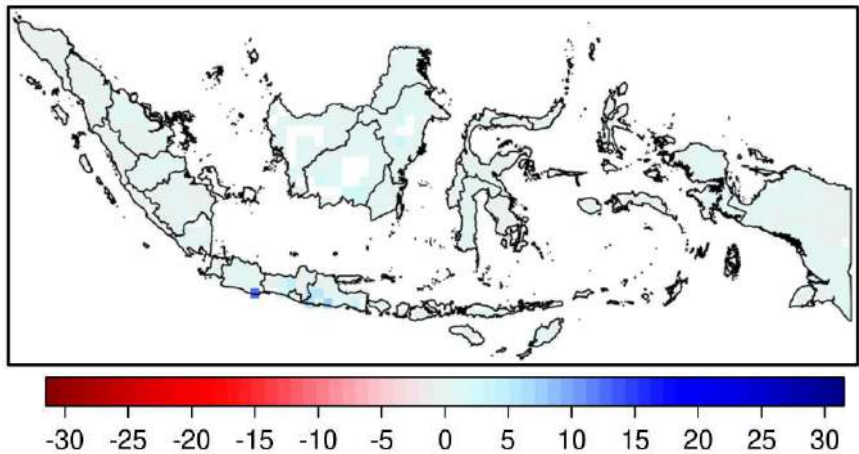
Gambar 3.8. Proyeksi perubahan produksi padi pada tahun 1939-2042 dengan menggunakan indikator perubahan suhu udara.
Sumber: Kinose et al. (2020)

Dampak lain peningkatan suhu udara yang adalah peningkatan serangan organisme pengganggu tanaman (OPT). Susanti et al. (2020) menyebutkan bahwa perubahan iklim telah menyebabkan peningkatan luasan serangan hama dan penyakit. Dampak lain adalah munculnya hama-hama dominan baru. Perubahan hama dominan itu disinyalis disebabkan oleh adanya peningkatan suhu udara dan kelembapan (June dan Sarvina 2023).

3.3.4 Perubahan pola dan intensitas curah hujan

Perubahan pola dan intensitas curah hujan menyebabkan perubahan masa tanam dan awal musim hujan. Masa tanam dan awal musim hujan sangat penting dalam pertanian khususnya untuk tanaman semusim. Perubahan masa tanam menyebabkan perubahan pola tanam. Apabila petani tidak melakukan penyesuaian waktu tanam maka produktivitas pertanian akan

menurun dan kehilangan hasil akibat risiko iklim semakin meningkat (June dan Sarvina 2023). Penelitian yang dilakukan oleh Kinose *et al.* (2020) yang ditunjukkan pada Gambar 9 menunjukkan adanya perubahan produksi padi di seluruh wilayah Indonesia. Prakiraan iklim dan musim dalam penyusunan rencana usaha tani sangat diperlukan saat ini. Kalender Tanam Terpadu (Katam) yang telah dikembangkan oleh Kementerian Pertanian merupakan salah satu upaya memberikan informasi awal tanam dan masa tanam untuk komoditas tanaman pangan terutama padi dengan memanfaatkan prediksi iklim dari BMKG (June dan Sarvina 2023).



Gambar 3.9. Proyeksi perubahan produksi padi pada tahun 1939-2042 dengan menggunakan indikator perubahan suhu udara.

Sumber: Kinose *et al.* (2020)

Perubahan pola dan intensitas hujan pada tanaman perkebunan yang sebagian besar merupakan tanaman tahunan, dapat menyebabkan penurunan produktivitas, pergeseran musim berbunga dan panen, serta dapat menyebabkan perubahan tingkat kesesuaian lahan. Oleh karena itu, dalam perencanaan jangka panjang kajian kesesuaian lahan komoditas pertanian sangat diperlukan. Kajian untuk tanaman Kopi Arabika di wilayah sentra produksi Indonesia diproyeksikan akan terjadi perubahan kesesuaian lahan baik lokasi maupun luasannya (June dan Sarvina 2023).

DAFTAR PUSTAKA

- BMKG. (2024). Proyeksi Perubahan Suhu Udara. Perubahan Iklim. <https://www.bmkg.go.id/iklim/?p=proyeksi-perubahan-suhu-udara>.
- Boer, R. 2011. Ancaman Perubahan Iklim terhadap Ketahanan Pangan. Presentasi pada Workshop Nasional dan FGD Adaptasi Perubahan Iklim. Bandung 9-10 November 2011. Balai Besar Sumberdaya Lahan Pertanian. Kementerian Pertanian.
- Chen, C. C., McCarl, B., & Chang, C. C. (2012). Climate change, sea level rise and rice: global market implications. *Climatic change*, 110(3-4), 543-560.
- Corwin, D. L. (2021). Climate change impacts on soil salinity in agricultural areas. *European Journal of Soil Science*, 72(2), 842-862.
- Eftekhari, M.S. Impacts of Climate Change on Agriculture and Horticulture. In Climate Change: The Social and Scientific Construct; Bandh, S.A., Ed.; Springer International Publishing: Cham, Switzerland, 2022; pp. 117–131. ISBN 978-3-030-86290-9
- Faqih, A. R. Hidayat, S.D. Jatmiko, dan Radini. 2016. Climate modeling and analysis for Indonesia 3rd national communication (TNC): Historical and climate and future climate scenarios in Indonesia. Final Report. Ministry of Environment and Forestry (MoEF). United National Development Programme (UNDP) and Bogor Agricultural University.
- Hatfield, J.L.; Antle, J.; Garrett, K.A.; Izaurralde, R.C.; Mader, T.; Marshall, E.; Nearing, M.; Philip Robertson, G.; Ziska, L. Indicators of climate change in agricultural systems. *Clim. Chang.* 2020, 163, 1719–1732
- [IPCC] Intergovernmental Panel on Climate Change. 2021. Climate Change 2021. The Physical Science Basis. 6th Assessment Report of the IPCC. WMO, UNEP, WGI.

- June, Tania dan Sarvina, Yeli. (2023). Strategi Mempertahankan Produksi Pertanian Dalam Menghadapi Perubahan Iklim Pertanian Cerdas Iklim. Bogor: IPB Press.
- Kinose, Y., Masutomi, Y., Shiotsu, F., Hayashi, K., Ogawada, D., Gomez-Garcia, M., ... & Fukushi, K. (2020). Impact assessment of climate change on the major rice cultivar Ciherang in Indonesia. *Journal of Agricultural Meteorology*, 76(1), 19-28.
- Kumar, Abhishek, Shilpi Nagar, Shalini Anand. (2021). Global Climate Change. Editor: Suruchi Singh, Pardeep Singh, S Rangabhashiyam, K.K. Srivastava. Elsevier.
- Le Bars D, Drijfhout S, De Vries H. 2017. A high-end sea level rise probabilistic projection including rapid Antarctic ice sheet mass loss. *Environmental Research Letters*. 12(4): [diakses pada: <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aa6512>].
- Surmaini, E., & Faqih, A. (2016). Kejadian iklim ekstrem dan dampaknya terhadap pertanian tanaman pangan di Indonesia.
- Susanti E, Surmaini E, Estiningtyas W. 2020. Parameter Iklim sebagai Indikator Peringatan Dini Serangan Hama Penyakit Tanaman. *Jurnal Sumberdaya Lahan*. 12(1): 59. <https://doi.org/10.21082/jsdl.v12n1.2018.59-70>.
- World Food Program. 2016. How Climate Change Affect Hunger. <http://www.wfp.org/climate-change>. Diakses 21 Juli 2016.

BAB 4

PUPUK ORGANIK

Oleh Ilham

4.1 Pendahuluan

Penggunaan pupuk berbahan organik di Indonesia sudah cukup lama diterapkan oleh para petani, akan tetapi penggunaannya semakin menurun disebabkan oleh munculnya pupuk kimia yang cukup praktis penggunaannya dan memberikan respon yang cepat terhadap tanaman. Para petani mengabaikan dampak yang terjadi pada tanah dimasa yang akan datang seperti tanah menjadi keras dan kurang produktif. Pemanfaatan pupuk organik sebagai salah satu langkah untuk memperbaiki sifat fisik tanah pada lahan pertanian. Selain itu, Pupuk organik memiliki efek yang positif bagi tanaman, terutama untuk mempengaruhi struktur tanah dan pertumbuhan tanaman. (Siahaan dkk, 2023).

Pupuk organik dapat dikatakan sebagai salah satu penyedia nutrisi atau hara untuk tanaman serta memperbaiki struktur tanah. Pupuk organik terbukti memberikan manfaat bagi peningkatan produksi pertanian dan mengurangi pencemaran lingkungan serta meningkatkan daya pemanfaatan lahan untuk masa jangka panjang. Dari Hasil penelitian disebutkan bahwa lahan sawah pada berbagai daerah di Indonesia masih mengandung bahan organik yang masih tergolong rendah. karenanya, pemulihan dan perbaikan sifat fisik tanah sangat diperlukan dengan penerapan pemanfaatan berbagai pupuk yang berbahan organik pada setiap musim sebanyak 2 ton/ha. Selain itu, pupuk organik dapat memberikan ruang untuk tumbuh kembangnya mikroba dan fauna dalam tanah. (Widowati dkk, 2022).

Keberadaan Pupuk organik menjadi komponen penting dalam pemupukan berimbang. Hal yang dimaksud adalah pemberian pupuk sebagai penambah nutrisi ke dalam tanah dengan memperhatikan sistem tanah dan tanaman, kelestarian lingkungan dan target hasil pertanian. Dengan penggunaan pupuk organik

dapat memberikan manfaat diantaranya mengefisiensikan biaya pupuk, meningkatkan kualitas dan hasil produksi tanaman, serta meningkatkan sistem dinamika dalam tanah yang mendukung tercapainya kesehatan tanah. Pupuk iorganik dapat idibedakan idari bentuk dan isumber bahan penyusunannya. Berdasarkan idari bentuk, ipupuk iorganik memiliki idua ijenis iyaitu ipupuk iorganik padat idan icair.

4.2 PupukiOrganik Padat

Pupuk organik sendiri berasal dari hasil pengomposan baik itu dari sisa tanaman ataupun tanaman mati, bagian hewan ataupun kotoran hewan, dan atau limbah organik lainnya dengan memanfaatkan mikroorganisme untuk mempercepat proses penguraian dan menghasilkan berbagai unsur hara. Pupuk organik padat memiliki hasil akhir yang berbentuk padat baik dalam bentuk curah, butiran ataupun granul yang dapat diaplikasikan langsung dengan cara ditaburkan Sedangkan berdasarkan dari sumber bahan penyusunnya, pupuk organik padat dikelompokkan menjadi 3(tiga) jenis, pupuk kompos, kandang. dan hijau.

4.2.1 PupukiKandang

Pupuk ikandang dapat ididefinisikan isebagai iproduk yang dihasilkan idari limbah atau kotoran hewan iyang idapat dimanfaatkan iuntuk memperbaiki isifat ifisik dan kulaitas itanah serta menambah nutrisi pada tanah. Pupukikandang yang masih tergolong baru dapat mempengaruhi tanaman sebab unsur hara yang terkandung didalamnya iyang iberasal dari urine iternak masih tergolong icukup itinggi. iSelain itu, zat zatiorganis yang terkandung di idalam ipupuk kandang yang masih baru tersebut belum iseluruhnya iterurai ioleh ibakteri sehinggai tidak dapat langsung diserap iakar itanaman. Pupuk kandang memiliki kandungan ihara imakro seperti initrogen(K), ifosfor(P) dan kalium(K), dan iunsur ihara imikro seperti ibesi, iseng, iboron, idan molibdenium (Nurhayati, 2021).

Pupuk kandang yang biasa dikenal dengan pupuk dari kotoran atau limbah hewan ternak yang berasal dari usahatani seperti kambing, ayam, dan sapi. Unsur hara yang terkandung pada

setiap kotoran hewan, masing-masing memiliki ukuran yang berbeda-beda sesuai jenis dan jumlah makanan yang diberikan pada hewan ternak. Secara garis besar, unsur hara dalam kotoran hewan masih tergolong rendah daripada kandungan pada pupuk organik sehingga pengaplikasian dari pemberian pupuk kandang ini dibutuhkan jumlahnya yang lebih besar daripada pupuk organik.

Penerapan pupuk kandang telah dilakukan sejak lama untuk menunjang pertumbuhan tanaman, baik tanaman pangan, ataupun tanaman perkebunan. Yang menjadi perhatian tersendiri dalam pengaplikasiannya yakni kadar unsur hara yang terkandung didalamnya sangat bervariasi. Selain itu, komposisi unsur hara yang ada di dalam pupuk kandang sangat erat kaitannya dengan jenis ternak, jenis makanan yang diberikannya, dan bahan yang dijadikan alas pada kandang, serta pengelolaannya (Hartatik dan Widowati, 2006).



Gambar 4.1. Pupuk Kandang
(Sumber : <https://agrozone.id>)

Kualitas pupuk kandang yang dihasilkan sangat ditentukan oleh jumlah unsur hara yang terkandung di dalamnya. Unsur hara yang terkandung dalam pupuk kandang tidak hanya bergantung pada jenis dan umur hewannya, akan tetapi tergantung juga dari sumber-sumber makanan yang diberikan dan jumlah air diminum

oleh hewan ternak. Terlihat kadar pada masing-masing kandunganiunsur haraipada pupukikandang dari beberapa jenis hewaniternak (Tabeli4.1).

Tabel 4.1. Kandugan Unsur Hara Berbagai Hewan Ternak

Sumber pupuk kandang	N	P	K	Ca	S	Mg	Fe
				ppm			
Sapi Perah	0,53	0,35	0,14	0,28	0,05	0,11	0,004
Sapi Dagingi	0,65	0,15	0,30	0,12	0,09	0,10	0,004
Domba	1,28	0,19	0,93	0,59	0,09	0,19	0,020
Kuda	0,70	0,10	0,58	0,79	0,07	0,14	0,010
Unggas	1,50	0,77	0,89	0,30	0,00	0,88	0,100

Sumber : Tan (1993)

Pupukikandang Unggas (ayamibroiler) mengandung unsur hara fosfor (P) yang cukup lebih tinggi daripada pupuk kandanglainnya. Jumlah unsurihara tersebut dipengaruhi oleh sumber dan jenis makanan yang diberikan pada hewan ternak. Selain itu, Kotoran unggas masih terdapat campuran sisa-sisa makanandidan sekam yang dijadikan alas kandang sehingga menambah jumlah kadar unsur hara pada pupuk kandang. Dari penelitian yang sudah dilakukan, pengaplikasian pupuk dari kotoran unggas(ayam) dapat memberi respon cukup baik pada tanaman di musimipertama.iHal tersebut terjadi dikarenakan pupuk kandang dari unggas (ayam) relatif lebih cepat dalam proses dekomposisi dan memiliki kandunganiunsur haraiyang tergolong cukupiuntuk keberlangsungan pertumbuhanitanaman dibandingkan dengan pupukikandang hewan ternakilainnya (Widowati et al., 2005).

Pupukikandang dari kotoranihewan ternak sapi merupakanisalah satu jenis pupukikandang yang mengandung ikadar iserat yang itinggi seperti iselulosa, ihal tersebut sesuai darihasil pengukuraniparameter C/Nirasio yangicukup itinggiii>40.iPupuk kandang dari kotoranisapi tidak dapat

diaplikasikan langsung pada lahan pertanian sebelum dilakukan dekomposisi karena masih mengandung kadar C yang relatif tinggi sehingga akan menekan dan menghambat proses pertumbuhan tanaman utama yang dibudidayakan. Hal tersebut dikarenakan mikroba dekomposer akan menggunakan kadar N yang tersedia untuk mendekomposisi bahan organik tersebut sehingga tanaman utama akan mengalami kekurangan unsur Nitrogen (N). Untuk memaksimalkan pemanfaatan pupuk kandang dari kotoran sapi lebih memberikan respon yang baik pada tanaman, harus dilakukan pengomposan agar menghasilkan pupuk kandang yang memiliki kadar rasio C/N di bawah 20. Selain itu, pemanfaatan pupuk kandang sapi secara langsung pada lahan pertanian juga berkaitan dengan kandungan kadar air yang masih tinggi sehingga akan menyebabkan timbulnya berbagai macam bakteri dan jamur serta proses pelepasan amoniak yang masih berproses. Pupuk kandang ini lebih dikenal sebagai pupuk dingin oleh petani.

Pupuk kandang kambing dikategorikan dalam pupuk organik padat. Tekstur dari pada kotoran kambing sendiri memiliki ciri yang khas, yakni berbentuk butiran-butiran yang cukup sukar pecah secara fisik sehingga akan berpengaruh terhadap proses pengomposan dan proses pembentukan hara. Rasio C/N pupuk kandang kambing umumnya di atas 30. Selain itu, standar pupuk kandang yang baik harus memiliki rasio C/N yang rendah (<20), sehingga akan jauh lebih baik untuk digunakan bila pupuk kandang kambing dilakukan pengomposan terlebih dahulu. Pupuk kandang kambing yang digunakan secara langsung akan memberikan manfaat yang lebih baik dari pupuk kandang sapi pada musim kedua pertanaman. Kadar air pada pupuk kandang kambing sedikit lebih tinggi dari pupuk kandang ayam dan lebih rendah dari pupuk kandang sapi. Pupuk kandang kambing mengandung unsur hara N dan P hampir sama dengan kandungan pupuk kandang lainnya, sementara kandungan unsur hara kalium relatif cukup tinggi dari pupuk kandang lainnya (Widowati et al., 2005).

Proses pembuatan pupuk kandang umumnya berjalan dengan sendirinya baik itu dengan sedikit campur tangan manusia maupun tanpa bantuan manusia. Pupuk kandang yang dibuat secara konvensional membutuhkan waktu yang relatif lama untuk proses dekomposisi yakni sekitar 2 sampai 4 bulan, bahkan bisa sampai 6 bulan lamanya untuk dapat memanen pupuk kandang yang baik dan matang (Setiawan, 2010). Cara yang umum dilakukan dalam pembuatan pupuk kandang dengan sistem *wind row*, yakni Kotoran ternak ditumpuk memanjang sekitar 40 meter dengan ketinggian 0,6 meter dan lebar 1,5-2 meter. Pada sistem ini memanfaatkan sirkulasi udara secara alami. Optimalisasi itumpukan sangat dipengaruhi oleh kondisi bahan baku, kelembaban, ruang pori, dan isirkulasi udara untuk mengimbangi pelepasan panas yang dikeluarkan dari bahan baku sebagai hasil dekomposisi bahan organik oleh mikroba. Selama proses dekomposisi, bahan baku dilakukan pembalikan secara periodik setiap sekali seminggu sampai pengomposan selesai. Pembalikan dilakukan dengan tujuan untuk menghambat timbulnya bau yang tidak sedap selama proses dekomposisi. Pembalikan dapat dilakukan dengan cara mekanis ataupun manual.

4.2.2 Pupuk Kompos

Kompos atau bokashi merupakan pupuk organik yang berasal dari bahan-bahan organik yang telah mengalami pelapukan dengan cara pengomposan baik secara alami maupun hasil fermentasi yang menggunakan bantuan mikroorganisme pengurai berupa bakteri pembusuk yang bekerja mempercepat proses penguraian, sehingga proses pengomposan yang awalnya membutuhkan waktu cukup lama, menjadi lebih singkat atau dipercepat dengan menggunakan bioaktivator seperti EM4. Bahan baku dalam pembuatan kompos berupa sisa-sisa tanaman, sisa ranting, jerami, kotoran hewan ternak, bunga yang telah gugur, dan masih banyak lagi.

Proses pelapukan bahan organik dapat terjadi secara alami oleh mikroorganisme yang akan tumbuh subur pada lingkungan yang lembab dan basah, namun kehadiran

umetode kompos idengan bantuan bioaktivator dapat membantu mempercepat proses pelapukan. Pelapukan dapat iterjadi dalam iwaktu 1 sampai 3 bulan, sedangkan jika itidak imenggunakan kompos akan memakan waktu puluhan tahun untuk mengalami pelapukan secara sempurna.iDimana ipengomposan adalah suatu iproses dimana bahan-bahan organik imengalami ipenguraian isecara ibiologisioleh mikroba sepertiijamur atau bakteriiyang memanfaatkanibahan organicisebagai sumberienergi (Dachlan, et al, 2012).



Gambar 4.2. Ilustrasi Pupuk Kompos
(Sumber : <https://www.detik.com>)

Pupuk iKompos isangat iberpengaruh iterhadap ilahan ipertanian, ikarena bahan iorganik iyang iterkandung i ididalamnya iberfungsi iuntuk menggantikan ibahan iorganik iyang iberkurang i idalam itanah. iSelain itu, Pupuk ikompos imemiliki ibeberapa ikeuntungan iselain ibagi itanaman, juga idapat imemperbaiki isifat ifisik idan istruktur itanah, imeningkatkan kapasitas imenahan iair, idan imeningkatkan ikehidupan ibiologi itanah. Pupuk ikompos iyang imengandung izeolite idan ifosfat idapat memperbaiki isifat ifisik itanah idan imempengaruhi itanaman(Rasyid, iB., 2012)

Tujuan iutama ipengaplikasian ipupuk ikompos isebagai ipupuk iorganik yaitu imenyuplai iketersediaan inutrisi ibagi itanaman i idan imemperbaiki sifat ifisik itanah. iSalah isatu ialternatif ipemecahan iatau isolusi iuntuk membatasi

ikemungkinan idampak inegatif iyang iditimbulkan iakibat pemberian ipupuk ianorganik idengan ipemberian ipupuk ikompos. Penggunaan ipupuk ikompos isebagai ipupuk iorganik iyang ilebih ramah lingkungan idan iberkelanjutan.

Pembuatan ipupuk iorganik ikompos. iBahan iutama iyang idigunakan adalah isisa-sisa itanaman ipertanian, idedak, iserbuk igergaji, idan ipupuk kandang i(ayam/kambing/sapi/dan ilain-lain), iserta iterpal pembungkus/penutup. iAdapun itahapan idalam ipembuatan ikompos sebagai iberikut:

1. Siapkan isampah iorganik iatau isisa isisa itanaman iyang sudah idi icacah ihalus ilalu iditumpuk ipada isebuah iarea dengan iukuran ilebar i1,3 im ipanjang i2 im isetebal i15 icm.
2. Letakkan idiatasnya ipupuk ikandang isetebal i5-15 icm secara imerata.
3. Masukkan iserbuk igergaji ikayu isecara imerata ilalu iditutup dengan idedak isecara itipis idan imerata.
4. Larutkan icairan ipembiakan ibakteri iEM-4 isebanyak i600 ml ke idalam iair i10 iliter idan iaduk isampai imerata. iSetelah itu, ituang ipada itumpukan ilapisan idedak itersebut.
5. Ulangi itahapan ino.1 isampai i4 i(mulai ipemberian isisa tanaman, ipupuk ikadang, iserbuk igergaji, idedak idan icairan bakteri iEM-4) iyang itumpuk idiatas ilapisan itahap ipertama hingga iberlapis-lapis isetinggi i1 i– i1,5 imeter.
6. Bahan ikompos iditutup idengan iterpal isecara irapat-rapat. Suhu iakan imeningkat imulai i40 ihingga i65°C ipada tumpukan iyang i imenunjukkan ibahwa imikroba imulai bekerja iuntuk imelapukkan ibahan ikompos.
7. Selama iproses isetiap isekali idalam iseminggu ikompos diaduk iatau idibolak ibalik, ibila iperlu iditambahkan ilagi cairan ibakteri iEM-4. iSetelah imerata iditutup ikembali dengan iterpal.
8. Setelah i2 isampai i4 iminggu ikompos isudah idapat digunakan. iKompos iyang imatang iumumnya idicirikan dengan iwarnanya ihitam ikecoklatan, itidak iberbau menyengat, idan iremah iatau igembur.

4.2.3 Pupuk iHijau

Pupuk ihijau iberupakan isalah isatu ipupuk iorganik iyang iberasal idari bahan ibahan iorganik ihijau iseperti isisa isisa itanaman ipanen , igulma, dan itanaman ipagar. iPengaplikasian i ipupuk ihijau idi ilahan i ipertanian yaitu itanaman imuda i iyang ilangsung idibenamkan iatau itanaman idapat dijadikan imulsa iatau itanaman iyang iditanam ikhusus, iatau dikomposkan iterlebih idahulu iuntuk ipenghasil ipupuk ihijau.

Tanaman iyang imenjadi ibahan ipupuk ihijau idibenamkan iakan mengalami ipenguraiaan ioleh imikroorganisme itanah idan isenyawa kompleks iyang iterdapat ipada itanaman iyang iakan idipecah imenjadi senyawa isederhana iyang idapat idimanfaatkan ioleh itanaman ibudidaya. Salah isatu icontoh itanaman iyang idapat idijadikan ibahan iatau sumber ipupuk ihijau iyaitu itanaman iyang imengandung ibanyak iunsur nitrogen idan itingkat iC/N inya ijuga irendah iseperti itanaman leguminosa. iSelain iitu, itanaman ilain iyang imemenuhi isyarat iuntuk dijadikan ibahan isebagai ipupuk ihijau iadalah itanaman ipaku iair iAzolla pinnata ikarena imemiliki itingkat iC/N irasio ihampir isama idengan irasio C/N itanah. iEceng igondok iyang iberupakan igulma iair ijuga idapat dijadikan isebagai ipupuk ihijau ikarena imengandung iunsur ihara iyang cukup itinggi.

Perbedaan ipupuk ihijau iorganik idengan ipupuk iorganik ilainnya iadalah tanaman iyang idijadikan isumber ibahan iorganik ilangsung idibenamkan, atau idijadikan imulsa, isedangkan ipersamaannya iadalah ibisa ijuga dikomposkan. iPupuk ihijau iberupakan isalah isatu ipupuk iorganik iyang sangat ipotensial ikarena imemiliki ikemampuan iuntuk imemperbaiki sifat ifisik, ikimia, idan ibiologi itanah, iselain iitu ipenggunaan ipupuk hijau iyang idiberikan ipada ilahan ipertanian ihampir itidak imemiliki dampak inegatif iterhadap itanah iartinya itidak imeninggalkan iracun ataiuresidu iseperti ipada ipupuk ianorganik. iSebaliknya ipengaplikasian pupuk ihijau idi ilahan ipertanian idapat imembantu imemperbaiki lingkungan idalam imempertahankan isiklus iekologinya imenjadi ilebih baik. i

Menuruti iFAO i(2007), ipupuk ihijau iorganik iyang imenggunakan ibahan tanaman ipaku iair imemiliki i93,3 i% iberat

isegarnya imengandung iair dan imemiliki iyang imendekati irasio iC/N itanah i iyakni i irasio C/Ni18,3. Dari iHasil ipenelitian ipupuk ihijau iorganik iseperti itanaman ipaku iair atau iazolla idengan iperlakuan ilamanya ipembenaman itanaman kedalam itanah iakan imemberikan ipengaruh isifat ifisik itanah iyakni memperbaiki istruktur itanah, idan isecara ibiologi imeningkatkan aktivitas-aktivitas imikroorganisme itanah, isehingga iekosistem itanah menjadi ilebih ibaik.



Gambar 4.3. Sumber Pupuk Hijau
(Sumber : <https://pustaka.setjen.pertanian.go.id>)

Semua tanaman dapat dijadikan bahan dalam proses pembuatan pupuk hijau, akan tetapi tanaman yang dapat dijadikan sebagai sumber pupuk hijau iharus imemiliki ikandungan nitrogen yang cukup itinggi, nilai atau tingkat irasio C/N irendah, dan mengandung ihumus total yang itinggi. Tanaman yang tidak idapat memenuhi isyarat harus dilakukan melalui pengomposan iterlebih dahulu. Beberapa ibahan iutama sebagai isumber dalam pembuatan ipupuk ihijau diantaranya :

1. Sisa tanaman dari hasil panen yang merupakan bagian yang tidak memanfaatkan dari hasil panen dapat menjadi sumber bahan organik pupuk hijau. Saat panen tidak semuanya diambil, ada sisa tanaman yang dibiarkan tertinggal. Sebagai

- contoh misalnya panen tanaman padi yang menyisakan jeraminya.
2. Tanaman gamal atau lamtoro yang sengaja ditanam disela-sela tanaman pokok atau tanaman utama untuk kebutuhan sumber pupuk hijau organik.
 3. Tanaman gulma yang berlimpah dapat dijadikan sebagai sumber pupuk hijau organik seperti eceng gondok, gulma babadotan, dan kacang-kacangan dan jenis gulma lainnya yang dapat dijadikan sumber pupuk hijau.
 4. Tanaman yang berasal dari golongan legumenose sebagai tanaman penutup tanah dan umumnya ditanam berdampingan dengan tanaman pokok atau tanaman utama.

4.3 Pupuk Organik Cair

Sampah organik dapat dijadikan pupuk organik cair selain dari pupuk organik padat. Pembuatan pupuk cair kurang lebih sama dengan pembuatan pupuk organik padat dengan menggunakan bioaktivator untuk mempercepat proses penguraian atau fermentasi. Pupuk organik cair sendiri merupakan pupuk yang berasal dari tumbuhan atau hewan yang sudah mengalami fermentasi (Simamora et al, 2005). Kandungan bahan kimia yang dimiliki maksimum 5%. Peneliti lainnya, mengatakan bahwa pupuk organik cair adalah larutan dari pembusukan bahan-bahan organik yang berasal dari sisa tanaman, kotoran hewan, dan manusia yang kandungan unsur haranya lebih dari satu unsur Hadisuwitu (2007). Jenis sampah organik yang dapat dijadikan sebagai bahan pupuk organik cair adalah:

1. Sisa nasi dan sayuran basi, namun harus dicuci terlebih dahulu dan peras lalu buang airnya
2. Sampah sayuran
3. Sisa tulang ikan, ayam, kulit telur
4. Sampah buah-buahan (anggur, kulit jeruk, apel dan lainnya), tidak termasuk kulit buah-buahan yang keras seperti kulit buah salak.

Proses pembuatan pupuk cair secara alami dapat memerlukan waktu yang cukup lama yakni enam bulan

hinggaisetahun (tergantunggibahan yangdigunakan) sampai mendapatkan pupuk organik cair yang siap dimanfaatkan. Saatini sudah banyak dikembangkanproduk produk bioaktivator atauagenidecomposer untuk mempercepat proses dekomposisi, penguraian materi organik, dan dapat menghasilkan kualitas produk akhir (Sundari et. al, 2012). Dalam produk bioaktifator ada terdapat beberapa spesies mikroorganisme pengurai materi organik yang telah dikemas, diisolasi dan dioptimasi dalam berbagai bentuk seperti Effective Microorganism (EM4).



Gambar 4.4. Bioaktivator EM4

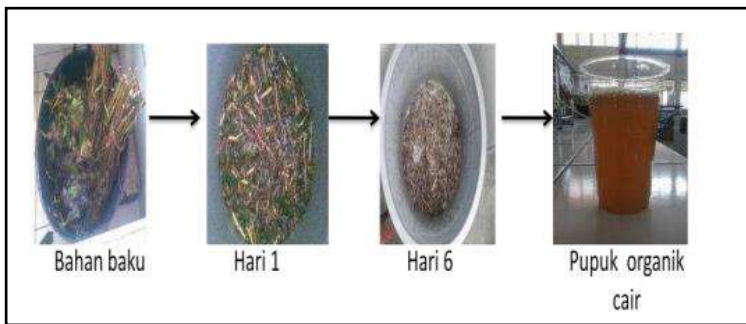
(Sumber : <https://sumberplastik.co.id/pupuk-obat-cair-em4-untuk-tanaman-1l/>)

Dalam penerapannya penambahan bioaktivator dalam proses pembuatanpupukicair diharapkan dapat mempercepat proses penguraian dan pembentukanipupukicair dalam waktu yang singkat yakni 2-3 minggu atau paling lama 1-1,5 bulan. Prinsipipembuatan pupukiorganik adalah menurunkan rasio C/Nibahaniorganik sehingga sama dengan rasio C/N tanah (< 20), Umumnya bahan organik yang segar memiliki rasio C/N tinggi, sepeti jerami padi mempunyai rasio C/N 50-70. Dengan demikian

semakin tinggi rasio C/N bahan organik yang digunakan dalam proses pembuatan pupuk maka semakin lama proses penurunan rasio C/N.

Proses pembuatan pupuk organik cair dengan unsur nitrogen. Bahan yang digunakan berupa sampah organik hijauan (tanaman bandotan) 1 kg, daun salam 1 kg, gula merah $\frac{1}{4}$ kg, air sisa cucian beras 10 liter, decomposer (EM 4) 1 tutup botol. Alat yang digunakan pisau dan ember (Suhastyo, 2019). Adapun langkah pembuatannya :

1. Sampah organik dicacah lalu dimasukkan ke dalam ember komposter.
2. Tambahkan air cucian beras dan gula merah yang sudah diencerkan serta tambahkan cairan larutan EM4 kedalam media komposter.
3. Setelah itu ember komposter ditutup rapat dan disimpan ditempat yang teduh dan biarkan sampai 2 minggu.
4. Selanjutnya dibuka dan dicek aromanya, apabila berubah seperti tape maka pupuk organik cair sudah siap disaring digunakan.



Gambar 4.5. Proses Pembuatan Organik Cair
(Sumber : Sundari et al, 2012)

Pupuk cair yang berkualitas baik memiliki ciri fisik diantaranya berwarna kuning kecokelat dan berbau menyerupai tape. Pemanfaatan dosis tertentu akan lebih berorientasi pada perbaikan sifat fisik dan kimia tanah serta menyediakan unsur hara.

DAFTAR PUSTAKA

- Dachlan, M.A., Badron Z., anna K.P., 2012. Inokulasi *Azotobacter* sp dan kompos limbah pertanian terhadap pertumbuhan dan produksi padi sawah. *J. Agrivigor* 11 (2): 117-128. Januari-April 2012; ISSN 1412-2286.
- FAO, 2007. Water, Mineral and Protein Content and Productivity of Aquatic Plant. <https://www.fao.org/3/X6862E/X6862E04.htm>. Diakses 28 Februari 2024.
- Hadisuwito, S. 2012. *Membuat pupuk organik cair*. AgroMedia.
- Kasmawan, I. A., Sutapa, G. N., & Yuliara, I. M. (2018). Pembuatan pupuk organik cair menggunakan teknologi komposting sederhana. *Buletin Udayana Mengabdi*, 17(2), 67-72.
- Hartatik, W., & Widowati, L. R. (2006). Pupuk kandang. *Pupuk organik dan pupuk hayati*, 59-82.
- Nurhayati, D.R. 2021. *Peran Pupuk Kandang Terhadap Tanaman Kacang Hijau (Vigna Radiata L.)*. Cetakan Pertama. ISBN : 978 623 365 100 5. Scopindo Media Pustaka.
- Rasyid, B., 2012. Aplikasi kompos kombinasi zeolite dan fosfat alam untuk peningkatan kualitas tanah ultisol dan produktivitas tanaman jagung. *Jurnal Agrisistem*, Juni 2012, Vol.8 no.1 ISSN 1858-4330.
- Setiawan, B.S. 2010. *Membuat pupuk kandang secara cepat*. N.p., PT Niaga Swadaya : Bogor.
- Siahaan, A.S.A., dkk. 2023. *Teknologi Budidaya Tanaman Hortikultura*. Cetakan 1. xiv; 140 hlm. ISBN: 978-623-342-763-0. Yayasan Kita Menulis.
- Simamora , Hadisuwito, 2005, Perbedaan pupuk organik dan an organik.pdf.
- Sundari, E., Sari, E., & Rinaldo, R. 2012. Pembuatan pupuk organik cair menggunakan bioaktivator biosca dan EM4. *Kalium*, 2(1), 0-2.
- Suhastyo, A.A. 2019. *Pemberdayaan Kelompok Wanita Tani Melalui Pelatihan Pembuatan Pupuk Organik Cair*. *Jurnal PPKM*, Vol. 6, No. 2, 60 – 64.

- Tan, K.H. 1993. Environmental Soil Science. Marcel Dekker. Inc. New York.
- Widowati, L.R., Sri Widati, U. Jaenudin, dan W. Hartatik. 2005. Pengaruh Kompos Pupuk Organik yang Diperkaya dengan Bahan Mineral dan Pupuk Hayati terhadap Sifat-sifat Tanah, Serapan Hara dan Produksi Sayuran Organik. Laporan Proyek Penelitian Program Pengembangan Agribisnis, Balai Penelitian Tanah, TA 2005 (Tidak dipublikasikan).
- Widowati, L.R., dkk. 2022. *Pupuk Organik : Dibuatnya Mudah, Hasil Tanam Melimpah*. Cetakan 1. Iv;64 hlm. ISBN : 978 979 582 203 5. Pusat Perpustakaan dan Penyebaran Teknologi Pertanian. Kementerian Pertanian Republik Indonesia : Bogor.

BAB 5

PENGEMBANGAN PUPUK HAYATI

Oleh Eliyani

5.1 Pendahuluan

Pupuk hayati adalah pupuk yang berasal dari bahan-bahan organik alami, seperti kompos, pupuk kandang, limbah pertanian dan bahan organik lainnya. Pupuk hayati mengandung mikroorganisme yang bermanfaat bagi tanaman, seperti bakteri, jamur, dan organisme mikroskopis lainnya, yang membantu meningkatkan kesuburan tanah, meningkatkan serapan nutrisi oleh tanaman, dan meningkatkan produktivitas pertanian secara keseluruhan. Keunggulan pupuk hayati adalah ramah lingkungan karena berasal dari bahan-bahan alami yang dapat terurai dengan mudah dalam tanah, sehingga tidak meninggalkan residu kimia yang berbahaya. Selain itu, penggunaan pupuk hayati juga membantu dalam menjaga keseimbangan ekosistem tanah dan meminimalkan dampak negatif terhadap lingkungan.

Pupuk hayati menjadi penting dalam pertanian masa kini karena dapat meningkatkan kesuburan tanah. Mikroorganisme dalam pupuk hayati membantu dalam proses dekomposisi bahan organik, memperbaiki struktur tanah, dan meningkatkan retensi air dan nutrisi dalam tanah sehingga tanah menjadi lebih subur dan produktif. Meminimalkan dampak negatif dan mengurangi ketergantungan petani pada pupuk kimia yang dapat meningkatkan risiko pencemaran tanah, air, dan udara sehingga membantu menjaga keberlanjutan lingkungan dan kesehatan manusia. Meningkatkan ketahanan tanaman untuk mengatasi stres lingkungan, seperti kekeringan, serangan hama, dan penyakit. Memperbaiki kualitas hasil pertanian, baik dari segi rasa, tekstur, maupun kandungan nutrisinya sehingga dapat meningkatkan daya saing produk pertanian di pasar. Pupuk hayati juga mendukung praktik pertanian organik yang semakin menjadi pilihan bagi banyak petani dan konsumen yang peduli akan lingkungan dan

kesehatan karena tidak mengandung bahan kimia sintetis yang tidak diizinkan dalam pertanian organik.

Pupuk hayati menjadi penting dalam pertanian masa kini karena tidak hanya memberikan manfaat agronomis bagi tanaman, tetapi juga mendukung keberlanjutan lingkungan dan kesejahteraan manusia secara keseluruhan.

Beberapa faktor yang mendorong pertumbuhan dan pengembangan pupuk hayati adalah :

1. Keseimbangan Lingkungan. Pupuk hayati dianggap lebih ramah lingkungan karena berasal dari bahan organik alami yang dapat terurai dengan mudah dalam tanah. Ini mengurangi kemungkinan pencemaran dari tanah, air, dan udara.
2. Peningkatan Kesehatan Tanaman dan Tanah. Dengan meningkatkan kesuburan tanah, aktivitas mikroorganisme tanah, dan serapan nutrisi tanaman, pupuk hayati meningkatkan kesehatan tanaman dan tanah secara keseluruhan. Penggunaan pupuk kimia yang berlebihan juga dapat meningkatkan kesehatan tanah tetapi meningkatkan risiko degradasi tanah.
3. Tuntutan Konsumen akan Produk Organik. Permintaan akan produk pertanian organik semakin meningkat seiring dengan kesadaran konsumen akan pentingnya makanan yang sehat dan bebas dari residu pestisida dan bahan kimia sintetis. Pengembangan pupuk hayati mendukung pertanian organik dengan menyediakan alternatif pupuk yang sesuai dengan prinsip-prinsip pertanian organik.
4. Peningkatan Produktivitas Pertanian. Pupuk hayati membantu meningkatkan produktivitas pertanian dengan cara meningkatkan serapan nutrisi oleh tanaman, meningkatkan ketahanan tanaman terhadap stres lingkungan, dan meningkatkan kualitas hasil pertanian.
5. Inovasi Teknologi dan Riset Ilmiah. Kemajuan dalam bidang teknologi dan penelitian ilmiah telah mendukung pengembangan pupuk hayati dengan mengidentifikasi mikroorganisme yang bermanfaat bagi tanaman,

meningkatkan proses fermentasi dan produksi, serta memperbaiki formulasi produk.

5.2 Bahan Baku Dan Proses Pembuatan Pupuk Hayati

5.2.1 Kompos

Proses pembuatan kompos melibatkan penguraian bahan organik menjadi materi yang lebih sederhana dan stabil secara biologis oleh mikroorganisme. Berikut adalah langkah-langkah umum dalam pembuatan kompos dan manfaatnya sebagai bahan baku pupuk hayati.

1. **Pemilihan Bahan Baku:** Pilih bahan organik yang cocok untuk pembuatan kompos, seperti sisa pertanian, sisa makanan, daun kering, atau jerami. Hindari bahan-bahan yang mengandung bahan berbahaya atau dapat menghambat proses dekomposisi.
2. **Pemotongan atau Penghancuran:** Potong atau hancurkan bahan baku menjadi potongan kecil untuk mempercepat proses dekomposisi. Potongan-potongan yang lebih kecil memberikan permukaan yang lebih besar untuk aksi mikroorganisme.
3. **Pencampuran Bahan:** Campurkan bahan baku dengan proporsi yang tepat, termasuk bahan dengan kandungan karbon dan nitrogen yang seimbang. Kompos yang baik memiliki rasio karbon-nitrogen (C/N) sekitar 25:1 hingga 30:1.
4. **Kelembaban:** Pastikan kelembaban kompos tetap optimal, sekitar 50-60%. Tambahkan air jika kompos terlalu kering atau bahan baku yang mengandung banyak air jika terlalu kering.
5. **Pemberian Udara:** Aerasi adalah kunci untuk mengoptimalkan proses dekomposisi. Gunakan tongkat atau alat lain untuk mengaduk kompos secara teratur agar udara dapat mencapai semua bagian.
6. **Pemantauan Suhu:** Suhu dalam tumpukan kompos harus dipantau secara teratur. Suhu yang optimal untuk

dekomposisi adalah antara 50°C hingga 70°C. Suhu yang lebih tinggi dapat membunuh patogen dan gulma biji.

7. Pematangan: Setelah sekitar 2 hingga 6 bulan (tergantung pada kondisi dan jenis bahan baku), kompos akan matang dan siap digunakan sebagai pupuk hayati.

Manfaat Kompos sebagai Bahan Baku Pupuk Hayati:

1. Kandungan Nutrisi: Kompos mengandung berbagai macam nutrisi penting bagi tanaman, seperti nitrogen, fosfor, kalium, dan unsur mikro.
2. Mikroorganisme yang Bermanfaat: Proses pembuatan kompos melibatkan aksi berbagai mikroorganisme dekomposer seperti bakteri dan jamur. Mikroorganisme ini akan tetap hidup dalam kompos matang dan memberikan manfaat bagi tanah dan tanaman ketika digunakan sebagai pupuk hayati.
3. Perbaikan Struktur Tanah: Kompos membantu memperbaiki struktur tanah dengan meningkatkan kandungan bahan organik dan ketersediaan air serta udara dalam tanah.
4. Penyediaan Karbon: Kompos memberikan sumber karbon organik yang stabil dalam tanah, yang membantu dalam meningkatkan aktivitas mikroorganisme tanah dan meningkatkan kesuburan tanah dalam jangka panjang.

5.2.2 Pupuk Kandang

Proses pembuatan pupuk hayati dari pupuk kandang melibatkan fermentasi atau penguraian bahan organik dalam pupuk kandang oleh mikroorganisme yang ada secara alami atau ditambahkan. Berikut adalah langkah-langkah umum dalam proses pembuatan pupuk hayati dari pupuk kandang:

1. Persiapan Bahan Baku: Pupuk kandang yang digunakan sebagai bahan baku harus dipersiapkan terlebih dahulu. Ini mungkin melibatkan pemisahan bahan organik dari material lain seperti pasir atau tanah dan pemecahan gumpalan agar bahan baku menjadi lebih homogen.

2. Penambahan Bahan Tambahan (Opsional): Bahan tambahan seperti jerami, serbuk gergaji, atau bahan organik lainnya dapat ditambahkan untuk meningkatkan komposisi dan kualitas pupuk hayati yang dihasilkan. Ini dapat membantu dalam meningkatkan kandungan nutrisi dan sifat fisik pupuk.
3. Fermentasi atau Pengomposan: Pupuk kandang yang dipersiapkan kemudian ditempatkan dalam tumpukan atau wadah tertutup untuk proses fermentasi atau pengomposan. Mikroorganisme yang ada secara alami atau ditambahkan, seperti bakteri, fungi, dan aktinomiset, akan memulai proses dekomposisi bahan organik dalam pupuk kandang.
4. Pemantauan dan Pengendalian Proses: Selama proses fermentasi atau pengomposan, kondisi seperti suhu, kelembaban, dan ventilasi harus dipantau dan dikendalikan secara teratur. Ini penting untuk memastikan bahwa kondisi lingkungan mendukung pertumbuhan mikroorganisme yang menguntungkan dan menghambat pertumbuhan mikroorganisme yang merugikan.
5. Pematangan: Proses fermentasi atau pengomposan berlangsung selama beberapa minggu hingga beberapa bulan tergantung pada kondisi dan jenis bahan baku. Selama periode ini, bahan organik akan mengalami dekomposisi menjadi senyawa yang lebih sederhana dan stabil yang lebih mudah diserap oleh tanaman.
6. Pengujian dan Penilaian Kualitas: Setelah proses fermentasi atau pengomposan selesai, pupuk hayati yang dihasilkan harus diuji untuk menilai kualitasnya. Ini mungkin melibatkan pengukuran kandungan nutrisi, pH, dan konsistensi fisik, serta deteksi kontaminan yang tidak diinginkan.
7. Pengemasan dan Penyimpanan: Pupuk hayati yang telah diuji dan disetujui kemudian dikemas dalam kemasan yang sesuai dan disimpan di tempat yang sesuai. Penyimpanan yang baik diperlukan untuk menjaga kualitas produk dan mencegah kontaminasi atau kerusakan.

8. Distribusi dan Penggunaan: Pupuk hayati yang telah diproduksi dan dikemas kemudian didistribusikan kepada petani untuk digunakan dalam pertanian. Instruksi penggunaan yang jelas dan informasi tentang manfaat produk harus disertakan dengan pupuk hayati untuk memastikan penggunaan yang tepat.

Berikut adalah beberapa sifat dan keunggulan pupuk kandang sebagai bahan baku pupuk hayati:

1. Kandungan Nutrisi: Pupuk kandang mengandung nutrisi penting bagi tanaman, seperti nitrogen (N), fosfor (P), kalium (K), dan unsur hara lainnya. Kandungan nutrisi ini dapat memberikan nutrisi yang seimbang bagi tanaman dan membantu dalam meningkatkan pertumbuhan dan produksi.
2. Mikroorganisme Menguntungkan: Pupuk kandang mengandung berbagai mikroorganisme yang bermanfaat bagi tanaman dan tanah. Bakteri, jamur, dan organisme lain dalam pupuk kandang membantu dalam proses dekomposisi bahan organik, meningkatkan aktivitas mikroba tanah, dan meningkatkan ketersediaan nutrisi bagi tanaman.
3. Penyediaan Bahan Organik: Pupuk kandang adalah sumber bahan organik alami yang baik untuk tanah. Bahan organik ini membantu meningkatkan struktur tanah, meningkatkan retensi air dan udara dalam tanah, serta menyediakan sumber karbon yang penting bagi mikroorganisme tanah.
4. Meningkatkan Kesuburan Tanah: Penggunaan pupuk kandang secara teratur dapat membantu meningkatkan kesuburan tanah dalam jangka panjang. Pupuk kandang meningkatkan kandungan bahan organik dalam tanah, meningkatkan aktivitas mikroorganisme tanah, dan meningkatkan ketersediaan nutrisi bagi tanaman.
5. Daur Ulang Limbah: Pupuk kandang merupakan salah satu bentuk daur ulang limbah pertanian dan peternakan. Dengan menggunakan pupuk kandang, limbah organik dapat diubah menjadi sumber nutrisi yang berharga bagi

- tanaman, mengurangi jumlah limbah yang dibuang dan membantu dalam menjaga lingkungan.
6. Ramah Lingkungan: Penggunaan pupuk kandang sebagai bahan baku pupuk hayati lebih ramah lingkungan dibandingkan dengan pupuk kimia. Pupuk kandang tidak mengandung bahan kimia sintetis yang berpotensi merusak lingkungan dan tidak meninggalkan residu yang berbahaya dalam tanah dan air.

5.2.3 Limbah Pertanian

Limbah pertanian memiliki potensi yang besar dalam pembuatan pupuk hayati karena kandungan nutrisi yang terkandung di dalamnya serta kemampuannya untuk diolah menjadi bahan organik yang berguna bagi tanaman. Potensi dan pemanfaatan limbah pertanian dalam pembuatan pupuk hayati adalah sebagai:

1. Sumber nutrisi : Limbah pertanian, seperti jerami, sekam, serbuk gergaji, atau sisa panen, mengandung nutrisi penting bagi tanaman seperti nitrogen, fosfor, kalium, serta unsur hara mikro lainnya. Nutrisi ini dapat diubah menjadi pupuk organik yang kaya nutrisi untuk meningkatkan kesuburan tanah dan kesehatan tanaman.
2. Penyediaan Bahan Organik: Limbah pertanian merupakan sumber bahan organik alami yang berharga untuk tanah. Bahan organik ini membantu meningkatkan struktur tanah, meningkatkan retensi air dan udara dalam tanah, serta menyediakan sumber karbon yang penting bagi mikroorganisme tanah.
3. Meningkatkan Kesuburan Tanah: Penggunaan limbah pertanian sebagai bahan baku pupuk hayati dapat membantu meningkatkan kesuburan tanah dalam jangka panjang. Limbah pertanian meningkatkan kandungan bahan organik dalam tanah, meningkatkan aktivitas mikroorganisme tanah, dan meningkatkan ketersediaan nutrisi bagi tanaman.
4. Daur Ulang Limbah: Pemanfaatan limbah pertanian dalam pembuatan pupuk hayati merupakan salah satu bentuk daur

ulang limbah pertanian. Dengan menggunakan limbah pertanian sebagai bahan baku, limbah organik dapat diubah menjadi sumber nutrisi yang berharga bagi tanaman, mengurangi jumlah limbah yang dibuang dan membantu dalam menjaga lingkungan.

5. Peningkatan Produktivitas Pertanian: Pupuk hayati yang terbuat dari limbah pertanian dapat meningkatkan produktivitas pertanian dengan cara meningkatkan serapan nutrisi oleh tanaman, meningkatkan kesehatan tanaman, dan meningkatkan kualitas hasil panen.
6. Ketahanan Lingkungan: Penggunaan limbah pertanian dalam pembuatan pupuk hayati mendukung praktik pertanian yang berkelanjutan dan ramah lingkungan. Limbah pertanian yang diolah menjadi pupuk hayati merupakan alternatif yang lebih ramah lingkungan daripada pupuk kimia karena tidak mengandung bahan kimia sintetis dan membantu dalam menjaga keseimbangan ekosistem pertanian.

Proses pembuatan pupuk hayati dari limbah pertanian dapat sedikit bervariasi tergantung pada jenis limbah pertanian yang digunakan dan metode produksi yang digunakan oleh produsen.

Proses pembuatan pupuk hayati dari limbah pertanian melibatkan beberapa langkah utama yang mengubah limbah pertanian menjadi pupuk organik yang berguna bagi tanaman. Berikut adalah langkah-langkah umum dalam proses tersebut:

1. Pemilihan Limbah Pertanian: Langkah awal dalam pembuatan pupuk hayati adalah pemilihan limbah pertanian yang akan digunakan sebagai bahan baku. Limbah pertanian yang umumnya digunakan termasuk jerami, sekam, serbuk gergaji, atau sisa panen lainnya.
2. Pemotongan atau Penghancuran: Limbah pertanian yang dipilih kemudian dipotong atau dihancurkan menjadi potongan kecil untuk mempercepat proses dekomposisi dan meningkatkan luas permukaan yang terpapar oleh mikroorganisme.

3. Pencampuran Bahan: Potongan-potongan limbah pertanian dicampur dengan bahan lain yang dapat meningkatkan kualitas pupuk, seperti kompos, pupuk kandang, atau bahan organik lainnya. Campuran ini bertujuan untuk menciptakan formulasi pupuk hayati yang optimal.
4. Fermentasi atau Penguraian: Campuran limbah pertanian kemudian dibiarkan untuk mengalami proses fermentasi atau dekomposisi oleh mikroorganisme alami yang ada dalam limbah tersebut. Proses ini memecah bahan organik kompleks menjadi bentuk yang lebih sederhana dan mudah diserap oleh tanaman.
5. Pemanasan dan Pematangan: Setelah proses fermentasi, pupuk hayati yang dihasilkan dapat dipanaskan untuk membunuh patogen dan biji gulma yang ada. Selanjutnya, pupuk hayati tersebut dibiarkan untuk matang selama beberapa waktu agar nutrisi lebih stabil dan mudah diserap oleh tanaman.
6. Uji Kualitas: Sebelum dipasarkan, pupuk hayati yang telah matang biasanya diuji kualitasnya untuk memastikan bahwa kandungan nutrisi dan mikroorganisme dalam pupuk berada dalam tingkat yang optimal.
7. Pengemasan: Pupuk hayati yang telah lolos uji kualitas kemudian dikemas dalam kemasan yang sesuai, seperti kantong atau kemasan botol, untuk kemudian didistribusikan kepada konsumen. Namun, langkah-langkah di atas memberikan gambaran umum tentang bagaimana limbah pertanian dapat diolah menjadi pupuk hayati yang berguna bagi tanaman.

Beberapa faktor yang mempengaruhi kemampuan limbah pertanian untuk diolah menjadi pupuk hayati antara lain:

1. Kandungan Nutrisi: Limbah pertanian yang mengandung nutrisi penting bagi tanaman, seperti nitrogen, fosfor, kalium, dan unsur mikro lainnya, lebih cocok sebagai bahan baku untuk pupuk hayati. Limbah yang mengandung sedikit nutrisi atau nutrisi yang tidak mudah diurai mungkin tidak efektif sebagai bahan baku.

2. **Komposisi Bahan Organik:** Limbah pertanian yang mengandung bahan organik alami yang mudah terurai lebih cocok untuk dijadikan bahan baku pupuk hayati. Bahan organik yang mudah diuraikan oleh mikroorganisme akan mempercepat proses dekomposisi dan menghasilkan pupuk yang lebih berkualitas.
3. **Potensi Kontaminasi:** Limbah pertanian yang mengandung pestisida, herbisida, atau bahan kimia lainnya mungkin tidak cocok sebagai bahan baku untuk pupuk hayati karena potensi kontaminasi yang dapat merusak kesehatan tanaman dan tanah.
4. **Proses Pengolahan:** Beberapa limbah pertanian memerlukan proses pengolahan lebih lanjut sebelum dapat dijadikan bahan baku untuk pupuk hayati. Proses ini mungkin termasuk pemotongan, penghancuran, atau fermentasi untuk memecah bahan organik kompleks menjadi bentuk yang lebih sederhana.
5. **Ketersediaan:** Ketersediaan limbah pertanian dalam jumlah yang cukup juga menjadi pertimbangan penting dalam pemilihan bahan baku untuk pupuk hayati. Limbah pertanian yang tersedia dalam jumlah besar dan mudah diakses akan lebih layak untuk dijadikan bahan baku.

Beberapa standar yang dapat dijadikan acuan untuk menilai kualitas pupuk hayati:

1. **Kandungan Nutrisi:** Pupuk hayati yang berkualitas harus memiliki kandungan nutrisi yang seimbang dan mencukupi bagi tanaman. Hal ini mencakup kandungan nitrogen (N), fosfor (P), kalium (K), serta unsur hara mikro lainnya seperti kalsium, magnesium, dan sulfur.
2. **Kandungan Bahan Organik:** Pupuk hayati yang baik seharusnya mengandung bahan organik dalam jumlah yang cukup. Bahan organik membantu meningkatkan kesuburan tanah, meningkatkan aktivitas mikroorganisme tanah, serta meningkatkan ketersediaan nutrisi bagi tanaman.
3. **Keberadaan Mikroorganisme Menguntungkan:** Pupuk hayati yang berkualitas harus mengandung mikroorganisme yang

bermanfaat bagi tanaman dan tanah, seperti bakteri pemacu pertumbuhan (PGPR), mikoriza, dan mikroorganisme pelarut fosfat (PSB). Keberadaan mikroorganisme ini membantu meningkatkan kesehatan tanaman dan kualitas tanah.

4. Tidak Mengandung Bahan Berbahaya: Pupuk hayati sebaiknya tidak mengandung bahan kimia sintetis yang berpotensi merusak lingkungan atau kesehatan tanaman. Pastikan pupuk hayati tidak mengandung residu pestisida atau logam berat dalam jumlah yang berbahaya.
5. Stabilitas: Pupuk hayati yang berkualitas seharusnya stabil secara biologis dan fisik. Hal ini berarti nutrisi dalam pupuk tidak mudah terurai atau menguap, dan mikroorganisme dalam pupuk tetap aktif dan efektif selama masa simpan.
6. Uji Kualitas: Pupuk hayati sebaiknya telah melalui uji kualitas yang ketat oleh otoritas terkait atau lembaga sertifikasi independen. Uji kualitas meliputi analisis kandungan nutrisi, keberadaan mikroorganisme menguntungkan, dan deteksi bahan berbahaya.
7. Label dan Informasi Produk: Pupuk hayati yang berkualitas harus disertai dengan label yang jelas dan informatif, termasuk kandungan nutrisi, petunjuk penggunaan, dan informasi produsen atau distributor.

Pupuk hayati dapat stabil secara biologis dan fisik jika diproses dan disimpan dengan baik.

1. Stabilitas Biologis: Stabilitas biologis mengacu pada kemampuan pupuk hayati untuk mempertahankan aktivitas mikroorganisme yang bermanfaat bagi tanaman. Mikroorganisme dalam pupuk hayati, seperti bakteri pemacu pertumbuhan (PGPR) dan mikoriza, memiliki peran penting dalam meningkatkan kesehatan tanaman dan kesuburan tanah. Pada kondisi penyimpanan yang tepat, mikroorganisme ini dapat tetap aktif dan efektif dalam jangka waktu yang cukup lama.
2. Stabilitas Fisik: Stabilitas fisik mengacu pada kemampuan pupuk hayati untuk mempertahankan bentuk, tekstur, dan

sifat fisiknya selama masa simpan. Hal ini mencakup kemampuan pupuk hayati untuk tidak mengalami degradasi atau perubahan fisik yang signifikan, seperti penggumpalan atau penguraian, yang dapat mengurangi kualitas dan ketersediaannya bagi tanaman.

Untuk memastikan stabilitas biologis dan fisik pupuk hayati, beberapa faktor perlu diperhatikan:

1. **Proses Produksi:** Proses produksi pupuk hayati harus dirancang untuk mempertahankan aktivitas mikroorganisme dan integritas fisik bahan. Proses fermentasi atau penguraian limbah pertanian harus dikendalikan dengan baik untuk mengoptimalkan kualitas pupuk hayati.
2. **Bahan Baku Berkualitas:** Pupuk hayati yang baik memerlukan bahan baku berkualitas tinggi yang mengandung nutrisi penting dan mikroorganisme yang bermanfaat. Pemilihan bahan baku yang baik akan membantu memastikan kualitas pupuk hayati yang stabil.
3. **Pemrosesan dan Penyimpanan:** Pupuk hayati harus diproses dan disimpan dengan baik untuk menjaga stabilitasnya. Hal ini termasuk penggunaan teknik pengemasan yang sesuai, penanganan yang hati-hati selama transportasi, dan penyimpanan dalam kondisi yang sesuai suhu dan kelembaban.
4. **Uji Kualitas dan Pengujian:** Pupuk hayati sebaiknya menjalani uji kualitas dan pengujian secara teratur untuk memastikan bahwa kandungan nutrisi, keberadaan mikroorganisme, dan sifat fisiknya tetap stabil dan sesuai dengan standar yang ditetapkan.

5.3 Mikroorganisme dalam Pupuk Hayati

Mikroorganisme memainkan peran yang sangat penting dalam meningkatkan kesehatan tanaman dan kesuburan tanah melalui berbagai mekanisme.

Peran utama mikroorganisme dalam meningkatkan kesehatan tanaman dan kesuburan tanah seperti:

1. Fiksasi Nitrogen: Bakteri *Rhizobium* dan *Azotobacter* serta beberapa jenis bakteri bebas-lahan seperti *Azospirillum* mampu mengubah nitrogen gas di udara menjadi senyawa nitrogen yang dapat diserap oleh tanaman. Ini meningkatkan ketersediaan nitrogen bagi tanaman, yang sangat penting untuk pertumbuhan vegetatif dan produksi tanaman.
2. Pencernaan Fosfat: Bakteri dan fungi tanah seperti mikoriza dan bakteri pelarut fosfat mampu meningkatkan ketersediaan fosfat dalam tanah dengan mengubah fosfat organik menjadi bentuk yang dapat diserap oleh tanaman. Fosfat merupakan nutrisi esensial untuk perkembangan akar, pembentukan biji, dan pengaturan metabolisme tanaman.
3. Solubilisasi Mineral: Beberapa mikroorganisme memiliki kemampuan untuk melarutkan mineral tertentu dalam tanah yang kurang larut dalam air, seperti kalium, kalsium, dan magnesium. Proses ini meningkatkan ketersediaan mineral bagi tanaman dan membantu dalam pertumbuhan dan perkembangan tanaman secara keseluruhan.
4. Penghasil Hormon Tumbuhan: Beberapa bakteri tanah seperti *Azospirillum* dan *Pseudomonas* mampu menghasilkan hormon tumbuhan, seperti auksin dan sitokinin, yang merangsang pertumbuhan akar, pembentukan cabang, dan peningkatan toleransi tanaman terhadap stres lingkungan.
5. Pelindung dari Penyakit: Mikroorganisme bermanfaat juga dapat bertindak sebagai agen biokontrol yang melindungi tanaman dari serangan patogen penyakit. Mekanisme ini melibatkan persaingan untuk ruang dan nutrisi, produksi senyawa antimikroba, dan aktivasi respons pertahanan tanaman.
6. Peningkatan Struktur Tanah: Aktivitas mikroba tanah, terutama fungi tanah dan bakteri penyerap karbon, membantu dalam pembentukan agregat tanah dan meningkatkan struktur tanah. Struktur tanah yang baik

memperbaiki drainase, aerasi tanah, dan retensi air, serta memfasilitasi pertumbuhan akar tanaman.

7. **Komposisi Bahan Organik:** Mikroorganisme bertanggung jawab atas dekomposisi bahan organik seperti serasah tanaman dan sisa tanaman, yang menghasilkan humus dan nutrisi yang berguna bagi tanaman. Proses ini memperbaiki kesuburan tanah, meningkatkan retensi air, dan menyediakan nutrisi bagi tanaman.

Beberapa contoh mikroorganisme yang dapat memfiksasi nitrogen di udara adalah sebagai berikut:

1. *Rhizobium spp.*: *Rhizobium* adalah genus bakteri yang dapat membentuk simbiosis dengan akar tanaman tertentu, terutama tanaman legum (kacang-kacangan). Bakteri *Rhizobium* hidup di dalam akar tanaman dalam bentuk bakteroid dan membentuk nodul akar, di mana mereka dapat memfiksasi nitrogen atmosfer menjadi senyawa nitrogen yang dapat diserap oleh tanaman.
2. *Azotobacter spp.*: *Azotobacter* adalah genus bakteri yang bebas-lahan dan dapat ditemukan di tanah tanpa bergantung pada akar tanaman tertentu. Bakteri ini memiliki kemampuan untuk memfiksasi nitrogen di udara ke dalam bentuk yang dapat dimanfaatkan oleh tanaman.
3. *Clostridium spp.*: Beberapa spesies bakteri dari genus *Clostridium*, seperti *Clostridium pasteurianum*, juga memiliki kemampuan untuk memfiksasi nitrogen atmosfer.
4. *Cyanobacteria* (Bakteri Biru-Hijau): *Cyanobacteria* adalah kelompok bakteri fotosintetik yang dapat ditemukan di berbagai habitat air dan tanah. Beberapa spesies *cyanobacteria* memiliki kemampuan untuk memfiksasi nitrogen atmosfer melalui proses fotosintesis.
5. *Anabaena spp.*: *Anabaena* adalah genus *cyanobacteria* yang umumnya ditemukan dalam koloni berbentuk benang atau filamen. Beberapa spesies *Anabaena* memiliki kemampuan untuk memfiksasi nitrogen atmosfer dan membentuk hubungan simbiosis dengan beberapa tanaman air.

Contoh bakteri dan fungi yang dapat melarutkan fosfat:

1. Bakteri:

- a. *Pseudomonas sp.*: Beberapa spesies bakteri dari genus *Pseudomonas*, seperti *Pseudomonas fluorescens* dan *Pseudomonas putida*, telah dikenal memiliki kemampuan untuk melarutkan fosfat dalam tanah. Mereka menghasilkan asam organik seperti asam sitrat dan asam oksalat yang membantu dalam pelarutan fosfat.
- b. *Bacillus sp.*: Beberapa spesies bakteri dari genus *Bacillus*, seperti *Bacillus megaterium* dan *Bacillus subtilis*, juga memiliki kemampuan untuk melarutkan fosfat dalam tanah. Mereka menghasilkan asam organik dan enzim fosfatase yang merusak ikatan fosfat dengan partikel tanah.
- c. *Rhizobium sp.*: Bakteri *Rhizobium* yang bersimbiosis dengan leguminosa juga dapat melarutkan fosfat dalam tanah. Selain membantu dalam fiksasi nitrogen, bakteri *Rhizobium* juga menghasilkan asam organik yang meningkatkan ketersediaan fosfat bagi tanaman.

2. Fungi:

- a. Mikoriza Arbuskular (AMF): Fungi mikoriza arbuskular adalah jenis fungi tanah yang membentuk hubungan mutualisme dengan akar tanaman. Mereka menghasilkan asam organik dan enzim fosfatase ekstraseluler yang membantu dalam pelarutan fosfat di sekitar akar tanaman.
- b. *Aspergillus sp.*: Beberapa spesies fungi dari genus *Aspergillus*, seperti *Aspergillus niger*, memiliki kemampuan untuk melarutkan fosfat dalam tanah. Mereka menghasilkan asam organik dan enzim fosfatase yang memfasilitasi pelarutan fosfat di dalam tanah.
- c. *Penicillium sp.*: Beberapa spesies fungi dari genus *Penicillium* juga telah dikenal memiliki kemampuan untuk melarutkan fosfat dalam tanah dan menghasilkan

asam organik dan enzim fosfatase yang membantu meningkatkan ketersediaan fosfat bagi tanaman.

Contoh mikroorganisme yang menghasilkan hormon tumbuhan yang dapat merangsang pertumbuhan dan perkembangan tanaman seperti :

1. *Rhizobium spp.*: Bakteri *Rhizobium* yang hidup dalam hubungan simbiosis dengan akar tanaman leguminosa, seperti kacang-kacangan, dapat menghasilkan hormon tumbuhan auksin. Hormon auksin ini membantu dalam pertumbuhan akar dan pembentukan nodul akar yang penting untuk fiksasi nitrogen.
2. *Azospirillum spp.*: Bakteri ini adalah bakteri bebas-lahan yang hidup di rizosfer tanaman tanpa membentuk hubungan simbiosis yang khusus. *Azospirillum spp.* menghasilkan hormon tumbuhan auksin yang merangsang pertumbuhan akar, meningkatkan toleransi tanaman terhadap stres lingkungan, dan meningkatkan penyerapan unsur hara.
3. *Pseudomonas spp.*: Beberapa spesies bakteri dari genus *Pseudomonas*, seperti *Pseudomonas fluorescens*, dapat menghasilkan hormon tumbuhan auksin dan sitokinin. Hormon-hormon ini membantu dalam mempromosikan pertumbuhan vegetatif dan pembentukan cabang pada tanaman.
4. *Bacillus spp.*: Beberapa spesies bakteri dari genus *Bacillus*, seperti *Bacillus subtilis* dapat menghasilkan hormon tumbuhan auksin dan dapat digunakan sebagai agen biofertilizer untuk merangsang pertumbuhan tanaman dan meningkatkan produktivitas tanaman.
5. *Trichoderma spp.*: Beberapa spesies fungi dari genus *Trichoderma* dapat menghasilkan hormon tumbuhan auksin. *Trichoderma spp.* sering digunakan sebagai agen biokontrol dan agen biofertilizer untuk merangsang pertumbuhan tanaman dan meningkatkan ketahanan tanaman terhadap penyakit.

6. Mikroorganisme juga dapat berfungsi sebagai agen biokontrol terhadap serangan patogen pada tanaman dan menghambat pertumbuhan atau aktivitas patogen, menghasilkan senyawa antimikroba, atau merangsang sistem pertahanan tanaman. Berikut adalah beberapa contoh mikroorganisme yang berfungsi sebagai agen biokontrol:
7. *Trichoderma spp.*: *Trichoderma* adalah genus fungi yang memiliki kemampuan untuk menghambat pertumbuhan patogen tanaman seperti jamur penyakit tanaman dan nematoda dengan menghasilkan enzim yang dapat menghancurkan dinding sel patogen, serta mengeluarkan senyawa antimikroba yang dapat menghambat pertumbuhan patogen.
8. *Pseudomonas fluorescens*: Bakteri yang menghasilkan senyawa antimikroba seperti siderofor dan antibiotik yang dapat menghambat pertumbuhan patogen tanaman. Selain itu, beberapa strain *Pseudomonas fluorescens* juga dapat menginduksi resistensi sistemik pada tanaman terhadap serangan patogen.
9. *Bacillus subtilis*: Bakteri yang menghasilkan senyawa antibiotik dan enzim yang dapat menghambat pertumbuhan patogen tanaman. Bakteri ini juga dapat bersaing dengan patogen untuk ruang dan nutrisi di rizosfer tanaman, serta menginduksi sistem pertahanan tanaman.
10. *Beauveria bassiana*: Fungi sebagai agen biokontrol yang efektif terhadap serangga/hama pada tanaman. *Beauveria bassiana* menginfeksi dan membunuh hama dengan cara melepaskan spora yang menembus kulit nya dan tumbuh di dalamnya.
11. *Trichoderma harzianum*: *Trichoderma harzianum* adalah jenis *Trichoderma* yang secara khusus efektif dalam mengendalikan penyakit tanaman yang disebabkan oleh jamur patogen. *Trichoderma* dapat menghambat pertumbuhan jamur penyebab penyakit tanaman dan meningkatkan resistensi tanaman terhadap serangan patogen.

12. *Bacillus thuringiensis*: Bakteri penghasil toksin kristal yang efektif terhadap larva serangga tertentu, sehingga sering digunakan sebagai agen biokontrol hama pada tanaman.
13. *Streptomyces spp.*: Beberapa spesies bakteri dari genus *Streptomyces* menghasilkan senyawa antibiotik yang efektif melawan patogen tanaman, seperti *Streptomyces griseoviridis* dan *Streptomyces lydicus*.

Beberapa mikroorganisme memiliki kemampuan untuk memperbaiki struktur tanah dengan cara meningkatkan agregasi tanah, meningkatkan kandungan bahan organik, dan meningkatkan ketersediaan unsur hara seperti:

1. Mikoriza Arbuskular (AMF) yakni fungi yang memiliki hubungan mutualisme dengan akar tanaman, membantu dalam meningkatkan agregasi tanah dan stabilitas agregat. Meningkatkan kandungan bahan organik dalam tanah dengan meningkatkan produksi akar tanaman.
2. *Pseudomonas* dan *Bacillus spp.*, Proses pelarutan fosfat oleh bakteri ini dapat membantu dalam meningkatkan agregasi tanah.
3. Bakteri penambat nitrogen, seperti *Rhizobium* dan *Azospirillum spp.*, Proses fiksasi nitrogen oleh bakteri ini juga dapat meningkatkan agregasi tanah dan kandungan bahan organik.
4. Beberapa fungi dekomposer, seperti *Trichoderma spp.* dan *Aspergillus spp.*, membantu dalam mendekomposisi bahan organik dalam tanah. Proses dekomposisi ini meningkatkan kandungan bahan organik dan meningkatkan agregasi tanah.
5. Bakteri pengoksidasi besi, seperti *Acidithiobacillus ferrooxidans*, membantu dalam mengoksidasi besi sulfida menjadi besi sulfat. Proses ini dapat meningkatkan agregasi tanah dan stabilitas agregat.
6. Beberapa bakteri, seperti *Mycobacterium spp.*, memiliki kemampuan untuk menyerap karbon organik dalam tanah. Proses penyerapan karbon oleh bakteri ini dapat

meningkatkan kandungan bahan organik dalam tanah dan meningkatkan agregasi.

Fungi mikoriza ektomikoriza membentuk hubungan mutualisme dengan akar tanaman, membantu dalam meningkatkan agregasi tanah dan stabilitas agregat, terutama pada tanaman kayu.

5.4 Tantangan dan Peluang dalam Pengembangan Pupuk Hayati

Meskipun pupuk hayati memiliki banyak manfaat, ada beberapa tantangan yang perlu dihadapi dalam pembuatannya. Beberapa tantangan utama dalam pembuatan pupuk hayati meliputi:

1. **Kontaminasi Mikroba:** Kontaminasi mikroba yang tidak diinginkan bisa terjadi selama proses produksi pupuk hayati. Kontaminasi dapat mengurangi efektivitas produk dan bahkan menyebabkan risiko kesehatan jika mikroba patogen atau patogen yang terkandung dalam produk.
2. **Stabilitas Produk:** Stabilitas produk menjadi tantangan karena mikroorganisme dalam pupuk hayati cenderung hidup dan bereproduksi dalam lingkungan yang sesuai. Oleh karena itu, penting untuk mempertahankan kestabilan produk dalam penyimpanan dan penggunaan, serta memastikan bahwa jumlah dan jenis mikroba yang diinginkan tetap ada dalam produk.
3. **Efektivitas Produk:** Efektivitas pupuk hayati sering kali bergantung pada keberadaan dan aktivitas mikroorganisme tertentu. Memastikan bahwa produk memiliki konsentrasi mikroba yang cukup dan berkualitas tinggi, serta kemampuan untuk bertahan hidup dan berfungsi dengan baik di lingkungan tanah, merupakan tantangan yang perlu diatasi.
4. **Biaya Produksi:** Produksi pupuk hayati seringkali lebih mahal dibandingkan dengan pupuk kimia karena biaya produksi, formulasi, dan pengemasan yang lebih tinggi. Tantangan ini dapat mempengaruhi daya saing produk dan ketersediaannya di pasaran.

5. **Regulasi dan Sertifikasi:** Pupuk hayati harus memenuhi regulasi dan standar kualitas yang ketat sebelum dapat dipasarkan. Proses sertifikasi produk ini dapat memakan waktu dan biaya tambahan bagi produsen.
6. **Penelitian dan Inovasi:** Perkembangan teknologi baru dan penelitian terus-menerus diperlukan untuk meningkatkan efektivitas, keamanan, dan keberlanjutan pupuk hayati. Tantangan ini membutuhkan investasi dalam riset dan pengembangan produk baru serta proses produksi yang lebih efisien.
7. **Penerimaan dan Edukasi:** Edukasi tentang manfaat pupuk hayati dan cara penggunaannya juga merupakan tantangan, terutama di kalangan petani yang mungkin lebih akrab dengan pupuk kimia konvensional. Penerimaan produk dan pendekatan berbasis pengetahuan dan bukti diperlukan untuk mengubah pola pikir dan praktik pertanian yang ada.

Pengembangan pupuk hayati menawarkan berbagai peluang yang menarik untuk meningkatkan keberlanjutan dan efisiensi pertanian. Beberapa peluang dalam pengembangan pupuk hayati meliputi:

1. **Peningkatan Efisiensi Pemupukan:** Pupuk hayati dapat dirancang untuk meningkatkan efisiensi penggunaan nutrisi tanaman dengan mengoptimalkan penyerapan dan penggunaan unsur hara. Pengembangan formulasi yang tepat dapat mengurangi limbah nutrisi dan meminimalkan dampak negatif pada lingkungan.
2. **Inovasi Teknologi Produksi:** Pengembangan teknologi produksi yang inovatif dapat meningkatkan efisiensi produksi pupuk hayati dan menurunkan biaya produksi. Proses produksi yang lebih efisien dan ramah lingkungan dapat membuat produk lebih terjangkau dan berkelanjutan.
3. **Diversifikasi Produk:** Diversifikasi produk pupuk hayati dapat meningkatkan pilihan untuk petani dan memenuhi kebutuhan nutrisi yang beragam dalam budidaya tanaman. Pengembangan produk dengan formulasi yang berbeda-

- beda untuk berbagai tanaman dan kondisi tanah dapat meningkatkan daya saing dan penerimaan produk.
4. **Penggunaan Teknologi Informasi:** Integrasi teknologi informasi dan sensorik dalam pengembangan pupuk hayati dapat meningkatkan pemahaman tentang kebutuhan nutrisi tanaman dan kondisi tanah secara real-time. Ini dapat membantu dalam pengembangan produk yang lebih tepat sasaran dan meningkatkan efisiensi penggunaan pupuk.
 5. **Kemitraan dan Kolaborasi:** Kolaborasi antara sektor publik dan swasta, universitas, dan lembaga riset dapat mempercepat inovasi dan pengembangan pupuk hayati. Kemitraan ini dapat meningkatkan akses terhadap sumber daya dan pengetahuan yang diperlukan untuk pengembangan produk yang lebih baik.
 6. **Peningkatan Penerimaan dan Edukasi:** Pendidikan dan informasi yang lebih baik kepada petani tentang manfaat pupuk hayati dan cara penggunaannya dapat meningkatkan penerimaan dan adopsi produk. Program pelatihan dan demonstrasi lapangan dapat membantu petani memahami cara efektif menggunakan pupuk hayati untuk meningkatkan hasil pertanian.
 7. **Pengembangan Produk Ramah Lingkungan:** Pengembangan produk pupuk hayati yang lebih ramah lingkungan, misalnya menggunakan bahan baku organik lokal atau limbah pertanian, dapat membantu mengurangi jejak lingkungan dari produksi pupuk dan meningkatkan keberlanjutan pertanian.
 8. **Pengembangan Produk Berbasis Mikroba Lokal:** Pengembangan produk pupuk hayati yang menggunakan mikroba lokal atau strain yang sesuai dengan kondisi tanah dan iklim setempat dapat meningkatkan efektivitas produk dan meningkatkan hasil pertanian secara lokal.

DAFTAR PUSTAKA

- Daniel, A. I., Fadaka, A. O., Gokul, A., Bakare, O. O., Aina, O., Fisher, S., Burt, A. F., Mavumengwana, V., Keyster, M., & Klein, A. (2022). Biofertilizer: The Future of Food Security and Food Safety. In *Microorganisms* (Vol. 10, Nomor 6). MDPI. <https://doi.org/10.3390/microorganisms10061220>
- Herdiantoro, D. (2015). Upaya Peningkatan Kualitas Tanah Di Desa Sukamanah Dan Desa Nanggerang Kecamatan Cigalontang Kabupaten Tasikmalaya Jawa Barat Melalui Sosialisasi Pupuk Hayati, Pupuk Organik Dan Olah Tanah Konservasi. *Dharmakarya*, 4(2), 47–53. <https://doi.org/10.24198/dharmakarya.v4i2.10028>
- Jacoby, R., Peukert, M., Succurro, A., Koprivova, A., & Kopriva, S. (2017). The role of soil microorganisms in plant mineral nutrition—current knowledge and future directions. *Frontiers in Plant Science*, 8. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.01617>
- Mansyur, A. R. (2020). Dampak COVID-19 Terhadap Dinamika Pembelajaran Di Indonesia. *Education and Learning Journal*, Vol. 1, No, 113–123.
- Pertanian dan Bisnis Universitas Kristen Satya Wacana Jl, F., Kalay, Am., Hindersah, R., Ngabalin, I. A., & Jamlean, M. (n.d.). Pemanfaatan Pupuk Hayati dan Bahan Organik Terhadap Pertumbuhan dan Hasil Tanaman Jagung Manis (*Zea mays saccharata*). In *Jl Dipatiukur 42 Bandung* (Vol. 45363).
- Simanungkalit, R. D. M. (2006). *Pupuk organik dan pupuk hayati = Organic fertilizer and biofertilizer*. Balai Besar Litbang Sumberdaya Lahan Pertanian, Badan Penelitian dan Pengembangan Pertanian.
- Sriwahyuni, P., & Parmila, P. (2019). Peran Bioteknologi Dalam Pembuatan Pupuk Hayati. In *Agricultural Journal* (Vol. 2, Nomor 1).
- Thrall, P. H., Oakeshott, J. G., Fitt, G., Southerton, S., Burdon, J. J., Sheppard, A., Russell, R. J., Zalucki, M., Heino, M., & Ford Denison, R. (2011). Evolution in agriculture: The application of evolutionary approaches to the management of biotic

- interactions in agro-ecosystems. *Evolutionary Applications*, 4(2), 200–215. <https://doi.org/10.1111/j.1752-4571.2010.00179.x>
- Verma, P., & Pandey, K. (2023). Biofertilizer: An Ultimate Solution for the Sustainable Development of Agriculture. *Current Agriculture Research Journal*, 10(3), 193–206. <https://doi.org/10.12944/carj.10.3.04>
- Zhao, G., Zhu, X., Zheng, G., Meng, G., Dong, Z., Baek, J. H., Jeon, C. O., Yao, Y., Xuan, Y. H., Zhang, J., & Jia, B. (2024). Development of biofertilizers for sustainable agriculture over four decades (1980–2022). *Geography and Sustainability*, 5(1), 19–28. <https://doi.org/10.1016/J.GEOSUS.2023.09.006>
- Siregar, H., dan M. Wiyati. "Pupuk Hayati: Alternatif Ramah Lingkungan untuk Peningkatan Produktivitas Tanaman Pangan." *Jurnal Agro Industri Perkebunan* 15.2 (2020): 67-76.
- Suharjo, R., dan R. Utomo. "Pemanfaatan Pupuk Hayati dalam Mendukung Pertanian Berkelanjutan di Indonesia." *Jurnal Biodjati* 1.2 (2016): 101-108.
- Suryadi, Y., dan N. Andayani. "Peran dan Prospek Pupuk Hayati dalam Meningkatkan Produktivitas Pertanian." *Jurnal Teknologi Lingkungan* 17.1 (2016): 43-50.
- Suwignyo, B., dan B. Hadiwidjojo. "Pupuk Hayati sebagai Solusi Pertanian Berkelanjutan di Indonesia." *Jurnal Ilmu Pertanian dan Peternakan* 4.1 (2019): 11-20.
- Utami, R.W., dan A. Susanto. "Peran Pupuk Hayati dalam Meningkatkan Kualitas Tanah dan Produktivitas Tanaman." *Jurnal Agroekoteknologi* 2.1 (2018): 27-36.
- Wahyudi, A., dan S. Purnomo. "Pengembangan Teknologi Pupuk Hayati untuk Peningkatan Produktivitas Pertanian di Indonesia." *Jurnal Ilmu Tanah dan Lingkungan* 15.1 (2015): 55-62.
- Widowati, R., dan E. Lestari. "Pemanfaatan Pupuk Hayati dalam Mendukung Pertanian Organik di Indonesia." *Jurnal Pertanian Organik* 8.2 (2016): 55-64.

BAB 6

AGEN PENGENDALI HAYATI PENYAKIT TUMBUHAN

Oleh Hermawati Cahyaningrum

6.1 Pendahuluan

Penyakit tumbuhan merupakan salah satu permasalahan utama dalam sistem budidaya pertanian. Hampir setiap tanaman pertanian rentan terhadap infeksi penyakit, baik yang disebabkan oleh jamur, bakteri, virus maupun nematoda (O'Brien, 2017; Ayaz *et al.*, 2023). Kehilangan hasil panen dalam jumlah besar terjadi setiap tahun selama tahap pra dan pasca panen karena infestasi patogen (Pandit *et al.*, 2022). Secara umum, kehilangan hasil akibat penyakit tumbuhan bisa mencapai 25% per tahun, di beberapa kasus bisa lebih tinggi. Tentunya hal ini dapat menimbulkan dampak ekonomi bagi petani baik di level lokal, regional, maupun nasional. Skenario terburuk dapat menyebabkan bencana kelaparan yang mengancam nyawa (O'Brien, 2017). Kerugian akibat penyakit tumbuhan bagi manusia diperkirakan berdampak pada sekitar 800 juta orang di seluruh dunia (He *et al.*, 2021).

Penyakit tumbuhan terjadi akibat interaksi kompleks antara tanaman, patogen, dan lingkungan, dikenal sebagai segitiga penyakit (Agrios, 2005; He *et al.*, 2021). Perubahan iklim yang masif menyebabkan patogen tanaman menjadi semakin agresif, mampu menembus ketahanan tanaman, dan menghambat tanaman untuk menghasilkan panen yang optimal (Sharma *et al.*, 2017). Penyakit tumbuhan harus dikendalikan untuk mempertahankan kualitas dan kuantitas sumber pangan, pakan, dan serat. Berbagai pendekatan pengendalian dilakukan, namun pada umumnya petani bergantung pada pupuk dan pestisida kimia (Pal dan Gardener, 2006; Ayaz *et al.*, 2023).

Input produksi pada sistem budidaya pertanian terbukti meningkatkan kuantitas dan kualitas produksi tanaman. Namun

demikian, penggunaan produk – produk tersebut yang berlebihan menyebabkan kerusakan pada lingkungan baik di udara, tanah, dan air. Penggunaan pestisida kimia yang secara terus – menerus dan intensif mengakibatkan efek samping yang membahayakan kesehatan manusia dan hewan juga dapat membunuh mikroorganisme bukan sasaran.

Hingga saat ini banyak jenis fungisida sintesis yang dilarang penggunaannya karena berbagai hal, misalnya karena mengandung bahan – bahan yang tidak dikehendaki dan memiliki efek racun yang tinggi. Penggunaan pestisida kimiawi saat ini diatur secara ketat, di sisi lain perkembangan penyakit di ekosistem budidaya pertanian semakin masif. Banyak patogen yang mengembangkan ketahanan terhadap fungisida sintesis, hal ini dapat menghambat upaya pengendalian penyakit tumbuhan (Nega, 2014).

Kekhawatiran akan efek negatif penggunaan pestisida yang dilakukan secara terus menerus serta semakin meningkatnya kesadaran terhadap keamanan pangan, memaksa para ahli memikirkan cara pengendalian penyakit tumbuhan yang aman, efektif, dan kompetitif terhadap pengendalian secara kimiawi menggunakan pestisida. Pengendalian hayati menjadi salah satu solusi yang dapat dipertimbangkan untuk cara pengendalian penyakit tumbuhan. Berbagai macam mekanisme pengendalian hayati tersedia untuk digunakan, namun masih diperlukan study lanjut terkait pengembangan dan aplikasi yang efektif termasuk interaksinya dengan tanaman, lingkungan, dan manusia sebagai pengguna.

6.2 Konsep Pengendalian Hayati

Istilah “pengendalian hayati”, dapat juga disebut “pengendalian biologi” telah banyak digunakan dalam berbagai disiplin ilmu biologi, namun paling banyak digunakan dalam entomologi dan fitopatologi (Pal dan Gardener, 2006). Dalam arti luas, pengendalian hayati didefinisikan sebagai penggunaan macam organisme untuk mengendalikan patogen dan penggunaan tanaman tingkat tinggi sebagai salah satu cara terbaik dan paling efektif dalam pengendalian hayati. Dalam perkembangannya, pengendalian hayati didefinisikan sebagai semua kondisi atau praktik yang

berpengaruh terhadap penurunan daya tahan atau kegiatan patogen tanaman melalui interaksi dengan agensia organisme hidup lainnya (selain manusia), yang menghasilkan penurunan keberadaan penyakit yang disebabkan oleh patogen (Soesanto, 2008).

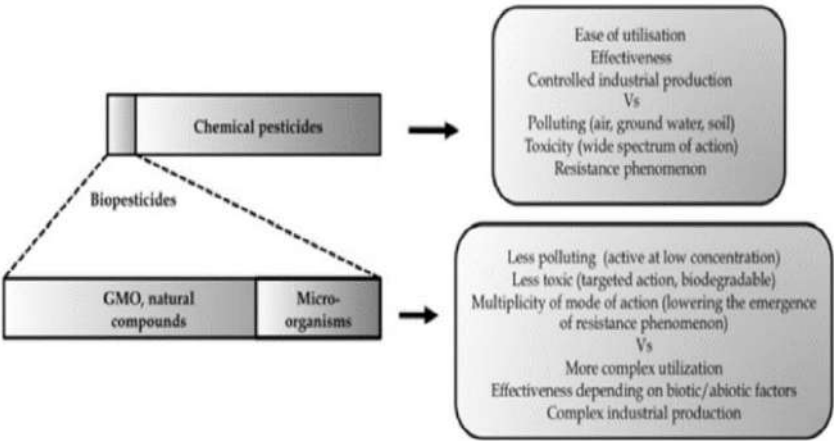
Pengendalian hayati dalam penyakit tumbuhan, didefinisikan sebagai penghambatan langsung maupun tidak langsung terhadap penyakit dan patogen oleh organisme lain (antagonis) atau sekelompok organisme. Pengertian lebih luas termasuk di dalamnya adalah metabolit tertentu yang diekstraksi maupun di isolasi dari ekstrak tanaman yang berguna untuk pengendalian penyakit (Collinge *et al.*, 2022). Formulasi metabolit ini bisa jadi hanya campuran sederhana dari bahan alami dengan aktivitas spesifik tertentu atau campuran yang lebih kompleks dengan berbagai efek pada inang maupun patogen target (Pal dan Gardener, 2006).

Definisi pengendalian hayati berbeda, tergantung pada target pengendaliannya, misalnya jumlah, tipe dan sumber agen hayati, dan intervensi manusia (Pal dan Gardener, 2006). Pengendalian hayati merupakan management pengendalian penyakit dengan menghambat pertumbuhan patogen, meningkatkan ketahanan tanaman, dan/atau memodifikasi lingkungan melalui berbagai mekanisme, misalnya penggunaan agensia hayati (antagonis), metabolit sekunder, maupun sistem budidaya tanaman yang sehat (He *et al.*, 2021). Mikroorganisme yang berguna, biasanya dari kelas bakteri dan jamur, merupakan sumber berbagai metabolit sekunder yang berpotensi untuk mengendalikan penyakit tumbuhan pada berbagai level (Ayaz *et al.*, 2023).

Pengendalian hayati telah diketahui sebagai salah satu metode untuk pengendalian penyakit tumbuhan. Berbagai mekanisme pengendalian hayati telah tersedia dan dapat digunakan untuk mengendalikan patogen, namun penelitian dan pengembangan lebih lanjut masih diperlukan. Efektivitas pengendalian hayati juga membutuhkan pemahaman yang lebih dalam tentang interaksi yang terjadi antara inang (tanaman), lingkungan, patogen, dan manusia dalam konteks ekonomi, ekologi, dan evolusi.

Pemahaman terhadap mekanisme pengendalian hayati akan memudahkan dalam studi efektivitas pengendalian di lapangan, pengembangan formula yang sesuai, dan teknik aplikasi yang mampu meningkatkan kesehatan tanaman, tentunya ke depan untuk mencapai pertanian yang berkelanjutan. Disiplin ilmu yang mendasari pengendalian hayati harus lengkap, menyeluruh, dan terpadu. Pengendalian hayati tidak seharusnya didasarkan pada keilmuan tertentu, namun harus dilihat dari berbagai keilmuan sehingga nantinya dapat melengkapi pemahaman terhadap konsep pengendalian hayati.

Upaya pengendalian penyakit dengan memanfaatkan agen pengendali hayati mempunyai beberapa kelebihan, yaitu lebih murah, aman bagi lingkungan, efektif, efisien, dan dapat dikombinasikan dengan teknik pengendalian lainnya (Asril *et al.*, 2023). Pengendalian hayati juga memiliki beberapa kekurangan, diantaranya dapat berubah fungsi, dapat menjadi kontaminan, penyebarannya terbatas, membutuhkan waktu yang lama, efektifitasnya bergantung kepada kemampuan adaptasi agen hayati yang digunakan, tidak tersedia dalam jumlah banyak, tidak dapat tersedia dalam waktu yang cepat, dan bergantung terhadap kondisi lingkungan (Santoso, 2008; Asril *et al.*, 2023).



Gambar 6.1. Kelebihan dan kekurangan agen pengendali hayati dibandingkan pestisida sintetis (Helene, 2011 *cit.* Nega, 2014)

6.3 Agen Pengendali Hayati Penyakit Tumbuhan

Peneliti dan para ahli saat ini banyak mengeksplorasi pemanfaatan mikroorganisme berguna sebagai strategi ramah lingkungan untuk pengendalian penyakit tumbuhan (Ayaz *et al.*, 2023). Agen pengendali hayati penyakit tumbuhan (agensia hayati) berasal dari berbagai mikroorganisme, baik dari kelompok bakteri, jamur, dan nematoda (Agrios, 2005). Banyak ragam jenis bakteri yang menunjukkan potensi sebagai agensia hayati untuk banyak jenis penyakit tumbuhan, begitu juga dari kelompok jamur yang memperlihatkan peran penting dalam pencegahan perkembangan penyakit pada tanaman – tanaman utama (Ayaz *et al.*, 2023)

Pemanfaatan agensia pengendali hayati tersebut sudah banyak dilakukan, terutama digunakan untuk pengendalian patogen yang keberadaannya sukar dijangkau oleh pestisida kimia. Petani selama ini bergantung dengan pestisida kimia, namun penggunaan yang berlebihan menyebabkan banyak permasalahan, seperti pencemaran lingkungan, residu pada produk pertanian, dan resistensi patogen.

6.3.1 Kelompok Jamur Antagonis

Agensia pengendali hayati dari kelompok jamur ditemukan paling banyak. Jamur, selain menunjukkan kemampuan dalam meningkatkan serapan hara dan nitrogen bagi tanaman, juga memiliki kemampuan sebagai agensia hayati melalui berbagai mekanisme, seperti mikoparasitisme, kompetisi, antibiosis, ketahanan terimbas, dan mekanisme cross-protection (Pandit *et al.*, 2022). Daya tarik jamur sebagai agen pengendalian hayati, khususnya, adalah karena keberadaannya yang umum, tingkat spesifisitas inang yang tinggi, daya hancur terhadap inang, persistensi, efisiensi penyebaran, kemudahan budidaya dan pemeliharaan di laboratorium (Gohel *et al.*, 2022).

Jamur memproduksi berbagai jenis komponen bioaktif yang dapat berguna untuk proteksi tumbuhan. Pengembangan jamur sebagai agensia hayati telah banyak mencuri perhatian karena kemampuannya menghambat berbagai jenis patogen tanaman (Ayaz *et al.*, 2023). Penelitian terkait pengendalian hayati menggunakan jamur antagonis saat ini berkembang dengan cepat

dengan harapan untuk meningkatkan produktivitas tanaman, kesehatan manusia dan hewan, serta produksi pangan (Singh dan Jyoti, 2016).

Trichoderma, *Aspergillus*, *Penicillium*, *Gliocladium*, dan *Saccharomyces* adalah beberapa contoh genus jamur yang populer digunakan sebagai agensia hayati (Ayaz *et al.*, 2023). *Trichoderma* merupakan agen pengendali hayati yang penting, banyak dimanfaatkan untuk mengendalikan berbagai patogen tumbuhan yang ditularkan melalui tanah maupun udara (Tariq *et al.*, 2020). Beberapa contoh jamur yang banyak dimanfaatkan sebagai agensia hayati disajikan dalam Tabel 6.1.

Tabel 6.1. Agen pengendali hayati dari kelompok jamur

Agensia Hayati	Patogen Target	Penyakit	Mekanisme Penghambatan
<i>Trichoderma harzianum</i>	<i>Crinipellis perniciosa</i> ; <i>Sclerotinia sclerotiorum</i> ; <i>Rhizoctonia solani</i> ; <i>Fusarium udum</i> ; <i>Penicillium expansum</i> ; <i>Pyrenophora triticitrepentis</i> ; <i>P. capsici</i> ; <i>P. erythrosepatica</i> ; <i>Bipolaris oryzae</i> ;	Witches broom; Root rot; Damping-off; Wilt; Blue and grey mold; Tan spot and leaf blotch; Crown rot/leaf blight	- Kompetisi ruang dan nutrisi - Mikoparasitisme - Antibiosis - Ketahanan terimbas
<i>T. ligonarum</i>	<i>Rhizoctonia solani</i>	Damping-off	
<i>T. viridae</i>	<i>Aspergillus flavus</i> ; <i>F. Moniliformae</i> ; <i>Colletotrichum truncatum</i> ; <i>Sclerotium cepivorum</i>	Seed associated; Brown blotch; White rot;	
<i>Trichoderma spp.</i>	<i>Sclerotium rolfsii</i>	Rot	
<i>T. koningii</i>	<i>Sclerotium cepivorum</i> ; <i>Sclerotinia sclerotiorum</i> ; <i>Gaeumannomyces</i>	White rot; Head rot; Take-all disease	

Agensia Hayati	Patogen Target	Penyakit	Mekanisme Penghambatan
	<i>graminis var. tritici</i>		
<i>T. pseudokoningii</i>	<i>Sclerotium cepivorum</i>	White rot	
<i>T. asperellum</i>	<i>F. oxysporum</i> ; <i>S. Sclerotiorum</i> apothecia; <i>Sclerotium cepivorum</i> ; <i>C. gloeosporoides</i>	Wilt	
<i>T. virens</i>	<i>Verticilium dahliae</i> ; <i>R. Solani</i> ; <i>Phytium ultimum</i> ; <i>Meloidogyne incognita</i>	Wilt; Damping-off	
<i>T. aureoviridae</i>	<i>Sclerotinia sclerotiorum</i>	Head rot	
<i>T. longibrachiatum</i>	<i>Sclerotinia sclerotiorum</i>	Head rot	
<i>Gliocladium catenulatum</i>	Soilborne pathogen; <i>Sclerotinia</i> sp.	Grey mold	- Kompetisi ruang dan nutrisi - Mikoparasitisme - Antibiosis
<i>G. virens</i>	<i>R. solani</i> ; <i>Phytium</i> spp.		
<i>Phlebiopsis gigantea</i>	<i>Heterobasidion annosum</i>	Root; Butt rot	Kompetisi
<i>Pseudozyma flocculosa</i>		Powdery mildew	Parasitisme
<i>Phytium oligandrum</i> M1	<i>Sclerotinia</i>	Grey mold	- Mikoparasitisme - Ketahanan terimbas

Sumber: Sharma *et al.*, 2017; Collinge *et al.*, 2022

Pengendalian penyakit tumbuhan oleh kelompok jamur dilakukan dengan berbagai mekanisme, yaitu kompetisi ruang dan nutrisi, antibiosis, mikoparasitisme, parasitisme, dan mekanisme ketahanan terimbas.

6.3.2 Kelompok Bakteri Antagonis

Bakteri telah sejak lama dimanfaatkan untuk meningkatkan pertumbuhan tanaman, baik melalui perlakuan pada tanah, benih/biji, akar, maupun struktur tanam lainnya. Peran bakteri sebagai agen fiksasi nitrogen, mendegradasi toksin, meningkatkan pertumbuhan tanaman, dan sebagai agen pengendali hayati (Tariq *et al.*, 2020). Penggunaan bakteri sebagai agen pengendali hayati telah mendapat perhatian dalam beberapa tahun terakhir sebagai pendekatan berkelanjutan untuk pengelolaan penyakit tumbuhan di bidang pertanian (Lee *et al.*, 2023). Dalam aplikasinya, ketika bakteri sebagai agen pengendali hayati dilepaskan dalam tanah, maka dia akan berinteraksi dengan tanaman inang dimana bakteri akan berpengaruh terhadap pertumbuhan dan ketahanan tanaman (Benaissa, 2024).

Bakteri dari genus *Bacillus*, *Paenibacillus*, *Agrobacterium*, *Bradyrhizobium*, *Acanitobacter*, *Azospirillum*, *Azotobacter*, *Pseudomonas*, *Rhizobium*, dan *Streptomyces* banyak diketahui dimanfaatkan sebagai agen pengendali penyakit (Ayaz *et al.*, 2023). Efektivitas bakteri sebagai agen pengendali hayati penyakit bergantung pada mekanisme serangan, dosis, metode aplikasi, kondisi mikrobial, sensitivitas patogen target, tanaman, dan kondisi lingkungan (Bonaterra *et al.*, 2022). Berikut adalah beberapa contoh bakteri yang berperan sebagai agen pengendali hayati penyakit tumbuhan, disajikan dalam Tabel 6.2.

Tabel 6.2. Agen pengendali hayati dari kelompok bakteri

Agensia Hayati	Patogen Target	Penyakit	Mekanisme Penghambatan
<i>Pseudomonas chlororaphis</i>	<i>Fusarium oxysporum f. sp. Radicis-lycopersici</i>	Foot and root rot	Antibiosis
<i>P. fluorescens</i>	<i>Phytophthora infestans</i> ; <i>Sarocladium oryzae</i> ; <i>Banana bunchy top virus (BBTV)</i> ; <i>Dematophora necatrix</i> ; <i>F. culmorum</i> ; <i>Rhizoctonia solani</i> ; <i>P. ultimum</i> ; <i>Phoma betae</i>	Late blight; Sheath rot; Bunchy top diseases; Root rot; Vascular wilt; Sheath blight; Damping-off/Powdery mildew	- Siderofor - PGPR - Antibiosis - Kompetisi

Agensia Hayati	Patogen Target	Penyakit	Mekanisme Penghambatan
<i>P. putida</i>	<i>Fusarium sp.</i>	Wilt	- Siderofor - PGPR - Kompetisi
<i>B. amyloliquefaciens</i>	<i>CMV; TMV; F. oxysporum; Botrytis cinerea</i>	Mosaic disease; Tomato mottle; Wilt; Blight	- Antibiosis - Ketahanan terimbas
<i>B. subtilis</i>	<i>Sclerospora graminicola</i>	Downey mildew	- Antibiosis - Kompetisi
<i>Bacillus sp.</i>	<i>Phytophthora capsici; Magnaporthe grisea</i>	Blight; Blast	PGPR
<i>Paenibacillus sp.</i>	<i>F. oxysporum</i>	Wilt	Antibiosis
<i>Lysobacter enzymogenes</i>	<i>F. graminearum; Phytium aphanidermatum</i>	Wilt	
<i>Stenotrophomonas maltophilia</i>	<i>P. ultimum</i>	Damping-off	
<i>Collimonas fungivorans</i>	<i>F. oxysporum</i>	Root and crown rot	
<i>Burkholderia cepacia</i>	<i>Phytium sp.; Aphanomyces sp.</i>	Damping-off; Root rot	

Sumber: Soesanto, 2008; Sharma *et al.*, 2017; Collinge *et al.*, 2022

6.4 Mekanisme Pengendalian Hayati

Pengendalian hayati memiliki peran yang sangat penting dalam menekan perkembangan penyakit sekaligus meningkatkan pertumbuhan tanaman serta kualitas dan kuantitas produksi. Penekanan penyakit dapat diperoleh dengan berbagai cara, misalnya mikoparasitisme, antibiosis, kompetisi, degradasi dinding sel, ketahanan terimbas, kemampuan mengkolonisasi akar, dan PGPR (Kumari *et al.*, 2019).

Pemanfaatan agen pengendali hayati untuk pengendalian penyakit tumbuhan telah banyak dilakukan. Keberhasilan pengendalian hayati diperoleh dari berbagai macam interaksi antara organisme, dalam banyak kasus, patogen dikendalikan oleh keberadaan dan aktivitas organisme lain yang mereka temui. Perbedaan mekanisme antagonisme dikaitkan dengan jumlah kontak antar spesies dan kekhususan interaksi (Tabel 6.3.).

Tabel 6.3. Mekanisme pengendalian hayati penyakit tumbuhan

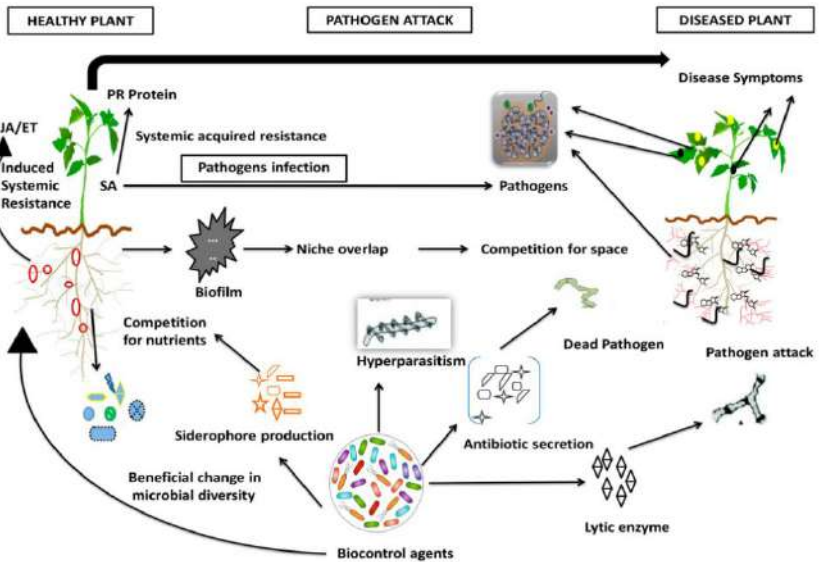
Tipe interaksi	Mekanisme	Contoh
Antagonisme langsung	Hiperparasitisme/Predasi	- Lytic/mycovirus nonlytic - Ampelomyces quisqualis - Lysotobacter enzymogenes - Pasteuria penetrans - Trichoderma virens
Antagonisme campuran	Antibiotik	- 2,4-diacetylphloroglucinol - Phenazines dan Cyclic lipopeptides
	Enzim litik	- Chitinases - Glukanases - Proteases
	Penghambatan fisik/kimia	- Blokade ruang hidup - Penghambatan signal perkecambahan spora - Gangguan pada signal molekuler
	Metabolit sekunder	- Ammonia - Carbon dioxide - Hydrogen cyanide
Antagonisme tidak langsung	Kompetisi	- Konsumsi eksudat/nutrisi - Siderofor - Kompetisi ruang hidup
	Ketahanan terimbasi	- Kontak dengan dinding sel jamur - Deteksi interaksi patogen - Fitohormon

Sumber: Nega, 2014

Antagonisme langsung merupakan hasil dari kontak fisik dan/atau seleksi tingkat tinggi terhadap patogen berdasarkan mekanisme yang ditunjukkan oleh suatu agensia hayati. Sebaliknya, antagonisme tidak langsung merupakan hasil dari berbagai aktivitas yang tidak melibatkan patogen secara langsung (Pal dan Gardener, 2006). Pemahaman terhadap mekanisme pengendalian hayati akan membantu dalam menentukan jenis dan formula agensia hayati yang akan digunakan, baik secara tunggal maupun kombinasi untuk meningkatkan efektivitas pengendalian di lapangan (Tariq et al., 2020).

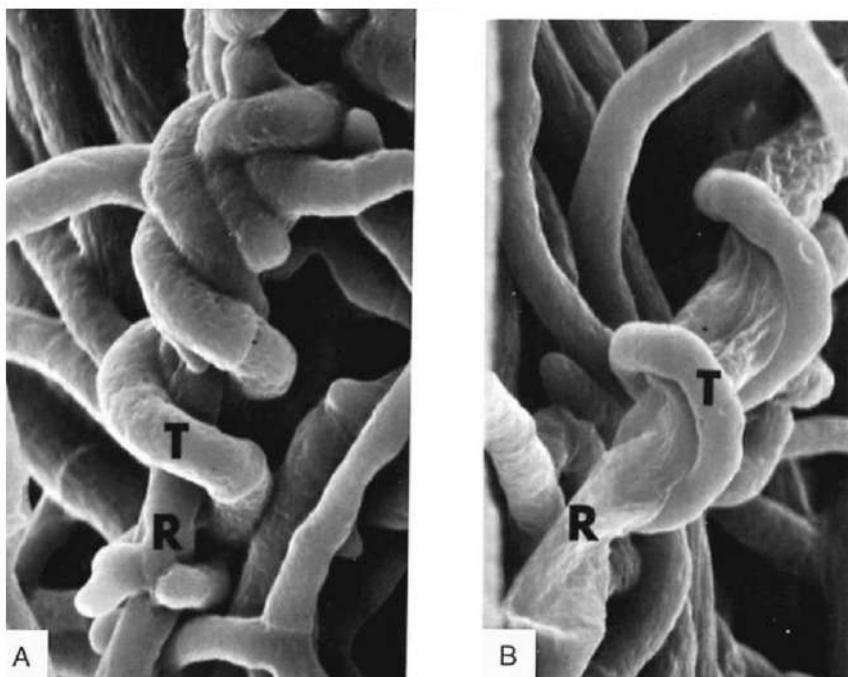
Ada empat mekanisme pengendalian hayati, yaitu:

1. Kompetisi nutrisi (oksigen, carbon, nitrogen, dan sumber nutrisi lainnya)
2. Kompetisi ruang atau tempat hidup melalui antibiosis, dimana agen hayati mengeluarkan metabolit sekunder yang sifatnya racun bagi patogen
3. Hiperparasitisme, dimana agensia hayati bersifat sebagai predator dan patogen adalah mangsanya
4. Ketahanan terimbas, yaitu antagonisme tidak langsung, agen hayati menginduksi ketahanan tanaman untuk melawan infeksi patogen



Gambar 6.2. Mekanisme pengendalian hayati penyakit tumbuhan (Tariq et al., 2020)

Satu jenis agensia hayati dapat memiliki kombinasi dari beberapa mekanisme tersebut. Misalnya spesies *Trichoderma* dapat berperan sebagai hiperparasit terhadap patogen, memproduksi metabolit sekunder, dapat sebagai kompetitor patogen, dan atau menginduksi ketahanan pada tanaman (Collinge *et al.*, 2022).



Gambar 6.3. Mekanisme hiperparasit *Trichoderma harzianum* terhadap *Rhizoctonia solani*. (A) Hifa *Trichoderma* (T) melilit hifa *R. solani* pada 2 hsi, (B) Kerusakan sel dan kehilangan turgor *R. solani* pada 6 hsi, dimana hifa *Trichoderma* tetap nampak normal (Agrios, 2005)

6.5 Faktor – Faktor Yang Berpengaruh Terhadap Efektivitas Agen Hayati Penyakit Tumbuhan

Pengendalian hayati di lapangan seringkali tidak menunjukkan hasil yang significant, meskipun dalam aplikasi di laboratorium dan di rumah kaca memperlihatkan hasil yang efektif. Agensi pengendali hayati menghadapi tantangan yang cukup besar ketika dilakukan aplikasi di lapangan, kondisi lingkungan yang berbeda dibandingkan di laboratorium seringkali membuat efektivitas pengendalian menurun (Ayaz *et al.*, 2023).

Efisiensi agensi hayati dalam penekanan penyakit tumbuhan mungkin sama atau lebih baik dibandingkan dengan pengendalian menggunakan pestisida sintetis, akan tetapi hal ini dapat berubah seiring berjalannya waktu dan aplikasinya di lokasi

yang berbeda (Ayaz *et al.*, 2023). Efektifitas pengendalian hayati merupakan hasil interaksi yang kompleks antara tanaman inang, patogen, agen pengendali hayati (antagonis), dan lingkungan. Lingkungan abiotik, khususnya di dalam tanah sangat berpengaruh terhadap pertumbuhan dan kehidupan mikroba tanah, baik untuk patogen maupun antagonisnya (Soesanto, 2008). Faktor lingkungan dan biologi seringkali tumpang tindih satu sama lain, namun yang terpenting adalah tekstur tanah, kelembapan tanah, suhu, dan predasi atau kompetisi. Seringkali hal – hal tersebut sulit dikendalikan di lapangan (Abd-Elgawad dan Askary, 2020). Beberapa faktor yang mempengaruhi efektivitas pengendalian hayati penyakit tumbuhan yaitu:

1. Lingkungan abiotik

Lingkungan abiotik sangat berpengaruh terhadap keberhasilan aplikasi agen pengendali hayati di lapangan, terutama pH, suhu, kelembapan, jenis tanah, atmosfer, ketersediaan bahan organik dan anorganik, serta jenis pestisida yang digunakan

2. Jenis tanaman

Jenis tanaman dan genotipe yang berbeda memiliki dampak yang signifikan terhadap efektivitas pengendalian hayati. Jumlah kolonisasi akar, produksi antibiotik oleh agensia hayati, dan kemampuan mengimbas ketahanan tanaman sangat beragam diantara spesies tanaman.

3. Patogen

Perilaku patogen terhadap agensia pengendali hayati merupakan salah satu faktor penting dalam pengendalian penyakit tumbuhan. Setiap patogen berinteraksi secara berbeda didasarkan pada variasi genetik dan keberagaman ekologi.

4. Agen pengendali hayati dan sifatnya

Kemampuan beradaptasi agensia hayati terhadap kondisi iklim lokal biotik dan abiotik seringkali menjadi penyebab penurunan efisiensi pengendalian di lapangan. Untuk itu, perlu dilakukan penelitian lebih lanjut terkait pola distribusi agensia hayati di daerah perakaran.

DAFTAR PUSTAKA

- Abd-Elgawad, M. M. M dan Askary T H. 2020. *Factors Affecting Succes of Biological Agents Used in Controlling the Plant-parasitic Nematodes*. *Egyptian Journal of Biological Pest Control* 30: 17. <https://doi.org/10.1186/s41938-020-00215-2>
- Agrios, G. N. 2005. *Plant Pathology – 5th Ed. Elsevier Academic Press*. Pp. 948.
- Asril, M., Ohiwal M., Sepe M., Bulawan J. A., Lestari W., Arsi, Sari S P., Windriyati R. D. H., Ramdhan E. P., Apriliyanto, E. 2023. *Pengendalian Hayati*. Yayasan Kita Menulis, Medan. 150 hal.
- Ayaz, M., Li C-H., Ali Q., Zhao W., Chi Y-K., Shafiq M., Ali F., Yu X-Y., Yu Q., Zhao J-T., Yu J-W., Qi R-R. 2023. *Bacterial and Fungal Biocontrol Agents for Plant Disease Protection: Journey from Lab to Field, Current Status, Challenges, and Global Perspectives*. *Molecules* 28, 6735.
<https://doi.org/10.3390/molecules28186735>
- Benaissa, A. 2024. *Rhizosphere: Role of Bacteria to Manage Plant Diseases and Sustainable Agriculture – A review*. *Journal of Basic Microbiology* 64: 2300361.
<https://doi.org/10.1002/jobm.202300361>
- Bonaterra, A., Badosa E., Daranas N., Frances J., Rosello G., Mntesinos E. 2022. *Bacteria as Biological Control Agents of Plant Diseases*. *Microorganisms* 10, 1759.
<https://doi.org/10.3390/microorganisms10091759>
- Collinge, D. B., Jensen D. F., Rabiey M., Sarrocco S., Shaw M. W., Shaw R. H. 2022. *Biological Control of Plant Diseases – What has been achieved and what is the direction?. Plant Pathology* 71: 1024 – 1047. DOI: 10.1111/ppa.13555
- Kumari, R., Bagri G. K., Sharma R. K., Akram M., Husain A., Irsad. 2019. A Review – Biocontrol Agent: A Boon for Sutainable Agriculture. *Int. J. Curr. Microbiol. App. Sci* 8 (8): 1613 – 1617. <https://doi.org/10.20546/ijcmas.2019.808.190>
- Nega, A. 2014. *Review on Concept in Biological Control of Plant Pathogens*. *Journal of Biology, Agriculture, and Healthcare* 4 (27): 33 – 54

- O'Brien, P. A. 2017. *Biological Control of Plant Diseases. Australasian Plant Pathol* 46: 293 – 304. DOI 10.1007/s13313-017-048-4
- Pal, K. K. and B. M. Garneder. 2006. *Biological Control of Plant Pathogens. The Plant Health Instructor*. APSnet. DOI: 10.1094/PHI-A-2006-1117-02
- Pandit, M. A., Kumar J., Gulati S., Bhandari N., Mehta P., Kaytal R., Rawat C. D., Mishra V., Kaur J. 2022. *Major Biological Control Strategies for Plant Pathogens. Pathogens* 11, 273. <https://doi.org/10.3390/pathogens11020273>
- Sharma, M., A. Taradaftar, Raju G., S. Gopalakrishanan. 2017. *Advances in Soil Microbiology: Recent Trends and Futire Prospects, Microorganisms for Sustainability 4*, T. K. Adhya et al. (eds.). Springer Nature Singapore Pte Ltd. Pp 153 – 188. https://doi.org/10.1007/978-981-10-7380-9_8
- Singh, D. P. dan Jyoti, S. 2016. *Fungi as Biocontrol Agents in Sustainable Agricultutre. Microbes and Environmental Management*. Pp173 – 194
- Soesanto, L. 2008. *Pengantar Pengendalian Hayati Penyakit Tanaman: Suplemen ke Gulma dan Nematoda*. RajaGrafindo Persada, Jakarta. 574 hal.
- Tariq, M., Khan A., Asif M., Khan F., Ansari F., Shariq M., Siddiqui M. A. 2020. *Biological Control: A sustainable and Practical Approach for Plant Disease Management. ACTA AGRICULTURE SCANDINAVICA, SECTION B* 70 (6): 507 – 524

BAB 7

BIOPESTISIDA DARI BAHAN ALAM DAN MIKROORGANISME

Oleh Jefri Sembiring

7.1 Pendahuluan

Kerugian tanaman yang disebabkan oleh hama dan penyakit tanaman dapat mencapai 100% pada kondisi tertentu, hal disebabkan sekitar 67.000 spesies Organisme Pengganggu Tanaman (OPT), termasuk patogen tanaman, gulma, invertebrata, dan beberapa spesies vertebrata hama tanaman, dapat mengurangi hasil panen secara global kurang (Soesanto, 2017) (Indriyanti Octavia et al., 2020). Hama dan penyakit tanaman sering menghalangi peningkatan produksi, hal ini dapat menimbulkan kerugian besar atau kegagalan panen. Sebagai contoh serangan hama dapat mengurangi hasil kubis hingga seratus persen.

Pada umumnya pestisida dianggap paling efektif untuk mengatasi gangguan hama, namun dapat juga menyebabkan kerugian, seperti resistensi hama, resurgensi hama, kematian musuh alami, dan masalah pencemaran lingkungan. Untuk melindungi spesiesnya dari kepunahan akibat serangan OPT, tanaman secara alami menghasilkan senyawa beracun yang disebut metabolit sekunder. Spesies tanaman yang tidak pernah diserang OPT atau yang mengganggu tanaman lain mungkin mengandung senyawa metabolit sekunder yang dapat digunakan sebagai pestisida (Novizan, 2002). Pestisida organik berasal dari bahan dasar alami atau nabati dengan sifat unik yang mudah terurai di alam, mencegah resurgensi dan kekebalan OPT dan memaksimalkan kemampuan alam untuk mengendalikan OPT. Penggunaan pestisida organik dalam Pengendalian Hama Terpadu saling menguntungkan karena tujuan keduanya adalah untuk mengurangi efek negatif dari penggunaan pestisida sintesis dan

untuk memaksimalkan kemampuan alam untuk mengendalikan OPT(Isman, 2006).

Petani dapat membahayakan konsumen dan ekosistem jika mereka menggunakan pestisida terlalu banyak. Metode alternatif untuk mengurangi pencemaran lingkungan adalah pestisida nabati. Prinsip penggunaan pestisida nabati adalah untuk mengurangi ketergantungan petani terhadap pestisida kimia dan bukan untuk meninggalkan pestisida kimia(Yoga et al., 2023). Penggunaan pestisida kimia yang berlebihan dapat berdampak negatif pada lingkungan karena pestisida kimia membunuh hama dan patogen penyakit pengganggu tanaman serta hewan/serangga lain yang bermanfaat bagi lingkungan. Penggunaan pestisida kimia yang berlebihan juga dapat menyebabkan residu bahan kimia, yaitu bahan kimia yang tidak terurai (Wiyanto, 2022).



Gambar 7.1. Serangan Hama wereng
Sumber.

<https://regional.kompas.com/read/2020/08/28/09525721/serangan-hama-wereng-di-jombang-diprediksi-turunkan-hasil-panen?page=all>

Menurut Peraturan Menteri Pertanian Republik Indonesia No. 107 tahun 2014, pestisida adalah semua bahan kimia, virus, dan jasad renik yang digunakan untuk menghilangkan hama dan penyakit yang merusak tanaman, menghilangkan gulma, mematikan daun untuk mencegah pertumbuhan berlebihan, mengatur atau mendorong pertumbuhan tanaman, mencegah hama luar pada hewan peliharaan dan ternak, mencegah hewan dan jasad renik di dalam rumah (alat pengangkutan), dan menghilangkan makhluk hidup dari tanaman (Suwarman dkk., 2022). Pestisida sintetis atau

kimia tidak dapat menggantikan pestisida hayati karena dapat membahayakan lingkungan dan makhluk hidup serta menimbulkan resistensi hama (Utama et al., 2021). Pestisida nabati juga termasuk dalam kategori pestisida yang ramah lingkungan karena mempengaruhi tanaman hanya dalam jangka waktu tertentu dan dapat dibuang dengan mudah (Bunders et al., 1996).



Gambar 7.2. Pengendalian serangan hama

Sumber: <https://fac-pt.com/artikel/cara-dan-waktu-aplikasi-pestisida/>

Pestisida hayati biasanya bekerja sebagai (1) Repelan (mengusir serangga dari tanaman karena aromanya yang kuat), (2) Antifidan (rasanya yang pahit), (3) Toksik pada sistem saraf serangga, (4) Mengganggu sistem hormon tubuh serangga, (5) Atraktan (menarik serangga ke dalam perangkap) (Kasi, 2012).

Sinar matahari, udara, kelembapan, dan komponen alam lainnya menguraikan pestisida hayati dengan cepat. Sifat ini mengurangi risiko pencemaran tanah dan air dan juga mengurangi risiko residu pada hasil panen. Baik manusia maupun hewan ternak aman karena toksisitas rendah pada mamalia (Hilda & Syafruddin, 2023). Karena spektrum pengendalian yang luas dan phitotoksisitas yang rendah, pestisida hayati memiliki selektivitas tinggi. Akibatnya, potensi kerusakan pestisida nabati pada tanaman sangat rendah. Menurut Saenong (2016), kelemahan pestisida hayati, juga dikenal sebagai biopestisida, adalah sebagai berikut:

1. Kecepatan kerja yang lambat, yang berarti dampak penyemprotan pestisida hayati tidak langsung terlihat.
2. Tidak membunuh hama secara langsung

3. Mengurangi nafsu makan hama (hama mati perlahan atau hanya diusir atau tidak mau lagi memakan tanaman yang disemprot pestisida hayati).
4. Mudah rusak ketika terpapar sinar matahari
5. Tidak dapat disimpan dalam waktu yang lama, jadi setelah dibuat, harus digunakan.
6. Harus digunakan secara teratur.

7.2 Tanaman sebagai Pestisida Nabati

Indonesia memiliki keanekaragaman hayati terbanyak kedua di dunia setelah Brazil. Tumbuhan adalah gudang bahan kimia yang penuh dengan banyak jenis bahan aktif. Suatu kelompok bahan aktif disebut sebagai "produk metabolit sekunder". Bahan-bahan ini sangat penting untuk berinteraksi dan berkompetisi, serta untuk melindungi diri dari gangguan dari pesaing mereka. Produk metabolit sekunder ini dapat digunakan sebagai bahan aktif untuk merawat tanaman. Insektisida tunggal menghasilkan resistensi lebih cepat daripada insektisida ganda atau campuran (Kusumawati & Istiqomah, 2022)

Pestisida nabati dibuat dari tumbuh-tumbuhan dan sisa-sisa tanaman yang mudah terurai di alam (Kamarubayana et al., 2022), sehingga relative aman bagi lingkungan/manusia atau kehidupan makhluk hidup lainnya. Berbagai jenis gulma seperti babandotan dan tumbuhan lainnya yang dapat digunakan sebagai pestisida nabati seperti tembakau, mimba, mindi, mahoni, srikaya, sirsak, tuba, dan (Samsudin, 2008).



a.Tembakau



b.Mindi



c. Mahoni

Gambar 7.3. Tanaman berpotensi sebagai insektisida

Diharapkan bahwa lingkungan yang aman dapat diciptakan melalui pengendalian hama terpadu yang menggunakan pestisida nabati. Konsentrasi racun dalam tanaman menentukan jumlah racun yang mengenai kulit serangga, yang dapat menghambat pertumbuhan dan menyebabkan kematian lebih banyak serangga (Samsudin, 2008 *dalam* Sinaga R, 2009). Banyak bahan kimia yang terkandung dalam tumbuhan dikenal sebagai metabolit sekunder dan digunakan oleh tumbuhan untuk melindungi dirinya dari organisme pengganggu. Walaupun hanya ada sekitar 10.000 jenis metabolit sekunder yang telah ditemukan, tumbuhan sebenarnya mengandung lebih dari 400.000 bahan kimia. Menurut Grainge dkk. (1984) *dalam* Sastrosiswojo (2002), ada 1800 jenis tanaman yang mengandung pestisida nabati dapat digunakan untuk mengendalikan hama; ada sekitar 2400 jenis tanaman di 235 famili di Indonesia. (Kardinan, 1999). Morallo-Rijesus (1986) *dalam* Sastrosiswojo (2002) menyatakan bahwa kelompok tanaman *Asteraceae*, *Fabaceae*, dan *Euphorbiaceae* mengandung insektisida nabati yang paling banyak. Pestisida nabati dapat mengendalikan

serangan hama dan penyakit melalui kombinasi berbagai cara atau secara tunggal. Pestisida nabati berfungsi dengan cara yang sangat spesifik, seperti berikut:

1. Menghentikan pertumbuhan telur, larva, dan pupa;
2. Menghentikan pergantian kulit/instar;
3. Mengganggu komunikasi antar individu serangga;
4. Menyebabkan serangga menolak makan;
5. Menghentikan reproduksi serangga betina;
6. Mengurangi nafsu makan;
7. Menghentikan serangga untuk makan;
8. Mengusir serangga; dan
9. Mencegah perkembangan penyakit patogen(Wulandari et al., 2019)(Hariyanto, 2015).

Pestisida nabati dan alami mudah terurai di alam, sehingga tidak mencemari lingkungan dan aman bagi manusia dan ternak peliharaan. Pestisida nabati lebih aman dan mudah digunakan karena mereka membunuh hama secara instan (*bersifat kontak*) dan residunya cepat menghilang di alam. Dengan demikian, tanaman aman untuk dikonsumsi karena tidak mengandung sisa pestisida (Supriyatin dan Marwoto, 2000) (Hariyanto, 2015). Menurut Suriana (2012), beberapa keuntungan dan kekurangannya termasuk: tidak meracuni (tidak toksik) dan mudah terurai di alam, sehingga tidak mencemari lingkungan secara relatif dan aman bagi manusia dan hewan peliharaan karena residunya mudah hilang(Rahmawati, 2020). Meskipun demikian, ada beberapa kekurangan pestisida nabati, seperti berikut:

1. Daya kerja pestisida nabati cepat terurai, yang berarti harus digunakan lebih sering untuk mengendalikan serangan hama.
2. Tidak dapat disimpan dalam waktu yang lama, sehingga harus digunakan segera setelah diproduksi (rata-rata 2 x 24 jam).
3. Produksi pestisida nabati tidak dapat dilakukan dalam jumlah besar.
4. Tidak praktis karena harus dibuat terlebih dahulu dan membutuhkan banyak waktu, sehingga tidak dapat

disimpan. Haryono (2011) menyatakan bahwa penggunaan pestisida nabati memiliki beberapa kelebihan dan kelemahan. Penggunaan pestisida hayati adalah salah satu metode pengendalian hama terpadu (PHT) yang menggunakan prinsip yang ramah lingkungan. Tujuan umum PHT adalah untuk mengurangi penggunaan pestisida kimia, mencegah resurgensi OPT, dan mencegah kekebalan OPT (IRFAN, 2016)(Dawarblandong et al., 2019).

7.3 Mikroorganisme

Mikroorganisme, makhluk hidup dalam skala mikroskopis, dapat melakukan berbagai aktivitas kehidupan, seperti mengalami pertumbuhan, menghasilkan energi, dan bereproduksi sendiri. Karena kemampuan mereka untuk menyesuaikan diri, metabolisme mikroorganisme sangat fleksibel (Evie Ratnasari & Winarsih, 2015). Insektisida mikroba mengendalikan hama serangga dengan menyebabkan penyakit dan akhirnya menyebabkan kematian hama. Mikroorganisme dapat bertahan lama di lingkungan dan membatasi populasi serangga hama untuk waktu yang lama. Di antara keuntungan menggunakan insektisida mikroba adalah keamanan karena sangat spesifik. Selain itu manfaat tambahan adalah bahwa resistensi (*kekebalan*) serangga hama relatif kecil, sehingga dapat digunakan ketika insektisida kimiawi tidak efektif lagi. Insektisida mikroba juga lebih murah daripada insektisida kimia dan mudah ditemukan di pasar (Evie Ratnasari & Winarsih, 2015)(Suada, 2017).

Untuk menggunakan insektisida mikroba dengan sukses di lapangan maka harus di pahami tentang ekologi mikroba dan hama. Selain itu, ada beberapa alasan mengapa petani tidak ingin menggunakan bahan biologi untuk melindungi tanaman dari serangan hama. Salah satunya adalah daya kerja insektisida biologi yang rendah serta insektisida biologi membunuh hanya serangga jenis tertentu. Tidak seperti insektisida kimia yang membasmi dengan cepat, termasuk predator dan parasitoid hama, yang secara alami mengontrol populasi hama. Sebagai contoh *Baculovirus* adalah kelompok virus yang sedang dikembangkan sebagai bioinsektisida untuk serangga penggerek jagung, kutu, kumbang kentang, dan

kumbang daun. Virus NPV (*Nuclear Polyhedrosis Virus*) adalah salah satu jenis Baculovirus yang menyebabkan penyakit pada larva serangga Lepidoptera, Heminoptera, Diptera, dan Coleoptera. Sebagai contoh, ulat Grayak (*Pseudaletia unipuncta*) dan hama kapas (*Heliothis zea*) (Evie Ratnasari & Winarsih, 2015)(Kuswardani & Maimunah, 2013).

7.4 Patogen Serangga

Mikroorganisme infeksius yang membuat luka atau membunuh inangnya dikenal sebagai patogen. Beberapa pathogen menyebabkan penyakit pada hewan dan tanaman, tetapi banyak juga mikroorganisme yang bermanfaat. Mereka menghancurkan racun, menghasilkan nutrisi untuk tanaman, membantu mengendalikan gulma, melawan pathogen yang menyebabkan penyakit tumbuhan, dan ada juga mikroorganisme yang menyebabkan penyakit pada serangga atau arthropoda lainnya (Asrianto, 2022)(Suwandi, 2009). Pathogen dapat masuk ke tubuh serangga melalui dua cara: pertama, ketika patogen tertelan oleh inang selama proses makan; kedua, ketika patogen masuk melalui bukaan alami atau penetrasi langsung ke kutikula serangga.

Penyakit serangga dapat berpindah dari serangga yang sakit ke yang sehat, yang dikenal sebagai transmisi horizontal, atau juga perpindahan penyakit terjadi dari serangga ke *progeny/offspringnya* yang sering dikenal sebagai *vertical transmission* (Pinaria, 2023). Pathogen serangga memiliki perilaku spesifik di lingkungan. Spora bakteri, protozoa, dan mikrosporidia selalu dapat ditemukan dengan cepat di suspensi air, tetapi spora cendawan yang sangat kecil dan ringan dapat dibawa angin, serta perilaku Nematoda yang sangat aktif mencari inang (Kuswardani & Maimunah, 2013)(Suwandi, 2009).

Sebagian kecil pathogen dapat bertahan beberapa jam di bawah sinar matahari langsung dan sinar ultraviolet, dan beberapa lainnya sangat sensitif terhadap suhu kering, suhu tinggi, dan beberapa jenis kemikal lainnya. Faktor-faktor lingkungan ini meningkatkan kepekaan mikroorganisme pathogen. Kemampuan stadia infeksius patogen untuk bertahan hidup di luar inangnya adalah kunci keberhasilan bakteri insektisida. Bioinsektisida sangat

penting karena tidak toksik bagi manusia dan vertebrata lainnya dan biasanya menyerang hama tertentu serta jarang menyebabkan kerusakan yang signifikan pada serangga berguna. Karena itu, bioinsektisida (inundasi) harus digunakan berkali-kali untuk memiliki efek pengendalaian yang signifikan pada hama.

Semua patogen serangga memiliki sebaran inang yang spesifik yang memungkinkan mereka hidup dan bereproduksi. Beberapa patogen memiliki sebaran inang yang sangat spesifik, dan beberapa lainnya memiliki sebaran inang yang luas. Sebaran inang ini sangat penting untuk membawa patogen tertentu ke tempat baru dimana mereka hidup. Kemampuan patogen serangga untuk menyebabkan sakit pada inangnya secara alami bergantung pada dosis yang diberikan (Nugroho, 2009).

Cendawan entomopatogen memiliki kemampuan untuk menginfeksi serangga inang secara langsung melalui kutikula. Pada awalnya, spora cendawan dapat melekat pada kutikula, dan pada kondisi yang baik, spora akan berkecambah dan masuk ke hemocoel, di mana cendawan akan bereproduksi dalam bentuk hifa. Serangga dapat mati setiap saat, dan cendawan akan melanjutkan siklusnya dalam fase saprofitik. Spora infeksi diproduksi setelah miselia mengisi tubuh serangga inang. Serangga inang yang terserang cendawan memiliki ciri khas berwarna putih, hijau, atau merah muda, tergantung pada spora cendawan. Dalam beberapa kasus serangga yang mati karena cendawan menunjukkan ciri perilaku yang akan naik ke atas tanaman dan melekat di sana. Beberapa pakar menganggap fenomena ini sebagai upaya untuk menjaga populasi lain yang sehat dari serangan cendawan atau parasitoid dan predator (Wartono, 1967) (Salbiah & Rumi'an, 2014).

7.4.1 Patogenesis Entomopatogen

Kebanyakan patogen perlu berinteraksi dengan inangnya, masuk ke dalam tubuh inang, reproduksi di dalam satu atau lebih jaringan inang, dan menghasilkan propagul untuk berinteraksi dan menginfeksi inang baru untuk menyelesaikan siklus hidupnya. Semua proses ini terjadi dalam biologi patogen, termasuk kontak dengan inang, penetrasi ke dalam tubuh inang, reproduksi, keluar

dari inang, dan menyebar dan tetap ada di lingkungan(Pinaria, 2023).

1. Kontak Inang

Kebanyakan patogen arthropoda tidak memiliki stadia mobile, sehingga kontak dengan inang tidak terjadi melalui proses mencari aktif; sebaliknya, mereka menyebar secara pasif pada beberapa stadia patogen, seperti spora cendawan, melalui angin, hujan, atau serangga. *Pattern spatial* dari propagul patogen relatif pada distribusi spatial inang dan survival propagul patogen dengan waktu menentukan jumlah kontak di antara populasi patogen dan inangnya. Tubuh oklusi virus *nuclear polyhedrosis* dari *Lymantria dispar* akan menyebar ketika inang robek. Pada awalnya, tubuh oklusi virus terkonsentrasi di dekat tempat inang mati, tetapi hujan dapat menyebarkannya ke daun. Patogen pada sistim pertanian dapat menyebar melalui irigasi. Konidia cendawan, yang dibuat pada inang yang mati, dapat didistribusikan kembali melalui angin. Beberapa patogen ditransmisikan dari inang *mother to offspring* (induk ke keturunan). Transmisi vertikal terjadi ketika propagul berbagai jenis patogen berinteraksi dengan inang secara kebetulan dan dimediasi oleh proses abiotik. Beberapa patogen, seperti nematoda dan cendawan, memiliki kemampuan menuju inangnya. Beberapa nematoda bergerak melalui air di antara partikel tanah dan menggunakan rangsangan kimia seperti CO₂ dan feses inangnya untuk mendirikan koloni di sekitar inangnya (Ishibasi & Kondo, 1990)(Pinaria, 2023)(Suwandi, 2009)

2. Penetrasi Inang

Setelah propagul patogen berinteraksi dengan tubuh inang, tubuh inang perlu dipenetrasi untuk mencapai jaringan yang peka. Setelah tertelan, sebagian besar bakteri, virus, dan protozoa dapat masuk ke dalam tubuh arthropoda melalui dinding tipis dari midgut. Untuk artropoda dengan alat mulut pengunyah (*chewing type*) dan untuk serangga dengan alat mulut pengisap (*sucking type*), tertelan makanan yang terkontaminasi patogen adalah mekanisme penting. Cendawan masuk ke tubuh inang langsung melalui kutikula. Hifa

melakukan penetrasi karena mereka menghasilkan enzim yang dapat menghancurkan kutikula serangga(Suwandi, 2009) (Suniti, 2016).

3. Reproduksi dalam jaringan inang

Setelah patogen masuk ke dalam tubuh inang, kemudian berkembang biak pada satu atau lebih jaringan. Beberapa patogen reproduksi terjadi pada jaringan tertentu, seperti *Oryctes nonoccluded*, yang memiliki tubuh lemak dan epithelium midgut (Suniti, 2016). Namun, yang lain umumnya reproduksi pada semua jaringan inang. Selain itu, jaringan ini akan mempengaruhi jumlah propagul patogen yang diproduksi per berat inang. Ini karena patogen yang menyebabkan infeksi sistemik pada semua jaringan lebih menguntungkan daripada hanya melakukan reproduksi pada jaringan tertentu(Sutarman, 2017).

4. Penyebaran dan persistensi propagul patogen di lingkungan

Setelah propagul patogen keluar, proses selanjutnya adalah penyebaran dan persistensi paropagul di alam. Patogen sangat memerlukan adaptasi untuk menyebar dan bertahan di alam karena keberlanjutan populasi patogen di alam bergantung pada kontak dengan inang baru(Suwandi, 2009). Propagul patogen menyebar melalui hujan dan angin. Koloni inang yang besar dapat menyebarkan patogen ke inang baru. Serangga yang sering muncul, seperti kutu kebul, aphid, dan lepidoptera, sangat penting untuk menyebarkan penyakit. Beberapa cendawan, bakteri, dan protozoa kadang-kadang memiliki populasi inang yang rendah dan lingkungan yang tidak menguntungkan. Saat itu, patogen dapat berinteraksi dengan inang sampai kondisi lingkungan menjadi lebih baik (Anonim, 2006)(Sutarman, 2017).

Transmisi verikal terjadi pada tingkat populasi, di mana patogen ditransfer dari induk ke progeninya. Transovarial dan transovum adalah dua jenis transmisi vertikal patogen. Dalam jenis transovarial, patogen telah berada di telur saat diletakkan karena invasi patogen selama perkembangan telur pada induknya. Dalam kasus nonoccluded virus dan mikrosporidia,

transmisi ini sering terjadi. Ini terjadi ketika embrio bersentuhan dengan lingkungan yang tercemar selama proses oviposisi induknya (Anonim, 2006)(Sutarman, 2017).



Gambar 7.5. Serangga terpapar entomopathogen

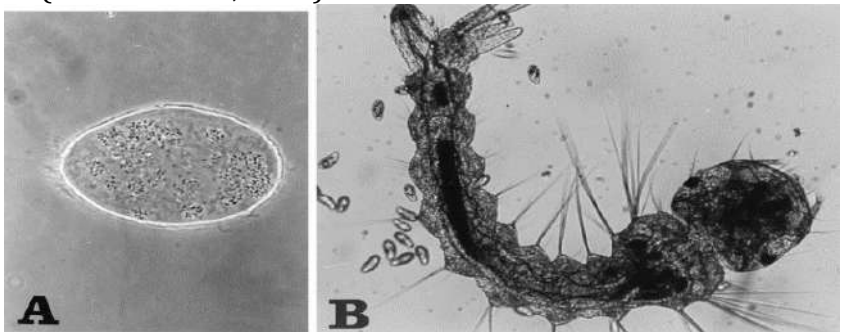
Sumber: <https://cashew.icar.gov.in/beneficialinsect/pathogens/>

7.5 Bakteri

Bakteri adalah organisme uniseluler yang tidak memiliki nukleus tetapi memiliki dinding sel yang kaku dan biasanya berukuran antara 1 dan 5 mikrometer. Bakteri patogen serangga dapat dibagi menjadi dua kategori: bakteri yang tidak membuat spora dan bakteri yang membuat spora (Luqman et al., 2021). Namun, kebanyakan bakteri yang diisolasi dari serangga sakit adalah bakteri yang tidak membuat spora, seperti genera *Bacillus*. Bakteri yang membuat spora sangat penting untuk pengendalian (Salaki & Sembiring, 2009)(Asrianto, 2022). Bakteri ini pada dasarnya terdiri dari tiga genera: *Bacillus aerobik*, *Paenibacillus aerobik*, dan *Clostridium anaerobik*. Isolat *Bacillus* pertama kali ditemukan dengan subspecies *Bacillus* yang membunuh ulat (larva *Lepidoptera*). Var *kurstaki* (*Btk*). Pada tahun 1976, subspecies *Diptera* yang aktif, *Bacillus*, ditemukan. *Bacillus Israelensis* (*Bti*)

menginfeksi larva nyamuk di Israel, dan sekarang dijual untuk membunuh nyamuk (Haiqal et al., 2020).

Bacillus thuringiensis pertama kali dikenal untuk menginfeksi ulat sutera pada tahun 1901 dan *Anagasta kuehniella*, ulat serangga hama gudang, pada tahun 1911. Bt adalah spesies yang kompleks yang memiliki banyak subspecies menurut uji serologi. Dalam sporangium, bakteri ini membentuk tubuh parasporal dan spora. Setiap subspecies *Bacillus* memiliki δ -endotoksin yang berbeda yang dapat menginfeksi serangga, dan tubuh parasporal mengandung satu atau lebih protoksin protein dalam struktur kristal protein yang disebut kristal protein. Ketika serangga yang rentan menelan *Bacillus*, kristal protein akan terlarut dalam saluran pencernaan yang basa, menghasilkan protoksin. Enzim proteolitik akan membuat protoksin ini aktif. Beberapa molekul toksin akan melekat pada dinding gut, menyebabkan lubang atau pores. Pada akhirnya, sel-sel gut akan membengkak dan beberapa akan meletus, memungkinkan bakteri untuk menginvasi haemocol serangga. Bakteri ini akan memperbanyak diri dan membunuh serangga yang rentan dalam 1-2 hari (Anonim, 2006)(Asrianto, 2022)(Haiqal et al., 2020). Setelah terinfeksi oleh *Bacillus*, larva akan mengalami perubahan dalam perilaku dan bentuknya. Setelah menelan Bt selama beberapa jam, larva akan berhenti makan dan bergerak, kemudian menunjukkan gejala yang berbeda seperti diare, menjadi agak gelap, dan akhirnya mati(Calamari et al., 1999).



Gambar 7.6. *B.thuringiensis* subsp. spora israelensis dalam vakuola makanan *T. pyriformis* (A) dan larva *Aedes aegypti* instar kedua (B).

Sumber. (Manasherob et al., 1998)

7.6 Nematoda Entomopatogen

Menurut Adam dan Nguyen (2002), nematoda entomopatogenik (NEP) adalah agen pengendali hayati dalam famili Steinernematidae dan Heterorhabditidae. Bakteri yang dibawa ke dalam saluran pencernaannya membunuh serangga. (Boemare, 2002). Sampai saat ini, telah ditemukan 43 spesies NEP dari tiga genera dan dua famili, termasuk 33 spesies dari genus *Steinernema*, satu spesies dari genus *Neosteinerema*, dan sembilan spesies dari genus *Heterorhabditidae* (Koppenhofer & Fuzi, 2003).

Larva *Galleria mellonella greater wax moth* dapat digunakan untuk mengisolasi NEP ini (Peters, 1996)(Qodiriyah et al., 2015)(Rusniarsyah et al., 2015). Untuk bereproduksi, *Steinernema* jantan dan betina harus masuk ke dalam tubuh serangga inang, sedangkan *Heterorhabditis* hanya memerlukan satu individu untuk menginfeksi serangga inang (Afifah et al., 2013). Bakteri berkembang biak dengan cepat dalam tubuh serangga inang yang telah mati dan menggunakannya sebagai nutrisi; pada dasarnya, nematoda memakan bakteri tersebut. Nematoda akan berkembang pada inangnya yang sama dari generasi ke generasi sampai populasi mereka menjadi padat dan pasokan nutrisinya menjadi rendah. Setelah itu, nematoda muda akan keluar dari serangga inangnya untuk mencari serangga inang baru (Sarmah, 2022).

7.7 Virus Entomopatogenik

Semua virus adalah parasit interseluler obligat karena merupakan organisme non-seluler yang mengandung DNA atau RNA. Setelah memperbanyak genom DNA atau RNA dalam sel inangnya dalam bentuk partikel yang disebut virion, virus dapat menginfeksi inang baru. Karena ukurannya yang sangat kecil hingga sangat besar, struktur genom, morfologi pembungkus virus, dan komposisi asam nukleat virus dapat diamati dengan mikroskop cahaya. Morfologi virus harus diperiksa menggunakan teknik biologi molekuler dan mikroskop elektron. Virion berukuran 470 nanometer. Virus DNA atau RNA dengan kapsul protein disebut virion. Nama virus tidak digunakan dalam bahasa Latin (Asrianto, 2022)..

Virus diklasifikasikan ke dalam famili, dan setiap virus diberi nama berdasarkan waktu pertama kali muncul pada serangga inang. Contoh nama virus adalah *Spodoptera litura* NPV dan *Helicoverpa armigera* NPV. Virus terdiri dari asam nukleat dan protein yang disebut kapsid serta lapisan lipid yang disebut virion. Beberapa virus tersimpan dalam matrik protein yang disebut "tubuh tertutup". Tiga famili virus mengandung matrik ini. Virus serangga dapat terbungkus atau tidak terbungkus dalam matriks protein, double atau single stranded RNA (dsRNA dan ssRNA), atau double atau single stranded DNA (dsDNA dan ssDNA) (Asrianto, 2022)(Priastomo et al., 2021).

Semua kelompok virus yang menyerang serangga memiliki cara yang berbeda untuk beradaptasi dan bertahan hidup. Baculoviridae, Poxviridae, dan Reoviridae mengoklusi tubuh untuk mencegah virus atau partikel virion masuk. Tubuh oklusi memiliki kemampuan untuk bertahan dalam kondisi yang tidak menguntungkan. Tubuh oklusi dari tiga famili ini memiliki matrik protein yang mengandung satu atau lebih virion. Virion yang tidak terlindungi rentan dan mati cepat karena desikasi dan sinar matahari, tetapi matrik protein melindungi virion dari lingkungan sebelum menginfeksi inang, meningkatkan kelangsungan hidup virus. Tubuh oklusi memiliki bentuk dan ukuran yang berbeda. Banyak virion Baculoviridae ditemukan dalam berbagai bentuk tubuh oklusi NPV (0.5–15 μm). kapsul granulosis virus (GVs) yang memiliki satu virion per tubuh oklusion (Ishak, 2018) (Asri, 2013)(Priastomo et al., 2021).

1. Baculovirus

Nuclear polyhedrosis virus (NPV) dan granulosis virus (GV) dari famili Baculoviridae dsDNA dengan nukleokapsid berbentuk batang. Polyhedra (NPV) atau granula (GV) yang tertutup dalam tubuh protein adalah partikel virus infeksius atau virion. Polyhedra NPV lebih besar daripada virion (1-15 μm) dan memiliki beberapa virion. Ketika serangga inang yang peka menelan granule atau polyhedra, mereka akan terinfeksi baculovirus dan kemudian terlarut dalam isi saluran pencernaan. Ketika polyhedra pecah, virion dikeluarkan. Virion akan masuk ke sel-sel midgut seperti sel lemak, epidermis, dan

darah. Karena infeksi pada epidermis, jaringan tubuh inang menjadi cair, dan infeksi baculovirus menyebabkan tubuh inang meleleh, melepaskan partikel virus di alam. Famili Baculoviridae sangat penting untuk program pengendalian hayati, oleh karena itu penyelidikan intensif dilakukan mengenai patogenitas dan host baculoviridae tertentu. Lepidoptera dan larva nyamuk adalah musuh umum dari famili ini (Samsudin, 2017) (Yayi Munara Kusumah et al., 2017).

2. Nuclear Polyhedrosis Viruses

NPV menginfeksi banyak spesies serangga, salah satunya dari ordo Lepidoptera adalah inang NPV yang penting. Partikel virus atau virion ini dapat dibungkus oleh satu SNPV atau banyak MNPV. Polyhedra NPV memiliki beberapa hingga banyak virion. Setelah inang menyerapnya, itu akan bereproduksi di dalam sel midgut atau jaringan/organ serangga. Virion paling sering menyerang sel darah, epidermis, dan tubuh lemak. Serangga yang terinfeksi biasanya mati lima hingga dua belas hari setelah infeksi, tergantung pada dosis virus, suhu, dan stadia larva instar saat infeksi terjadi. Serangan cendawan dan perilaku serangga saat terkena NPV mirip. (Lesmana et al., 2016) (Yayi Munara Kusumah et al., 2017).

Pada umumnya serangga yang akan mati akan naik ke atas bagian tanaman/pucuk di mana mereka mati, dan jutaan polyhedra yang terkandung dalam cairan tubuh serangga yang telah pecah akan jatuh ke bawah ke area makan, yang terdiri dari sisa-sisa daun dan daun, di mana ulat sehat yang lain dapat memakannya. Salah satu hama paling berbahaya yang menyerang tanaman palawija dan sayurandi di Indonesia adalah alat grayak *Spodoptera litura* dan *S. exigua*. Hama ini sering menyebabkan daun dan buah sayuran menjadi sobek, terpotong, dan berlubang, sehingga mengurangi produktivitas atau bahkan menggagalkan panen. Semua daun dan buah tanaman akan habis jika tidak segera diatasi (Irsan, 2015).

Petani biasanya menggunakan insektisida kimia yang intensif dengan dosis dan frekuensi tinggi untuk mengendalikan hama ini. Dampak negatif seperti gejala resistensi, pemulihan hama, pembunuhan musuh alami, peningkatan residu pada hasil,

pencemaran lingkungan, dan masalah kesehatan pengguna muncul sebagai hasilnya. Untuk mengurangi penggunaan pestisida di pertanian, ada kebutuhan untuk metode pengendalian lain yang aman dan ramah lingkungan, seperti memanfaatkan musuh alami. Nucleopolyhedrovirus (NPV), agensi hayati ulat grayak, adalah salah satu agen hayati yang berperan penting sebagai pengendali hama secara alamiah. Salah satu sifat yang menguntungkan dari virus ini adalah sebagai berikut: 1) Memiliki inang spesifik dalam genus atau famili yang sama, sehingga aman terhadap hewan bukan sasaran; 2) Tidak berdampak pada parasitoid, predator, atau serangga berguna lainnya; 3) Dapat mengatasi resistensi ulat grayak terhadap insektisida kimia; dan 4) Berfungsi dengan insektisida kimia yang tidak bersifat basa kuat.

DAFTAR PUSTAKA

- Afifah, L., Rahardjo, B. T., & Tarno, H. (2013). Eksplorasi Nematoda Entomopatogen pada Lahan Tanaman Jagung, Kedelai, dan Kubis di Malang serta Virulensinya terhadap *Spodoptera litura* Fabricius. *Jurnal HPT*, 1(2), 1–9.
- Asri, M. T. (2013). Imunohistokimia Jaringan Larva *Spodoptera Litura* Yang Terinfeksi *Spodoptera Litura* Multiple Nuclear Polyhedrosis Virus (Splt Mnpv) In Vitro Dalam Formula Foto- Protektan.
- Asrianto. (2022). Mikrobiologi. In *Researchgate.Net*. Amerta Media. https://www.researchgate.net/profile/Adrian-Wijanarko/publication/352471771Branding_Konsep_dan_Studi_Merek_Lokal/links/60caa9ae299bf1cd71d53502/Branding-Konsep-dan-Studi-Merek-Lokal.pdf
- Calamari, D., Cummins, C., Gratz, N., Klier, A., Luthy, P., Scanlan, C. M., Cibulsky, R. J., Cozzi, E., Ronchin, M., Maroni, M., & Plestina, R. (1999). Microbial pest control agent: *Bacillus thuringiensis*. *Environmental Health Criteria*, 217.
- Dawarblandong, D. P., Febryanti, A., & Bere, C. (2019). *Laporan Pkl Agnes Febryanti Castanheira Bere*.
- Evie Ratnasari ., A. W., & . Winarsih, M. K. (2015). Pemanfaatan B Io I Nsekt I S I Da Mikroba Dan Nabat I Dalamformula Foto - Protektan Yang Efekt I F Untuk Mengendal Ikan Hama Kedela I Dan Aman Bag I Agroekos I Stem Oleh: *Jurusan Biologi Fakultas Matematika Dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Negeri Surabaya November 2015, November*.
- Haiqal, M. I., Badiri, I., Isfanda, & Riverson S, M. (2020). Efektifitas *Bacillus thuringiensis israelensis* (Bti) Sebagai Parasitoid Larva *Aedes aegypti*. *Prosiding Seminar Nasional Biotik*, 8(1), 355–357.
- Hariyanto, S. (2015). Pengaruh Pemberian Beberapa Pestisida Nabati Terhadap Hasil Tanaman Padi (*Oryza sativa* L .) Varietas Inpara 3 dengan Metode SRI (The System of Rice Intensification) (The effect of using some herbal pesticides on the rice (*Oryza sativa* L .) production. *Seminar Nasional*

LPPM Universitas Jambi, 369–376.

- Hilda, L., & Syafiruddin. (2023). Pertanian Berkelanjutan Abstrak memberi rasa pedas pada makanan , juga memberi istilah Organisme Penganggu Tanaman (OPT). dengan menggunakan bahan kimia , yang dihasilkan , yaitu adanya residu atau sisa pestisida yang tidak disukai oleh OPT , sebagai co. *Jurnal Pengabdian Masyarakat*, 2(3), 22–34. <https://doi.org/10.1234/jurnal>
- IRFAN, M. (2016). Uji Pestisida Nabati Terhadap Hama Dan Penyakit Tanaman. *Jurnal Agroteknologi*, 6(2), 39. <https://doi.org/10.24014/ja.v6i2.2239>
- Irsan, C. (2015). *Pengendalian Hayati Hama Tumbuhan Siti Herlinda Chandra Irsan*.
- Ishak, H. (2018). Pengendalian Vektor. In *Universitas Hasanuddin* (Issue 03041065).
- Kasi, P. D. (2012). Pemanfaatan Ekstrak Daun Jeruk Nipis (Citrus Aurantifolia) sebagai Insektisida Nabati terhadap Hama Walang Sangit (Leptocorisa Oratorius) pada Tanaman Padi. *Jurnal Dinamika*, 03 (1)(1), 12–18.
- Kuswardani, R. A., & Maimunah. (2013). Hama Tanaman Pertanian. *Universitas Medan Area*, 71.
- Lesmana, E., Syofia, I., & Lubis, E. (2016). *Polyhedrosis Bioinsektisida Nuclear Test Virus To Some Sugar Cane Crop Pest in Laboratory Uji Bioinsektisida Nuclear Polyhedrosis Virus Terhadap*. 20(2), 119–123.
- Luqman, A., Alami, N., Dama, B., Ashari, B., & Danilyan, E. (2021). Bakteriologi Spesies Kosmopolit. *Departemen Biologi Institut Teknologi Sepuluh Nopember, September*, 26. <https://www.researchgate.net/publication/354492714>
- Manasherob, R., Ben-Dov, E., Zaritsky, A., & Barak, Z. (1998). Germination, growth, and sporulation of *Bacillus thuringiensis* subsp. *israelensis* in Excreted food vacuoles of the protozoan *Tetrahymena pyriformis*. *Applied and Environmental Microbiology*, 64(5), 1750–1758. <https://doi.org/10.1128/aem.64.5.1750-1758.1998>
- Nugroho, A. (2009). *Ekologi Mikroba*. 01, 31–33.
- Pinaria, A. (2023). *Jamur Patogen Tanaman*. Unsrat Press.

- Priastomo, Y., Qurrota, A., Lestari, W., Rini, I. A., Kasasiah, A., Hutabarat, M., Argaheni, N. B., Yayasan, P., & Menulis, K. (2021). *FullBook-Virologi*. https://repository.uia.ac.id/wp-content/uploads/2022/10/FullBook-Virologi-_compressed.pdf
- Qodiriyah, Sulistyanto, D., & Purwatiningsih. (2015). Agens Pengendali Hayati Nematoda Entomopatogen *Heterorhabditis* sp. dan *Steinernema* sp. Sebagai Pengendali Hama Rayap Tanah *Coptotermes* sp. DAN *Microtermes* sp. di Kabupaten Lumajang. *Jurnal Ilmu Dasar*, 16(1), 43–48.
- Rahmawati, L. (2020). Analisa Komparatif Usaha Tani Padi Yang Menggunakan Pestisida Nabati Dan Pestisida Kimia (Studi Kasus Di Kelompok Tani Tirtodimulyo Iii Desa Klampokan Kecamatan Panji Kabupaten Situbondo). *Agribios*, 18(2), 94. <https://doi.org/10.36841/agribios.v18i2.895>
- Rusniarsyah, L., Rauf, A., & Balai Penelitian Tanaman Rempah dan Aneka Tanaman Industri, S. (2015). Patogenisitas Dan Keefektifan Nematoda Entomopatogen *Heterorhabditis* sp. Terhadap Penggerek Umbi Kentang *Phthorimaea operculella* (Zeller) (Lepidoptera: Gelechiidae) Pathogenicity and Effectiveness of Entomopathogen Nematode *Heterorhabditis* sp. to Potato T. *Jurnal Silvikultur Tropika*, 06(1), 66–70.
- Salaki, C., & Sembiring, L. (2009). Prospek Pemanfaatan Bakteri Entomopatogenik Sebagai Agensia Pengendali Hayati Serangga Hama. *Prosiding Seminar Nasional Penelitian, Pendidikan Dan Penerapan MIPA*, 21–27.
- Salbiah, D., & Rumi'an. (2014). Cendawan Entomopatogen *Beauveria bassiana* Vuillemin Lokal sebagai Agen Pengendali Hayati Walang Sangit (*Leptocoris oratorius* Fabricius) pada Tanaman Padi Sawah. In *Seminar Nasional BKS PTN Barat* (pp. 703–709).
- Samsudin, S. (2017). Prospek Pengembangan Bioinsektisida *Nucleopolyhedrovirus* (NPV) Untuk Pengendalian / Prospect of Development of *Nucleopolyhedrovirus* (NPV) Bioinsecticide Against. *Perspektif*, 15(1), 18. <https://doi.org/10.21082/psp.v15n1.2016.18-30>
- Sarmah, S. (2022). Komunitas Nematoda pada Lahan Pertanian

- Wortel dan Hubungannya Dengan Populasi Mikrob Tanah. *Jurnal Tanah Dan Iklim*, 46(1), 91–102. <https://epublikasi.pertanian.go.id/berkala/jti/article/view/3289%0Ahttps://epublikasi.pertanian.go.id/berkala/jti/article/download/3289/3327>
- Suada, I. K. (2017). Mikroba Potensial dalam Pengendalian Biologi Patogen Mikroba Potensial dalam Pengendalian Biologi Patogen. In *Mengenal Mikroba Sahabat Petani*.
- Suniti, N. W. (2016). Buku Ajar Epidemiologi Penyakit Tumbuhan. *Fakultas Pertanian, Universitas Udayana*, 3(April), 49–58.
- Sutarman. (2017). Dasar-Dasar Ilmu Penyakit Tanaman. *Umsida Press*, 115. <http://eprints.umsida.ac.id/4208/1/Buku-Dasar-Dasar-Ilmu-Penyakit-Tanaman.pdf>
- Suwandi, M. (2009). *Pengendalian Hayati Patogen Tanaman*. 1. [https://repository.unsri.ac.id/89878/1/Pengendalian Hayati A Muslim n Suwandi 2023.pdf](https://repository.unsri.ac.id/89878/1/Pengendalian-Hayati-A-Muslim-n-Suwandi-2023.pdf)
- Utama, W. T., Dewi, R., Sari, P., & Indriyani, R. (2021). Mewujudkan Petani yang Ramah Lingkungan Di Desa Kibang, Kecamatan Metro Kibang, Kabupaten Lampung Timur. *Jurnal Pengabdian Kepada Masyarakat*, 2(1), 89–95.
- Wartono, N. dan S. (1967). Seleksi Jamur Patogen Serangga *Beauveria* spp. Serta Uji Pa- Togenisitasnya Pada Serangga Inang-Walang (*Leptocorisa acuta*) [Selection of Entomopathogenic Fungi *Beauveria* spp. and their Pathogenicity Test Against Insect Host-Rice Stink Bug (*Leptocorisa acu*). *Angewandte Chemie International Edition*, 6(11), 951–952., 5–24.
- Wulandari, E., Liza, A. K., & Ridwan, M. (2019). Pestisida Nabati Pembasmi Hama Ramah Lingkungan Untuk Petani Tebuwung. *Jurnal Abdikarya : Jurnal Karya Pengabdian Dosen Dan Mahasiswa*, 03(04), 352–357.
- Yayi Munara Kusumah, R., Revi, L., & Kurniawati, F. (2017). Characterize molecular the Nucleopolyhedrovirus (NPV) *Hyposidra talaca* Wlk. of tea plantation at Gunung Mas Bogor. *Journal of Tropical Plant Pests and Diseases*, 17(2), 147–155. <https://doi.org/10.23960/j.hptt.217147-155>
- Yoga, D. G. A. P., Dewi, N. K. S. L., & Suriasih, N. K. (2023).

Meminimalisir Penggunaan Pestisida Kimia Untuk Mencegah Kerusakan Ekosistem. *Prosiding Pekan Ilmiah Pelajar (PILAR)*, 3, 185–191.

BAB 8

RHIZOBIA PENDUKUNG PERTANIAN BERKELANJUTAN

Oleh I Wayan Suanda

8.1 Pendahuluan

Bertambahnya populasi penduduk di dunia setiap tahun menjadi tantangan berat bagi petani untuk memproduksi pangan. Keseimbangan antara populasi penduduk dengan ketersediaan pangan di dunia semakin jauh ketimpangannya, menyebabkan muncul kelaparan di beberapa negara yang berakibat buruk terhadap gizi, pertumbuhan dan kecerdasan manusia. Pangan merupakan kebutuhan paling dasar dan menjadi hak asasi setiap individu yang apabila kondisi pangan berkurang maka akan berdampak pada instabilitas sosial, ekonomi, dan politik (Wijaya *et al.*, 2022). Untuk memperkecil bahkan meniadakan dampak buruk ini dapat dilakukan salah satunya kegiatan pertanian berkelanjutan yang ramah lingkungan. Menurut beberapa peneliti bahwa faktor dominan penyebab rendahnya produktivitas tanaman bahan pangan, yaitu: (a) masih rendahnya teknologi budidaya; (b) penurunan secara progresive tingkat kesuburan lahan (c) belum optimalnya eksplorasi potensi genetik tanaman. Faktor-faktor pemicu penyebab dua faktor dominan pertama tersebut di atas adalah tingginya ketergantungan terhadap faktor eksternal produksi (pupuk dan pestisida) dan rendahnya tingkat inovasi teknologi yang diterapkan petani. Nilai manfaat yang bisa digali dalam pengelolaan sumber daya hayati ini bisa dijadikan sebagai sumber peningkatan produksi pangan untuk memenuhi kebutuhan penduduk yang populasinya terus meningkat. Untuk mengatasi hal tersebut dapat diupayakan dengan mengembangkan model pertanian dengan memanfaatkan bioteknologi berbasis mikroorganisme (mikroba) yang berasal dari sumber-sumber kekayaan hayati. Kekayaan hayati selain berupa flora dan fauna juga ada dari mikroorganisme

(mikroba) yang berdomisili di tanah dekat berakaran tumbuhan yang disebut: rhizobia. Mikroorganisme yang terdapat pada rizosfer tumbuhan/tanaman sebagian besar diketahui memiliki peran penting dalam pertanian berkelanjutan karena potensinya sebagai agensia pengendali hayati dan pemacu pertumbuhan tanaman. Disini perlu dijelaskan antara tumbuhan dan tanaman, dimana tumbuhan itu tumbuh dan hidup secara liar sedangkan tanaman ada campur tangan manusia dalam bentuk budidaya.

Pertanian berkelanjutan (*Sustainable agriculture*) dan lingkungan turut berperan penting dalam penambatan (fiksasi) nitrogen. Umumnya, tanaman mengasimilasi nitrogen hanya dari tanah melalui penambahan pupuk, baik dari pupuk anorganik maupun pupuk organik. Pupuk organik sebagai sumber alternatif dapat dari Rhizobia yang mampu menyebabkan pembentukan nodul pada akar tanaman legum sebagai tanaman inang. Rhizobia berhadapan dengan bermacam-macam kondisi lingkungan seperti bakteri yang hidup bebas dalam tanah, selama proses infeksi dan seperti diferensiasi bakteroid dalam sel tanaman. Organ tanaman khusus diserang oleh bakteri yang memfiksasi nitrogen dalam keadaan bakteroid endosimbiotik dalam sel tanaman. Proses ini melibatkan pengenalan spesifik dan diferensiasi berkembang baik bakteri dan sel tanaman inang. Pada rizosfer sering ditemukan kelompok bakteri rizobakteri yang berpotensi dalam meningkatkan ketahanan tanaman dan mampu menekan serangan penyakit tanaman dengan sidiofore dan antibiotik yang dihasilkan berperan sebagai pupuk biologis dan stimulan biologis. Selain itu rizobakteri juga memproduksi hormon tumbuh tanaman, seperti: *Indol Acetic Acid* (IAA), giberilin, sitokinin, etilen dan melarutkan mineral. Kelompok rizobakteri yang mampu memacu pertumbuhan tanaman ini sering disebut *Plant Growth Promoting Rizobacteria* (PGPR). PGPR mengandung formulasi beberapa bakteri, yaitu: *Pseudomonas*, *Azotobacter*, *Azospirillum*, *Acetobacter* dan *Bacillus* (Ristiana *et al.*, 2022). Bakteri yang didapat dari rizosfer ini melalui sekresi berbagai molekul pengatur serta terlibat dalam mendorong pertumbuhan dan perkembangan tanaman dan memiliki nilai penting dalam pertanian berkelanjutan. Pertanian merupakan salah satu komponen dan tujuan dalam mencapai *Sustainable*

Development Goals (SDGs) (Mucharam *et al.*, 2022; Sjaf *et al.*, 2021; Arifin *et al.*, 2012). Pada sistem pertanian, terdapat tiga prinsip keberlanjutan pertanian terkait bioenergi dan bioindustri yang meliputi: *self financing* atau pembiayaan sendiri, penerapan teknologi skala kecil, usaha yang layak teknis dan ekonomis (Elizabeth, 2021; Kaswanto, 2017). Dalam pertanian berkelanjutan pemanfaatan PGPR sedang dikembangkan karena sidiofor dan antibiotik yang dihasilkan menjadi keunggulan yang dimiliki dan cenderung berkembang memperluas zonasinya dalam kondisi yang sesuai bagi kehidupannya, namun tidak merusak lingkungan. Perluasan zonasi PGPR dan mikroba yang menguntungkan bagi tanaman ini menjadikan lahan pertanian sehat berkembang terus sebagai bentuk keberlanjutan.

8.2 Rhizobia

Ketersediaan nitrogen (N_2) yang melimpah pada tumbuhan legum atau leguminocea (polong-polongan) karena adanya bakteri. Bakteri penambat nitrogen (N_2) yang terdapat didalam akar leguminocea atau jenis kacang-kacangan, yaitu bakteri rhizobium. Kombinasi inokulasi rhizobium dan pupuk fosfat berpengaruh terhadap tanaman dari jenis kacang-kacangan, seperti: kedelai, kacang tanah, kacang hijau dan kacang panjang serta jenis lainnya. Penambahan pupuk fosfat dan rhizobium meningkatkan volume akar tanaman dikarenakan nodul akar atau bintil akar dibentuk oleh bakteri rhizobium pada akar tanaman. Sedangkan, unsur yang dapat merangsang pertumbuhan akar adalah unsur P (phosfor) yang berfungsi sebagai tempat bintil akar (Nasir *et al.*, 2023). Perlakuan pupuk fosfat dan inokulasi rhizobia pada kedelai berperan sangat nyata dalam meningkatkan nodulasi, pembentukan dan perkembangan polong, serta hasil (Akpalu *et al.*, 2014). Selain itu, beberapa penelitian melaporkan bahwa fiksasi nitrogen (N_2) yang optimal dan memaksimalkan produktivitas kedelai, perlu aplikasi pupuk fosfat untuk meningkatkan kesuburan tanah dengan rhizobia yang sesuai.

Rizobium merupakan bakteri yang dapat dijumpai pada akar tanaman famili leguminocea dengan membentuk bintil pada akar dari jenis kacang-kacangan (polong-polongan). Pada tumbuhan liar

yang termasuk keluarga polong-polongan, seperti: putri malu (*Mimosa pudica*) pada akarnya juga ditemukan adanya bintil akar (*nodul*). Namun belum banyak dilaporkan kesesuaian bakteri yang ditemukan pada tumbuhan putri malu dengan bakteri pada akar jenis tanaman polong-polongan. Bintil akar (*nodul*) sebagai organ untuk melakukan simbiosis yang aktif dalam melakukan fiksasi N_2 (nitrogen) dari udara. Hasil penelitian Astija *et al.* (2022) bahwa bintil-bintil pada akar efektif dalam menunjang pertumbuhan tanaman. Bentuk bakteri (rhizobia) dalam sel akar yang mengandung nodul aktif, yaitu bila dibelah melintang akan terlihat warna merah muda hingga kecoklatan dibagian tengahnya yang disebut bakteroid. Kemampuan rizobium dalam menambat nitrogen (N_2) dari udara dipengaruhi oleh besarnya bintil akar dan jumlah bintil akar. Rizobium hanya dapat memfiksasi N_2 bebas bila berada di dalam bintil akar tanaman leguminocea. Peranan rizobium terhadap pertumbuhan tanaman khususnya berkaitan dengan ketersediaan N_2 bagi tanaman inangnya (Sari & Prayudyaningsih, 2015). Selain Rizobium terdapat bakteri simbiotik lain yang mampu memfiksasi N_2 , diantaranya: *Bradhyrhizobium*, *Mesorhizobium*, *Sinorhizobium*, dan *Frankia* (Shailendra-Singh, 2015). Kelompok bakteri rizobium bersimbiosis dengan tanaman leguminocea kemudian menginfeksi akar tanaman untuk membentuk bintil akar di dalamnya, sebagai proses yang harus dilalui agar bisa memfiksasi N_2 (nitrogen) atmosfer (Gambar 8.1). Bintil akar ini merupakan organ simbiosis yang aktif dalam melakukan fiksasi N_2 dari udara.



Gambar 8.1. Bintil (Nodul) pada Akar Kacang Tanah yang dibentuk Rhizobium

(Sumber: I Wayan Suanda, 2023)

Rizobakteri telah diaplikasikan pada berbagai jenis tanaman karena dapat meningkatkan pertumbuhan, daya kecambah benih di lapangan dan meningkatkan produksi tanaman. Salah satu faktor yang memengaruhi keberhasilan aplikasi agensia hayati ini adalah kelangsungan hidup bakteri rizosfer dan kemampuannya dalam bersaing dengan mikroorganisme lain di lapangan (Abd-Elgawad & Askary, 2020). *Streptomyces* sebagai endofit bagi tanaman melakukan biosintesis untuk proses pelarutan fosfat anorganik bagi tanaman, pembentukan senyawa pengkhelat unsur hara, pembentukan fitohormon serta menjaga tanaman dari cekaman abiotik. *Streptomyces* dalam produksi senyawa bermanfaat, seperti: Indole-3-acetic acid (IAA) untuk memacu pertumbuhan akar tanaman dan senyawa siderofor untuk memacu penyerapan nutrisi di dalam tanah (Suryaminarsih *et al.*, 2019). Aplikasi mikroorganisme *Trichoderma* sp. secara langsung pada tanah disekitar tanaman juga dapat dilakukan dan tetap berdampak positif bagi tanaman (Yogaswara *et al.*, 2020). Pemberian mikroorganisme sejenis *Trichoderma* sp. secara langsung memiliki keuntungan dalam jangka panjang karena *Trichoderma* sp. akan bersimbiosis dengan tanaman sehingga berpotensi menghasilkan metabolit sekunder secara kontinyu.

8.3 Rizosfer

Rizosfer merupakan tanah yang terdapat disekitar perakaran tumbuhan yang banyak dihuni oleh mikroorganisme (mikroba), yaitu bakteri dan jamur terutama yang bersifat *soil borne*. Rizosfer berupa lapisan tanah yang menyelimuti permukaan akar tumbuhan sebagai tempat berkumpulnya mikroflora tanah yang aktivitasnya dipengaruhi aktivitas akar, permukaan akar dinamakan rhizoplane (rizoplan). Lapisan tanah sekitar 1-5 mm yang berada di akar tanaman langsung dipengaruhi sekresi akar secara biokimia dinamakan rizosfer (Hatman & Tringe, 2019). Lingkungan rizosfer ditentukan oleh faktor tritunggal yang berinteraksi dari tanah, tanaman dan organisme yang bertalian dengan perakaran. Kolonisasi tegakan tanaman secara alami dikendalikan oleh struktur komposisi mikroba di rizosfer (Widyati, 2013). Luas zona rizosfer sangat dipengaruhi aktivitas perakaran tumbuhan yang berasosiasi

dengan mikroorganisme, umumnya populasi sel bakteri sekitar 10^6 - 10^9 tiap gram tanah dan sel fungi atau jamur sekitar 10^5 - 10^6 setiap gram tanah. Produktivitas pada setiap tanaman dapat disebabkan oleh beberapa faktor salah satunya, yaitu kondisi tanah yang berbeda pada setiap tempat. Rizosfer tumbuhan merupakan bagian dari habitat berbagai spesies bakteri yang secara umum dikenal sebagai rizobakteri.

Kelimpahan mikroorganisme dalam rizosfer dapat dijadikan indikasi tanah di lingkungan tumbuhan tersebut masih alami atau belum tercemar bahan pestisida kimia sintetis melebihi standar toleransi. Eksplorasi mikroba potensial yang berperan dalam pertumbuhan tanaman masih terus dikembangkan sebagai kajian ekologi, fisiologi dan interaksinya dengan tanaman sebagai upaya dalam mendukung pertanian yang berkelanjutan. Mikroba hasil eksplorasi dari berbagai ekosistem yang kaya akan keanekaragaman hayati, memiliki potensi mikroba yang mampu menambat N_2 (nitrogen), melarutkan P (phosfor) dan menghasilkan hormon tumbuh tanaman atau senyawa antagonis. Umumnya jenis mikroorganisme yang ditemukan di rizosfer, diantaranya: *Pseudomonas* sp., *Azotobacter* sp., *Agrobacterium* sp., *Cellulomonas* sp., *Micrococcus* sp., *Bacillus* sp. dan *Flavobacter* (Mukamto, 2015). Mikroorganisme tanah seperti : bakteri, archaea, fungi, virus dan oomycetes yang berasosiasi secara kolektif dengan seluruh genom mikroorganisme ini dinamakan mikrobiome rizosfer (*microbiome rhizosfer*) (Matur & Roy, 2020). Hal ini dapat ditemukan pada lahan pertanian yang diperlakukan dengan pupuk dan pestisida kimia sintetis ditemukan kuantitas mikroorganisme sangat sedikit bahkan tidak ditemukan mikroorganisme dibandingkan dengan yang tanpa diberikan perlakuan bahan organik (masih alami). Demikian juga populasi mikroorganisme pada tanah rizosfer ditemukan lebih beragam dibandingkan tanah yang jauh dari perakaran (Suanda, 2017)..

Mikroorganisme yang tergolong bakteri, seperti: *Rizobium* sp., *Azospirillum* sp., *Serratia* sp. dan *Pseudomonas* sp. mampu mensintesis IAA (*Indole-3-Acetic Acid*). Zat Pengatur Tumbuh (ZPT) hasil sintesis mikroba penghuni perakaran sebagai PGPR (*Plant Growth Promoting Rhizobacteria*) memiliki manfaat lebih baik

daripada melalui sintesis kimia. Mikroorganisme ini memiliki manfaat dalam meningkatkan kualitas biologi tanah sekitarnya. Keberadaan mikroorganisme ini dominan membantu pertumbuhan tanaman dan dapat memiliki ketahanan sistemik. Populasi mikroba yang berada pada tanah rizosfer merupakan ciri adanya suplai nutrisi yang cukup bagi mikroba dan kondisi ekologi yang mendukung, diantaranya transformasi N atau P serta kandungan unsur hara makro dan mikro seperti Ca, Mg dan K.

Kehidupan mikroorganisme di rizosfer dapat disediakan nutrisi berupa eksudat yang dihasilkan perakaran tumbuhan/tanaman. Eksudat yang dihasilkan akar tumbuhan sebagai aktivitas akar melalui proses rhizodeposisi, dapat berupa: gula, asam amino, asam organik, asam lemak dan sterol. Eksudat yang diproduksi akar tanaman memiliki kemampuan sebagai daya tarik mikroflora tanah. Rizobakteri ini dapat ditemukan di rizosfer tanaman, yaitu lapisan tipis tanah yang melingkupi akar tanaman dan memberikan dampak positif pada pertumbuhan tanaman. Keberadaan mikroorganisme rizosfer ini memiliki kemampuan dalam menyiapkan dan menyediakan hara bagi tumbuhan. Hasil eksplorasi tanah rizosfer pada akar bambu di Bali yang diisolasi mendapatkan beberapa mikroorganisme, salah satunya bakteri *Bordetella trematum* (Widnyana *et al.*, 2023). Lebih lanjut Widnyana *et al* (2023) melaporkan bahwa *Bordetella trematum* (isolat B3) memiliki kemampuan memacu pertumbuhan tinggi tanaman padi jenis Ciherang pada perlakuan dengan kontrol, demikian juga jumlah daun tanaman padi lebih banyak dibandingkan jumlah daun padi pada perlakuan kontrol di rumah kaca.

Tumbuhan memiliki kemampuan dalam mensintesis fitohormon auksin untuk pertumbuhan secara alami dan dibantu mikroorganisme (mikroba) bila terjadi simbiosis dengan akar. Rizobakteri yang mengolonisasi akar tumbuhan sebagian tidak bersifat patogenik namun bersifat menguntungkan tumbuhan (tanaman). Rizobakteri ini berfungsi sebagai pemacu ketahanan tanaman (*Induced Systemic Resistance/ISR*) dan mempercepat pertumbuhan tanaman, yang populer disebut *Plant Growth Promoting Rhizobacteria* (PGPR) (Muslim, 2019). PGPR juga tidak bersimbiotik dalam fiksasi N₂, dapat melarutkan fosfat mineral,

mempengaruhi pembentukan akar (Khalimi & Wiry, 2023). Mikroorganisme tanah dapat melarutkan fosfat dari tanah (Asril *et al.*, 2021). Setelah diserap oleh sel mikroba, fosfor dimasukkan ke dalam struktur seluler mikroorganisme (misalnya, asam nukleat, ester fosfor organik, fosfat anorganik bebas, dan koenzim), dengan kelebihan fosfor cenderung disimpan sebagai polifosfat (Hallama *et al.*, 2019).

Mikroba tanah yang berasosiasi secara kolektif di rizosfer (bacteria, archaea, fungi, virus dan oomycetes) beserta keseluruhan genom yang berasosiasi disebut microbiome rizosfer (Matur dan Roy 2020). Microbiome rizosfer berperan dalam merangsang pertumbuhan, perkembangan dan toleransi terhadap cekaman pada tanaman. Pemanfaatan microbiome banyak digunakan dalam manajemen cekaman kekeringan pada tanaman, karena ramah lingkungan dan biayanya murah. Mikroba atau microbiom ini juga membantu dalam daur ulang nutrisi dengan cara memfasilitasi pengambilan unsur nitrogen dan fosfor serta membantu perubahan morfologi akar (Glick, 2012). Perubahan microbiome akar sangat mendukung adaptasi tanaman saat kekeringan. Kekeringan meningkatkan pertumbuhan mikroba resisten kekeringan (Actinobacteria dan Chloroflexi) serta menurunkan jumlah Acidobacteria dan Deltaproteobacteria. Kolonisasi mikroba endofit di akar meningkatkan kemampuan tanaman untuk mengatasi rendahnya ketersediaan air. *Microbacterium* sp., *Arthrobacter koreensis* dan *Rhodococcus* sp. merupakan genus mikroba yang toleran kekeringan karena mampu memproduksi trehalose intraseluler pada saat kekeringan.

Interaksi antara akar tanaman dan mikroorganisme akan mengatur pertumbuhan, perkembangan dan status kesehatan tanaman. Namun asosiasi antara mikroba tanah yang berbeda dan daerah rizosfer menjadi sangat spesifik untuk tanaman tertentu. Hal ini secara bersamaan juga dipengaruhi oleh tipe tanah, pH, kelembaban, kondisi nutrisi dan iklim (Azarbad *et al.*, 2018). Kondisi tersebut menggambarkan karakteristik rizobiota yang sangat bervariasi dan dinamis untuk berubah pada kondisi tercekam. Interaksi antara mikroorganisme dan akar dapat menguntungkan, merusak, atau netral namun pengaruhnya

tergantung pada kondisi tanah (Adawiyah, 2016). Oleh sebab itu eksplorasi microbiome dilakukan untuk mencari populasi mikroba baru yang dapat menguntungkan untuk meningkatkan pertumbuhan dan perkembangan tanaman seiring dengan perubahan iklim. Perubahan microbiome akar sebagai respon terhadap kekeringan terutama berkontribusi pada adaptasi tanaman saat kondisi tercekam (Santos-Medellin *et al.*, 2017).

8.4 PGPR

Bakteri PGPR di lapangan keberadaannya ditunjukkan atau dicirikan adanya tumbuhan/tanaman yang lebih subur dan lebih sehat dari tanaman lainnya, sehingga terkesan menonjol dari pada tanaman lainnya. Rizobakteri pemacu pertumbuhan tanaman (PGPR) dapat secara signifikan meningkatkan pertumbuhan tanaman dan mewakili interaksi mikroba tanaman yang saling membantu. Keanekaragaman mikroorganisme sangat penting dalam keseimbangan ekosistem tanah juga merupakan indikator kesehatan tanah dan dapat mempengaruhi kondisi tanaman yang tumbuh. Isolat bakteri yang diisolasi dari rizosfir tanaman sawi tergolong bakteri PGPR yang mampu menghasilkan IAA pada fase stasioner juga memiliki kemampuan mengikat nitrogen (N_2). Nitrogen yang diikat terakumulasi pada tanaman yang diaplikasikan dengan bakteri. Nitrogen yang terakumulasi pada tanaman terindikasi dalam hijau daun yang juga akan memberikan dampak terhadap kesuburan tanaman (Pudjiwati & Rindiani, 2022). PGPR merupakan pupuk hayati dapat digunakan sebagai usaha untuk meningkatkan produktivitas dibidang pertanian berbasis bioteknologi. Penggunaan PGPR mampu meningkatkan pertumbuhan tanaman karena bersifat merangsang pertumbuhan (*biostimulan*) dengan mensintesis dan mengatur konsentrasi berbagai zat pengatur tumbuh, dapat memfasilitasi tersedianya unsur hara esensial, serta sebagai pengendali patogen tanah (*bioprotektan*) (Marom *et al.*, 2017; Widnyana *et al.*, 2022).

PGPR dapat mempercepat pertumbuhan dan meningkatkan hasil Melon (*Momordica charantia* L.) di rumah kaca (Widnyana *et al.*, 2023). Pemberian PGPR cair dengan dosis 10–20 mL dapat meningkatkan panjang akar tanaman menjadi lebih panjang serta

dapat menambah bobot kering dan basah akar tanaman (Sitawati *et al.*, 2022; Widnyana *et al.*, 2022). PGPR merupakan kelompok mikroba yang mampu mengolonisasi akar tanaman, mempengaruhi pertumbuhan tanaman melalui berbagai cara baik langsung maupun tidak langsung untuk meningkatkan pertumbuhan, serta melindunginya dari penyakit atau kerusakan akibat serangan serangga hama (Mohanty *et al.*, 2021). Aplikasi PGPR memiliki pengaruh pada tinggi tanaman, jumlah daun, luas daun, berat trubus segar dan kering, berat akar, berat tanaman segar dan kering, berat tanaman per petak segar dan kering, serta indeks panen (Naihati *et al.*, 2018; Ristiana *et al.*, 2022). Handayani (2020) melaporkan isolat rizobakteri (PGPR) diisolasi dari tanaman padi, diantaranya: *Serratia marcescens*, *Achromobacter spanius*, *Providencia vermicola*, dan *Pantoea agglomerans* diaplikasikan pada tanaman padi beras merah lokal di Desa Jatiluwih, Kabupaten Tabanan, Bali berdampak positif dengan peningkatan hasil sebesar 56,46% (6,40 ton/ha) dibanding perlakuan kontrol (4,09 ton/ha). Adanya peningkatan nilai rata-rata tinggi tanaman, jumlah daun per rumpun, kandungan klorofil daun, jumlah anakan total per rumpun, jumlah anakan produktif per rumpun, panjang malai, gabah total per malai, gabah per malai dan hasil panen padi varietas lokal Jatiluwih, Kabupaten Tabanan yang diaplikasikan PGPR (Alviani *et al.*, 2023).

Selama proses daur ulang biogeokimia, fosfor yang terakumulasi oleh bakteri dan jamur secara perlahan dilepaskan kembali ke dalam tanah dan menjadi tersedia bagi tanaman. Hal ini dibuktikan dengan korelasi antara serapan fosfor (P) oleh tanaman dan biomassa fosfor dalam mikroorganisme (Sugito *et al.*, 2010). Pelepasan fosfat dari biomassa mikroba kemungkinan tergantung pada jumlah fosfor yang tersedia di tanah (Spohn & Widdig, 2017), ketersediaan karbon (Malik, 2012), tekstur tanah (Chen & He, 2002), dan komposisi komunitas mikroba (Dinh *et al.*, 2017). Kemampuan mikroorganisme untuk menyeimbangkan antara proses solubilisasi (mineralisasi) dan imobilisasi menentukan kemampuan mikroba dapat meningkatkan ketersediaan fosfor dalam sistem tanah dan tanaman (Gambar 8.2).



Bacillus sp. merupakan bakteri Gram positif berbentuk batang, bersifat aerob dan anaerob fakultatif serta memiliki kemampuan dalam membentuk endospora. Dalam bentuk endospora, Bacillus sp. mampu bertahan hidup dalam lingkungan ekstrim, misal: kekeringan dalam waktu lama, radiasi, panas, asam, desinfektan, nutrisi kurang serta mampu bertahan dalam kondisi dorman pada waktu lama. Bacillus sp. merupakan kelompok rizobakteri yang memiliki kemampuan dalam membentuk spora sebagai bentuk pertahanan hidup pada lingkungan ekstrim (Hasheem *et al.*, 2019). Spesies Bacillus adalah jenis utama rizobakteri dapat membentuk spora yang dapat bertahan hidup di tanah untuk jangka waktu cukup lama di bawah kondisi lingkungan ekstrim. Bakteri yang hidup di perakaran tanaman berpotensi besar untuk memfasilitasi pertumbuhan tanaman dan meningkatkan produktivitas tanaman. Azotobacter sp. diketahui banyak memiliki kapabilitas untuk mendukung pertumbuhan tanaman dalam kondisi tekanan lingkungan. Kondisi ini disebabkan kebanyakan bakteri memiliki kemampuan memproduksi 1-aminocyclopropane-

1-carboxylate (ACC) deaminase yang menghambat pembentukan etylen pada saat tanaman mengalami stres (Zarei *et al.*, 2020).

Bakteri *Bacillus* sp. memiliki potensi tinggi dalam memacu pertumbuhan tanaman. Genus *Bacillus* memiliki sifat fisiologi berbeda karena *Bacillus* jenis berbeda akan memiliki kemampuan berbeda, misal; kemampuan melarutkan fosfat (Thant *et al.*, 2018), kemampuan mengikat nitrogen (Zerin, 2020) dan sebagai antagonis terhadap jamur (Mardanova *et al.*, 2017). *Bacillus* sp. banyak diaplikasikan dalam pertanian karena bakteri ini memiliki kemampuan sebagai pelarut fosfat. Aplikasi *Bacillus* sp. terbukti mampu meningkatkan aktivitas biologis tanah untuk meningkatkan produksi dan melindungi tanaman dari penyakit dan patogen tanaman (Mazylyte *et al.*, 2022). Kelebihan *Bacillus* sp. yaitu: berkompetisi dengan baik, bersifat fakultatif anaerob dan mampu bersporulasi dalam lingkungan yang kurang menguntungkan (Shidiawan *et al.*, 2023). Genus *Bacillus* merupakan bakteri yang cukup banyak dimanfaatkan sebagai pengendalian organisme pengganggu tanaman (OPT). Beberapa spesies *Bacillus* dilaporkan sebagai agensia biokontrol, yakni: *Bacillus thuringiensis*, *Bacillus papillae*, *Bacillus sphaericus*, *Bacillus pumilus* dan *Brevibacillus laterosporus* serta lainnya. Keunggulan *Bacillus* sp. memberi nilai tambah saat diaplikasikan, karena memberikan waktu simpan yang cukup panjang (Yanti *et al.*, 2017).

Beberapa hasil penelitian melaporkan bahwa *Bacillus subtilis* efektif mengendalikan patogen tular tanah (Muis, 2016). *Bacillus thuringiensis* memiliki kemampuan sebagai agensia biokontrol karena menghasilkan toksin *Cry* dan toksin *Cyt* yang bersifat patogen terhadap serangga hama sasaran (Argolo-Filho *et al.*, 2014). Pemberian racun umpan pada beberapa stadium instar *Spodoptera litura* dengan *Bacillus thuringiensis* menghasilkan mortalitas sampai 80% pada instar III (Zulfiana *et al.*, 2017). *Bacillus* sp. hasil isolasi dari rizosfer telah banyak diteliti dan dikembangkan sebagai agensia biokontrol dan dilaporkan sangat efektif untuk mengendalikan patogen yang menginfeksi tanaman (Nanda *et al.*, 2018).

8.4.2 *Pseudomonas* sp.

Bakteri *Pseudomonas* sp. sebagai penghuni dalam lapisan *top soil* tanah terutama pada rizosfer berbagai jenis tanaman, seperti: tanaman kelompok solanaceae, jagung, vanilli, bambu, dan berbagai jenis tanaman lainnya. Untuk mendapatkan jenis bakteri ini dapat dilakukan dengan mengambil sampel rizosfer kelompok tanaman tersebut untuk diisolasi pada media tumbuh berupa PDA (*Potato Dextrosa Agarose*) secara *in vitro* (di dalam laboratorium) (Widnyana *et al.*, 2021). Keberadaan bakteri *Pseudomonas* sp. umumnya tersebar secara luas di lapangan terutama pada zone perakaran berbagai jenis tanaman. *Pseudomonas* sp. merupakan salah satu bakteri yang mampu mensintesis siderofor, yaitu senyawa pengikat zat besi (Fe^{3+}) dan sebagai makronutrien penting yang dibutuhkan mikroba untuk memicu pembentukan sel pada jaringan akar dan jaringan tunas yang sedang tumbuh (Sarkar *et al.*, 2022). Kelompok bakteri *Pseudomonas fluorescen* isolat PflAHp2 dapat menghasilkan siderofor cukup tinggi dan memiliki kemampuan antagonis terhadap *Blood Disease Bacteria* (BDB), aktif menekan *Fusarium oxysprorum* dengan mengikat ion Fe^{3+} yang dibutuhkan patogen tersebut (Avinda *et al.*, 2022). *P. fluorescens* penghuni daerah perakaran memiliki kemampuan sebagai pelarut fosfat, mengikat nitrogen dan menghasilkan zat pengatur tumbuh. Mekanisme kerja siderofor terjadi sejalan perkembangan bakteri yang mengolonisasi akar tanaman dengan menciptakan kondisi untuk pertumbuhan akar. Lebih lanjut Avinda *et al.* (2022) menyatakan siderofor yang dihasilkan PGPR memiliki kemampuan mengikat besi (Fe^{3+}) menjadi besi yang tersedia bagi tanaman dan menghambat pertumbuhan patogen.

Pseudomonas fluorescens mampu menggunakan nitrogen seperti amonia atau nitrat untuk menghasilkan biosurfaktan. Bakteri *P. fluorescens* bermanfaat dalam meningkatkan pertumbuhan vegetatif dan menjaga kesehatan tanaman melalui enzim yang dihasilkan bekerjasama dalam proses mineralisasi fosfat (P-organik menjadi P-anorganik) yang tersedia bagi tanaman (Miftahurrohmat & Sutarman, 2020). Bakteri pelarut fosfat dapat meningkatkan ketersediaan fosfat tersedia, produksi CO_2 tanah, enzim dehidrogenase dan penurunan Al-dd pada media tanam

(Marlina & Gusmiatun, 2020). Penambahan unsur P dalam media tanam dapat meningkatkan aktivitas enzim nitrogenase yang berdampak ke fiksasi N₂ lebih tinggi dan menyebabkan perkembangan bintil akar lebih banyak. Peningkatan kandungan unsur P dan N berpengaruh terhadap peningkatan biomassa pada tanaman kedelai. Pengaplikasian PGPR yang ditambahkan *P. fluorescen*, *Trichoderma* sp., *Aspergillus niger*, *Azobacter* sp., *Azospirillum* sp., dan *Rizobium* sp. mampu memberikan pengaruh terbaik terhadap pertumbuhan, hasil, kualitas cabai merah serta dapat meningkatkan tinggi tanaman, jumlah cabang total, jumlah buah dan bobot buah (Ichwan *et al.*, 2021).

Antagonis *P. fluorescens* P60 mampu menghambat pembentukan mikrosklerotium baru *Verticilium dahlia* pada tanaman uji *Arabidopsis thaliana* dan terung (Soesanto, 2000, 2001).

8.4.3 Fungi Mikoriza Arbuskula (FMA)

Mikoriza Arbuskula merupakan cendawan obligat fakultatif mempunyai kemampuan berasosiasi dengan 80-96% jenis tanaman walaupun efektivitasnya tidak sama untuk setiap tanaman dan berperan dalam membantu meningkatkan daya hidup (Suharno *et al.*, 2014) dan pertumbuhan tanaman (Idhan, 2016). Fungi Mikoriza Arbuskula (FMA) atau yang sering disebut mikoriza merupakan cendawan tanah yang bersimbiosis dengan akar tanaman inang, dan mempunyai pengaruh yang luas terhadap mikroorganisme yang bersifat patogen. Beberapa kelompok jamur tergolong mikoriza, diantaranya: ektomikoriza, endomikoriza, arbutoid mikoriza, monotropid mikoriza, ericoid mikoriza, dan orchid mikoriza. Pengelompokkan ini didasarkan atas jenis fungi (jamur), jenis tumbuhan sebagai asosiasi dan karakteristik yang terbentuk dari hasil asosiasi kedua simbiosis tersebut. Akar tanaman inang yang terinfeksi dengan mikoriza, eksudat akarnya berbeda dengan eksudat akar yang tidak terinfeksi dengan mikoriza. Cendawan ini dapat dijadikan sebagai salah satu alternatif teknologi untuk membantu pertumbuhan, meningkatkan produktivitas dan kualitas tanaman terutama yang ditanam pada lahan marginal yang kurang subur atau bekas tambang/industri (Suharno & Sancayaningsih, 2013). Mikoriza dapat membantu proses revegetasi lahan (Saputri

et al., 2016) dengan meningkatkan daya larut mineral (Sufardi *et al.*, 2013), meningkatkan pengambilan nutrisi (Ayu *et al.*, 2015), mengikat partikel tanah menjadi agregat yang stabil (Fuady, 2013) dan meningkatkan toleransi terhadap kekeringan (Rahmi, 2017), serta keracunan logam (Setiadi & Setiawan, 2011). Kualitas simbiosis fungi mikoriza arbuskula (FMA) atau sering juga disebut cendawan mikoriza arbuskula (CMA) sangat dipengaruhi karakteristik tanah yang dipresentasikan pertumbuhan panjang akar tanaman dan kelimpahan fungi FMA (Camenzind *et al.*, 2016).

Cendawan Mikoriza Arbuskula (CMA) yang berasosiasi dengan tanaman dapat ditunjukkan adanya tingkat infeksi yang terjadi pada akar tanaman. Adanya infeksi akar ini dapat terlihat adanya struktur yang dihasilkan CMA, berupa: hifa, miselia, vesikula, arbuskula dan spora. Keberadaan struktur CMA ini menandakan telah terjadi asosiasi antara CMA dengan akar tanaman sebagai inang. Spora CMA terbentuk sebagai akibat penggelembungan satu atau lebih dudukan hifa (*subtending hypha*) dalam tanah atau dalam akar (Brundrett *et al.*, 1996). Pengujian terjadinya asosiasi jenis mikoriza dapat melalui analisa jaringan akar tanaman yang digunakan dalam kultur *trapping*. Kultur *trapping* merupakan metode penangkaran mikoriza yang berasal dari rizosfer tanaman dalam pot-pot kultur agar diperoleh lebih banyak jumlah spora untuk selanjutnya diidentifikasi jenis-jenis maupun kelimpahannya serta tingkat infeksi pada tanaman inang (Brundrett *et al.*, 1996). Mikoriza memiliki kemampuan berasosiasi terhadap beberapa jenis tanaman/tumbuhan yang bermanfaat dalam meningkatkan efisiensi penyerapan unsur hara terutama fosfor pada lahan marjinal. Cendawan Mikoriza Arbuskula (CMA) terjadi suatu simbiosis mutualisme dengan mendapatkan suplai karbohidrat dari akar tanaman inang, sedangkan cendawan ini menyediakan unsur hara terutama fosfor (P) untuk tanaman inang. Simbiosis sangat diperlukan karena CMA merupakan simbiosis obligat yang memerlukan akar tanaman inang sebagai habitat hidup selain unsur hara lainnya (Istigfaiyah, 2018). Tanaman kacang hijau yang dijadikan inang untuk perbanyakan CMA memberikan pengaruh pada peningkatan pH (*power of Hydrogen*

atau *potential of Hydrogen*) tanah yang lebih tinggi dibandingkan pada tanaman jagung (Nuridayati *et al.*, 2019).

8.4.4 Jamur *Trichoderma* sp.

Trichoderma diklasifikasikan dalam kingdom fungi dan 100 spesies diantaranya tersebar di penjuru dunia. *Trichoderma* sp. dapat ditemui sebagai endofit pada perakaran tanaman maupun sebagai mikoparasit terhadap serangga dan nematoda. *Trichoderma* sp. dapat hidup dengan cara mengkolonisasi perakaran tanaman (rizosfer) untuk mendapatkan nutrisi berupa eksudat akar dari proses simbiosis dengan tanaman. Kelebihan lain dari *Trichoderma* sp. ialah kemampuannya dalam menoleransi berbagai kontaminasi dan cekaman lingkungan lainnya sehingga memiliki potensi yang baik untuk diproduksi dan digunakan pada berbagai kondisi lingkungan pertanian yang intensif (Poveda, 2021; Suryaminarsih, 2020). Lebih lanjut Sutarman (2016) melaporkan *Trichoderma harzianum* berpotensi sebagai biopestisida sekaligus biofertilizer. *Trichoderma* sp. dianggap sebagai agensia hayati yang berspektrum luas di berbagai jenis tanaman pertanian. Meningkatkan kemampuan agensia antagonis *Trichoderma* sp. dapat dilakukan dengan cara membiakan pada media tertentu yang tepat guna untuk mendapatkan biakan yang optimal, agar pemanfaatan *Trichoderma* sp. sebagai agensia hayati berfungsi dengan baik terhadap tanah dan menjaga kelestarian lingkungan berkelanjutan (Suanda, 2019).

Trichoderma memiliki kemampuan mengendalikan fungi patogen dengan mensintesis berbagai senyawa protein sebagai antibiotik dan enzim hidrolitik yang mampu mendegradasi dinding sel, seperti: selulase, kitinase dan glukonase (Vinale *et al.*, 2008; Al-Tawell *et al.*, 2009). *Trichoderma harzianum* juga dapat meningkatkan ketahanan terhadap patogen dengan cara menginduksi peningkatan aktivitas enzim peroksidase, poliferas, polifenol oksidase dan superoksida dismutase pada tanaman tomat (Srivastava *et al.*, 2010; Chowdappa *et al.*, 2013) dan kentang (Youssef *et al.*, 2016).

8.5 Pertanian Berkelanjutan

Pertanian berkelanjutan secara umum berarti bahwa pemanfaatan sumberdaya lahan, air dan bahan tanaman untuk usaha produksi bersifat lestari menghasilkan produk pertanian secara ekonomis dan menguntungkan. Kebutuhan hidup dari makanan dan lingkungan sehat menjadi dambaan semua manusia sebagai makhluk hidup. Tercapainya kondisi sehat ini dibutuhkan asupan nutrisi dari hasil yang dikelola secara aman, sehat dan berkelanjutan melalui pertanian organik sebagai bagian dari pertanian berkelanjutan (Suanda, 2023c). Pertanian berkelanjutan merupakan sebuah implementasi dari pembangunan berkelanjutan yang terdiri atas tiga konsep, yakni: ekonomi, sosial dan ekologi. Pertanian berkelanjutan merupakan suatu sistem pertanian holistik yang mendukung dan mempercepat biodiversitas, siklus biologi dan aktivitas biologi tanah. Penerapan bioteknologi tanah merupakan salah satu solusi yang dapat diterapkan untuk mencapai pertanian yang berkelanjutan. Pembuatan pupuk organik dengan cara yang cepat dan berkualitas melalui penggunaan mikroba perombak bahan organik atau dekomposer, penambahan mikroba penambat N_2 (nitrogen) udara, pelarut fosfat, pelarut kalium, perombak polutan dan antagonis merupakan contoh dari penerapan bioteknologi tanah dalam memperbaiki tanah yang rusak sehingga tanah menjadi sehat, efisiensi penggunaan pupuk kimia dan penggunaan pestisida dapat dikurangi.

Konsep pertanian berkelanjutan ini dapat digunakan sebagai solusi dalam mengatasi masalah di bidang pertanian dan kebutuhan pangan. Penggunaan pupuk anorganik, pestisida, herbisida berbahan kimia sintetis dan eksploitasi lahan pertanian yang intensif secara terus menerus menjadi konsekuensi terciptanya lingkungan yang tidak stabil menimbulkan terganggunya kehidupan. Bahan kimia sintetis yang diaplikasikan dalam kegiatan pertanian memberi dampak serius kecepatan rusaknya struktur tanah yang dihuni mikroorganisme bersifat antagonis terhadap patogen tanaman juga bertambah kritisnya kondisi tanah. Sistem biologi tanah diperlukan untuk memahami dengan lebih baik proses dan interaksi kompleks yang mengatur stabilitas lahan pertanian (Asril *et al.*, 2022).

Kondisi merugikan ini, maka diperlukan strategi sebagai model dalam pertanian berupa integrasi antara layanan jasa untuk menjaga keseimbangan ekosistem lingkungan melalui kebijakan dan peraturan pemegang kebijakan. Pengembangan pertanian berkelanjutan dapat diintegrasikan dengan usaha-usaha pertanian lain yang memiliki dimensi ekonomi, sosial dan ekologi. Pengembangan pertanian, peternakan dan perikanan ("TANTERIKA") secara terintegrasi merupakan suatu perpaduan kegiatan yang mulai berkembang untuk menjaga lingkungan produktif di daerah pinggiran perkotaan (Suanda, 2023c). Lahan pertanian yang dikelola secara terintegrasi antara kegiatan pertanian, peternakan dan perikanan (TANTERIKA) berkontribusi kepada petani dalam menjaga kemandirian pangan dengan peningkatan pendapatan serta terjaganya ekosistem di alam secara berkelanjutan (Suanda, 2023c). Terjaganya keseimbangan ekosistem melalui usaha pengelolaan pertanian terintegrasi menjadi daya tarik masyarakat akhir-akhir ini. Pengembangan pertanian berkelanjutan yang terintegrasi ini tentu sangat menyehatkan dan menjadi tujuan wisata berupa ekowisata serta riset (penelitian) sekaligus media pembelajaran.

Pertanian berkelanjutan sebagai jawaban dalam pengelolaan lingkungan yang banyak dikhawatirkan dewasa ini. Keberlanjutan pertanian dapat terjaga dengan menerapkan pertanian organik yang bersumber dari bahan organik dalam kegiatan pertanian. Pertanian organik tidak bisa dilepaskan dari usaha berdimensi ekonomi, dimensi sosial dan dimensi lingkungan. Oleh karena itu pertanian organik bukan meniadakan sama sekali penggunaan bahan sintetis, namun lebih menekankan pada pemanfaatan sumber daya alam sebagai pengendalian hayati, baik dari mikroba sebagai antagonis maupun predator, parasitoid sebagai pengendalian yang ramah lingkungan serta dapat meningkatkan penghematan yang menjamin keberlanjutannya. Mengurangi ketergantungan terhadap bahan kimia sintetis dalam pertanian, seperti: pupuk dan pestisida kimia sintetis sebagai kunci dari pertanian berkelanjutan karena tidak merusak, tidak mencemari, serasi dan selaras dengan lingkungan hidup (Imani *et al.*, 2018).

Pengendalian hayati sering disebut sebagai pengendalian biologi, karena kegiatan pengendalian melibatkan biotik (organisme hidup), baik dari mikroba maupun predator yang mampu berkembang terus bila ekosistem lingkungan terjamin (Suanda, 2023a). Dalam pengendalian hayati lebih menekankan pada pemanfaatan musuh-musuh alam, seperti: predator, parasitoid dan patogen (*entomopatogen*). Jadi pengendalian hayati merupakan kegiatan pengendalian serangga hama dengan memanfaatkan musuh-musuh alamnya (agensia pengendali biologi). Dalam pengertian ekologi pengendalian hayati didefinisikan sebagai pengaturan populasi organisme dengan musuh-musuh alam untuk menjaga keseimbangan ekosistem yang kepadatan populasi organisme pengganggu tanaman (OPT) berada di bawah nilai ambang kendali. Kerusakan pada setiap tanaman yang diakibatkan OPT memiliki nilai ambang batas ekonomi bervariasi (Suanda *et al.*, 2023). Populasi larva *Plutella xylostella* L. perusak daun kubis melebihi 3 larva pada setiap tanaman kubis, dikategorikan berada di atas nilai ambang ekonomi dan perlu dikendalikan. Bila populasi masih di bawah 3 larva/tanaman kubis, belum diperlukan pengendalian, agar terjaganya keseimbangan ekosistem (Suanda, 2021).

Dalam pertanian berkelanjutan, aspek ekonomi ditunjukkan dengan meningkatnya penghasilan petani dibarengi produksi pertanian secara kontinyu agar tercapainya kecukupan kebutuhan secara berkelanjutan. Jadi dalam pertanian berkelanjutan juga diantisipasi harga produk pertanian secara ekonomi menjadi stabil menjadikan pendapatan petani tetap tinggi (Suanda, 2023c). Pola hidup sehat masyarakat yang akrab dengan mengonsumsi produk berasal dari pertanian organik menimbulkan daya tarik bagi produsen dan konsumen. Melihat tren masyarakat mengonsumsi produk sehat tanpa merusak lingkungan memberikan gairah untuk mengembangkan pertanian berwawasan lingkungan dan berkelanjutan (Suanda *et al.*, 2022). Program penyelamatan kehidupan manusia dan lingkungan memerlukan dukungan dan partisipasi para pihak termasuk pemerintah melalui kebijakan dan peraturan yang mendukung. Pengembangan produk pertanian sehat melalui kegiatan pelatihan, pendampingan dan pembentukan

kelompok kerja telah banyak dilakukan di masyarakat, seperti misalnya: kelompok pertanian biodinamik, yaitu pertanian sehat berbasis menjaga keselarasan alam beserta ekosistem. Pengembangan biodinamik dalam bentuk pupuk hayati, dimana stater (aktivator) mikroba diambil dari kotoran sapi (kohe) yang diikubasi dalam tanduk sapi betina yang telah melahirkan (sudah menyusui anaknya) sekitar 6 bulan ditanam dalam petak tanah (Gambar 8.3). Dalam pertanian biodinamik mengedepankan kegiatan pertanian dan peternakan berlandaskan sistem “kertamasa” terintegrasi. Mikroba dan biota yang hidup dalam tanah merupakan komponen utama agroekosistem memiliki peran penting dalam ekosistem dengan efek sinergis pada produksi tanaman. Konservasi mikroba dan biota tanah menjadi komponen sangat strategis menuju keberlanjutan pertanian serta menjadi kekayaan spesies dalam rizosfer (Coulibaly *et al.*, 2017).



Gambar 8.3. Pembuatan Pupuk Biodinamik dari Tanduk Sapi Berbasis Mikroba

Pengembangan pupuk biodinamik telah berkembang sangat pesat dimasing-masing daerah di Indonesia yang juga sebelumnya telah berkembang di beberapa negara di dunia. Pembentukan kelompok masyarakat yang bergerak dalam pertanian biodinamik untuk menjaga ekosistem dalam tanah terutama pada rizosfer agar terjaminnya produktivitas hasil pertanian. Penurunan produktivitas hasil pertanian dapat membawa permasalahan bagi keamanan pangan, sehingga diperlukan konsep yang tepat untuk menjaga dan meningkatkan produktivitas pertanian yang tetap ramah terhadap lingkungan. Salah satu konsep yang searah dengan tujuan tersebut adalah *Sustainable Agriculture* atau *Pertanian Berkelanjutan*. Meningkatkan *bioavailabilitas* fosfat bagi tanaman merupakan salah satu tujuan utama pertanian berkelanjutan (Alori *et al.*, 2017). Pertanian berkelanjutan, membutuhkan kegiatan pertanian yang lebih ramah terhadap lingkungan dan menjaga keseimbangan ekologi ekosistem tanah dalam jangka panjang. Penggunaan inokulan mikroba (pupuk hayati) termasuk mikroba pelarut fosfat di bidang pertanian merupakan alternatif ramah lingkungan untuk aplikasi pupuk mineral lebih lanjut (Suanda, 23b). Menurut Juby *et al.* (2021), mikroorganisme bermanfaat dapat ditemui dalam berbagai macam peran baik sebagai pendukung pertumbuhan tanaman, sebagai agensia hayati dalam pengendalian OPT, agensia bioremediator dan penginduksi ketahanan serta toleransi tanaman terhadap cekaman lingkungan. Pemanfaatan mikroorganisme dapat menjadi salah satu langkah modernisasi pertanian di Indonesia, misalnya metode bertani selaras alam dengan memanfaatkan sumber daya alam (SDA) dan sumber daya hayati (SDH). Pertanian selaras alam yang dibentuk mengedepankan bahan organik seperti pertanian biodinamik. Modernisasi pertanian di Indonesia diharapkan dapat menjawab tantangan dan permasalahan pertanian di era sebelumnya. Oleh karena itu, diperlukan kajian literatur dan kajian akademik terhadap potensi mikroorganisme bermanfaat serta keunggulan dan hambatan dalam pelaksanaannya untuk menyelesaikan permasalahan pertanian..

Penambahan *Trichoderma* sp. juga dapat dilakukan bersamaan pupuk kompos sebagai biofertilizer yang aman bagi lingkungan karena tidak menimbulkan emisi gas rumah kaca (Sahu

et al., 2018). Pengembangan bakteri akar pemacu pertumbuhan tanaman (PGPR) saat ini semakin berkembang pesat, terutama dalam upaya meningkatkan produksi pangan dan memperbaiki kualitas lingkungan hidup. Pengelolaan pertanian organik menekankan pada prinsip terjaganya kesehatan, ekologi, sosial dan perlindungan. Tujuan pertanian organik yaitu penyediaan produk pertanian, khususnya pangan bergizi aman bagi kesehatan masyarakat, petani dan pengguna serta terjaganya ekosistem lingkungan.

DAFTAR PUSTAKA

- Alviani, N.W.D; Pradnyawathi, N.L.M. & Astiningsih, A.A.M. 2023. Pengaruh Pengaplikasian PGPR (*Plant Growth-Promoting Rhizobacteria*) terhadap Pertumbuhan dan Hasil Padi (*Oryza sativa* L.) Varietas Lokal di Desa Jatiluwih. Program Studi Agroekoteknologi Fakultas Pertanian Universitas Udayana. *Agrotrop: Journal on Agriculture Science*; 13(1): 98 – 112.
DOI: <https://doi.org/10.24843/AJoAS.2023.v13.i01.p09>
- Astija, Y; Alibasyah, L. & Febriani, V.I. 2022. *Plant Growth Promoting Rhizobacteria* (PGPR) Akar Bambu, Kacang Hijau, dan Putri Malu untuk Meningkatkan Pertumbuhan Bintil Akar Kacang Hijau. *Bioscientist: Jurnal Ilmiah Biologi*; 10(2): 652-661.
<https://doi.org/10.33394/bioscientist.v10i2.5291>
- Advinda, L; Putri, D.H; Anhar, A. & Irdawati. 2022. Identification and Characterization of *Pseudomonas fluorescens* Producing Active Compounds Kontrolling Plant Pathogens. *Yuzuncu Yil University Journal of Agricultural Sciences*; 32(4): 795-804.
- Asril, M; Lisafitri, Y; Niswati, A; Dirmawati, S.R; Rismawati; Rini, I.A & Oktaviani, I. 2022. Assessment of Phosphate Solubilization and Indole Acetic Acid Production of Phosphate Solubilizing Bacteria Isolated from Acid Soils, Lampung, Indonesia. Proceedings of the 3rd KOBICONGRESS, International and National Conferences (KOBICONGRESS 2020), 14, pp. 469–477.
doi: 10.2991/ABSR.K.210621.080.
- Abd-Elgawad, M.M. & Askary, T.H. 2020. Factors affecting success of biological agents used in controlling the plant-parasitic nematodes. *Egyptian Journal of Biological Pest Control*; 30(1): 1-11.
- Alori, E; Glick, B. & Babalola, O. 2017. Microbial Phosphorus Solubilization and Its Potential for Use in Sustainable Agriculture. *Frontiers in Microbiology*; 8(971): 1–8. Available at:
<https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fmicb.2017.00971/full> (Accessed: March 15, 2023).
- Adawiyah, P.R.A. 2016. Isolasi dan Identifikasi Cendawan Indigenous Rhizosfer Tanaman Kentang (*Solanum*

tuberosum L.) di Buluballea Kelurahan Pattappang Kecamatan Tinggimoncong Kabupaten Gowa. Skripsi. Fakultas Sains dan Teknologi, UIN Alauddin Makassar, Makassar.

- Ayu, P.S; Noli, Z.A & Solfiyeni. 2015. Pertumbuhan rumput kerbau (*Paspalum conjugatum* Berg.) yang diinokulasi beberapa dosis Fungi Mikoriza Arbuskular (FMA) pada media yang mengandung merkuri (Hg). *Jurnal Biologi Universitas Andalas*; 4(2): 107–112.
- Akpalu, M.M; Siewobr, H; Oppong-Sekyere, D. & Akpalu, S.E. 2014. Phosphorus Application and Rhizobia Inoculation on Growth and Yield of Soybean (*Glycine max* L. Merrill). *Journal of Experimental Agriculture International*; 4(6): 674–685.
- Argolo-Filho, R.C; Costa, R.L; Pinheiro, D.H; Corrêa, F.M; Valicente, F.H., Pomella, A.W.V. & Loguercio, L.L. 2014. Requirement of Simultaneous Assessment of Crystal-and Supernatant-Related Entomotoxic Activities of *Bacillus thuringiensis* Strains for Biocontrol-Product Development. *Toxins*; 6(5) : 1598–1614.
- Arifin, H.S., Munandar, A., Schultin, K.G., Kaswanto, R.L. 2012. The role and impacts of small-scale, homestead agroforestry systems ("pekarangan") on household prosperity: An analysis of agro-ecological zones of Java, Indonesia. *International Journal of AgriScience*; 2(10): 896–914.
- Al-Taweil, H.I; Osman, M.B; Aidil, A.H. & Wan-Yussof, W.M. 2009. Optimizing of *Trichoderma viride* cultivation in submerged state fermentation. *Am. J. Appl. Sci*; 6: 1277–1281.
- Brundrett, M; Bougher, N; Dell, B; Grove, T. & Malajczuk, N. 1996. Working with Mycorrhizas in Forestry and agriculture. International Mycorrhizal Workshop in Kaiping - China. ACIAR Monograph. Mycorrhizas for Forestry And Agriculture.
- Coulibaly, S.F.M; Coudrain, V; Hedde, M; Brunet, N; Mary, B; Recous, S. & Chauvat, M. 2017. Effect of different crop management practices on soil Collembola assemblages : A 4-year follow-up. *Applied Soil Ecology*; 119(June): 354–366.
- Doi: <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2017.06.013>

- Camenzind, T; Homeier, J; Dietrich, K; Hempel, S; Hertel, D; Krohn, A; Leuschner, C; Oelmann, Y; Olsson, P.A; Suarez, J.P. & Rillig, M.C. 2016. Opposing effects of nitrogen versus phosphorus additions on mycorrhizal fungal abundance along an elevational gradient in tropical montane forests. *Soil Biology & Biochemistry*; 94: 37-47.
- Chowdappa, P; Kumar, S.P.M; Lakshmi, M.J. & Upreti, K.K. 2013. Growth stimulation and induction of systemic resistance in tomato against early and late blight by *Bacillus subtilis* OTPB1 or *Trichoderma harzianum* OTPB3. *Biol. Control*; 65: 109–117.
- Chen, G.C. & He, Z.L. 2002. Microbial biomass phosphorus turnover in variable-charge soils in China. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*; 33(13–14): 2101–2117. doi: 10.1081/CSS120005751.
- Dinh, M. Van *et al.* 2017. Release of phosphorus from soil bacterial and fungal biomass following drying/rewetting. *Soil Biology and Biochemistry*; 110: 1–7.
Doi: 10.1016/J.SOILBIO.2017.02.014.
- Elizabeth, R. 2021. Pemakaian biogas: Hemat biaya bahan bakar dan tambahan pendapatan rumah tangga mendukung ketahanan energi. *Jurnal Risalah Kebijakan Pertanian dan Lingkungan*; 8(3): 151-175.
<https://doi.org/10.29244/jkebijakan.v8i3.28067>
- Fuady, Z. 2013. Kontribusi Cendawan Mikoriza Arbuskular terhadap Pembentukan Agregat Tanah dan Pertumbuhan Tanaman. *Lentera*; 13: 7–15.
- Glick BR. 2012. Plant growth-promoting bacteria: mechanisms and applications. *Scientifica* 2012: 963401. Glick BR. 2012. Plant growth-promoting bacteria: mechanisms and applications. *Scientifica* 2012: 963401.
DOI:10.6064/2012/963401
- Handayani, N.M.Y; Pradnyawathi, N.L.M; I. A. Mayun, I.A. & Raka, I.G.N. 2020. Pengaruh Aplikasi Beberapa Rhizobakteria terhadap Hasil dan Mutu Benih Padi Beras Merah (*Oryza nivara* L.) Lokal Jatiluwih. *Jurnal Agroekoteknologi Tropika*; 9(4): 309-318.

- Hallama, M; Pekrun, C; Lambers, H. & Kandeler, E. 2019. Hidden miners – the roles of cover crops and soil microorganisms in phosphorus cycling through agroecosystems. *Plant and Soil*; 434(1-2): 7–45.
doi: 10.1007/S11104-018-3810-7.
- Hashem, A; Tabassum, B. & Abd-Allah, E. F. 2019. *Bacillus subtilis*: A Plant Growth Promoting Rhizobacterium that Also Impacts Biotic Stress. *Saudi journal of biological sciences*; 26(6): 1291-1297.
- Hartman, K & Tringe SG. 2019. Interactions between plants and soil shaping the root microbiome under abiotic stress. *The Biochem J*; 476: 2705–2724.
DOI:10.1042/BCJ20180615.
- Ichwan, B; Novita, T; Eliyanti, E. & Masita, E. 2021. Aplikasi Berbagai Jenis Plant Growth Promoting Rhizobacteria (PGPR) dalam Meningkatkan Pertumbuhan dan Hasil Cabai Merah. *Jurnal Media Pertanian*; 6(1): 1-7.
- Imani, F; Charina, A; Karyani, T. & Mukti, G.W. 2018. Penerapan Sistem Pertanian Organik di Kelompok Tani Mekar Tani Jaya Desa Cibodas Kabupaten Bandung Barat. *Mimbar Agribisnis: Jurnal Pemikiran Masyarakat Ilmiah Berwawasan Agribisnis*; 4(2): 139-152.
- Istigfaiyah, L. 2018. Identifikasi dan Karakterisasi Mikoriza pada Tegakan *Gmelina arborea*. Skripsi. Fakultas Kehutanan Universitas Hasanuddin. Makasar.
- Idhan, A. 2016. aplikasi mikoriza dan pupuk organik terhadap pertumbuhan tanaman kakao (*Theobroma Cacao* L.) di Kabupaten Gowa. 01(01): 1–11. www.journal.unismuh.ac.id/perspektif
https://journal.ipb.ac.id/index.php/j_kebijakan/article/view/10300
- Juby, S; Jishma, P; & Radhakrishnan, E.K. 2020. Emerging insights on the potential role of plant-associated microorganisms in sustainable agriculture. di *Microbiomes and Plant Health* (pp. 3–28). Elsevier Gezondheidszorg.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819715-8.00001-X>

- Khalimi, K & Wirya, A.S. 2023. Pemanfaatan Plant Growth Promoting Rhizobacteria Untuk Biostimulants dan Bioprotectants. *ECOTROPIC*, 4(2), 131-135.
- Kaswanto, R.L. 2017. Management of landscape services for improving community welfare in West Java, Indonesia. *Landscape Ecology for Sustainable Society* 251–270.
- Mažylytė, R; Kaziūnienė, J; Orola, L; Valkovska, V; Lastauskienė, E. & Gegeckas, A. 2022. Phosphate solubilizing microorganism *Bacillus* sp. MVY-004 and its significance for biomineral fertilizers development in agrobiotechnology. *Biology*; 11(2).
Doi: 10.3390/biology11020254.
- Mucharam, I., E. Rustiadi, A. Fauzi, Harianto. 2022. Signifikansi pengembangan indikator pertanian berkelanjutan untuk mengevaluasi kinerja pembangunan pertanian Indonesia. *Jurnal Risalah Kebijakan Pertanian dan Lingkungan*, 9(2): 61-81.
<https://doi.org/10.29244/jkebijakan.v9i2.28038>
- Mohanty, P; Singh, P.K; Chakraborty, D; Mishra, S. & Pattnaik, R. 2021. Insight into the role of PGPR in sustainable agriculture and environment. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 5, 1-12. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2021.667150>
- Matur, P & Roy, S. 2020. Insight into the plant responses to drought and decoding the potential of root associated microbiome for inducing drought tolerance. *Physiol Plant* 172(2):1016-1029. DOI:10.1111/ppl.13338.
- Marliana, N. & Gusmiatun G. 2020. Uji Efektivitas Ragam Pupuk Hayati untuk Meningkatkan Produktivitas Kedelai di Lahan Lebak. *AGROSAINSTEK: Jurnal Ilmu dan Teknologi Pertanian*; 4(2): 129-136.
- Miftahurrohmat, A. & Sutarman, 2020. Utilization of *Trichoderma* sp. and *Pseudomonas fluorescens* as Biofertilizer in Shade-Resistant Soybean. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*; 821(1): 012002.
- Muslim, A. 2019. Pengendalian Hayati Patogen Tanaman dengan Mikroorganisme Antagonis. Technical Report. UNSRI PRESS, Palembang.

- Mardanova, A.M; Hadieva, G.F; Lutfullin, M.T; Khilyas, I.V; Minnullina, L.F; Gilyazeva, A.G; Bogomolnaya, L.M. & Sharipova, M.R. 2017. *Bacillus subtilis* Strains with Antifungal Activity against the Phytopathogenic Fungi. *Agricultural Sciences*; 8(1): 1-20.
<https://doi.org/10.4236/as.2017.81001>
- Marom, N; Rizal, F. & Bintoro, M. 2017. Uji Efektivitas Saat Pemberian dan Konsentrasi PGPR (Plant Growth Promoting Rhizobacteria) terhadap Produksi dan Mutu Benih Kacang Tanah (*Arachis hypogaea* L.). *Agriprima : Journal of Applied Agricultural Sciences*; 1(2): 174–184.
<https://doi.org/10.25047/agriprima.v1i2.43>
- Malik, M.A. 2012. Phosphorus fractions, microbial biomass and enzyme activities in some alkaline calcareous subtropical soils. *African Journal of Biotechnology*; 11(21). Doi: 10.5897/AJB11.3483.
- Muis, A. 2016. Prospek *Bacillus subtilis* sebagai Agen Pengendali Hayati Patogen Tular Tanah pada Tanaman Jagung. *Jurnal Penelitian dan Pengembangan Pertanian*; 35(1): 37-45.
- Mukamto. S.U., Weda, M., Ahmad, S., Laila, I., Guntur, T. 2015. Isolasi dan Karakterisasi *Bacillus* sp. Pelarut Fosfat dari Rhizosfer Tanaman Leguminosae. , Jurusan Biologi FMIPA Universitas Negeri Surabaya. 3(2): 63.
- Nasir, M; Tadjudin, E; Purnomo, D; Jaenudin, A. & Maryulianna. 2023. Effect of Rhizobium Inoculation and Phosphate Fertilizer on The Growth of Sobybean (*Glycine max*) Grobogan Variety. Program Studi Magister Agronomi Pascasarjana UGJ, Cirebon. *Jurnal Sains Natural*; 13:161 – 167
- Nuridayati, S.S; Prasetya, B & Kurniawan, S. 2019. Perbanyakan Berbagai Jenis Mikoriza Arbuskula di Berbagai Jenis Tanaman Inang. *Jurnal Tanah Dan Sumberdaya Lahan*; 6(2): 1375 -1385. <https://doi.org/10.21776/ub.jtstl.2019.006.2.18>
- Nanda, D; Heru, A.D. & Nur, P. 2018. Eksplorasi, Identifikasi dan Uji Bakteri Antagonis *Bacillus* sp. dari Rizosfer Jagung terhadap Bakteri Layu Stewart. Prosiding Seminar Nasional.
- Naihati, Y.F; Taolin, R.I.C.O. & Rusae, A. 2018. Pengaruh Takaran dan Frekuensi Aplikasi PGPR terhadap Pertumbuhan dan Hasil

- Tanaman Selada (*Lactuca sativa* L.). *Savana Cendana: Jurnal Pertanian Konservasi Lahan Kering*; 3(1): 1-3.
<https://doi.org/10.32938/sc.v3i01.215>
- Pudjiwati, E.H. & Rindiani, R. 2022. Prospek Rizobakteri Penghasil IAA Dan Penyedia Nitrat Sebagai PGPR (Plant Growth Promoting Rhizobacteria). *J-PEN Borneo: Jurnal Ilmu Pertanian*, 5(1).
- Poveda, J. 2021. Trichoderma as biocontrol agent against pests: New uses for a mycoparasite. *Biological Control*, 159, 104634.
<https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2021.104634>
- Ristiana, F; Tumbelaka, M.S & Nangoi, R. 2022. The effect of PGPR (*Plant Growth Promoting Rhizobacteria*) bio fertilization on the growth and production of lettuce (*Lactuca sativa* L.). *J Agro Terapan*, 3(3), 43-51.
<https://doi.org/10.35791/jat.v3i1.38276>
- Rahmi, N. 2017. Keanekaragaman Fungi Mikoriza di Kawasan Hutan Desa Lamteuba Droë Kecamatan Seulimun Kabupaten Aceh Besar. Prosiding Seminar Nasional Biotik.
- Suanda, I.W. 2023a. Hubungan Ekologi Serangga Dengan Sistem Pengendalian Hama Terpadu Pertanian Berkelanjutan *dalam* Buku Ekologi Serangga. Universitas PGRI Mahadewa Indonesia. Penerbit: Get Press Indonesia. Padang Sumatera Barat. hal 131-152.
<https://drive.google.com/file/d/1EsgRceSEAL31k0O8JyBaMik0WJIN9IbK/view?usp=sharing>
- Suanda, I.W. 2023b. Metode Pengambilan Sampel dan Kultur Mikroba dari Lingkungan *dalam* Buku Mikrobiologi Lingkungan. Universitas PGRI Mahadewa Indonesia. Penerbit: Get Press Indonesia. Padang Sumatera Barat. hal 99-115.
https://drive.google.com/file/d/1PmIghNLFV_jN-YVvyef7DPdViCBD9Kfr/view?usp=sharing
- Suanda, I.W. 2023c. Pengembangan “TANTERIKA” Terintegrasi Hasilkan Pangan Sehat dan Berkelanjutan. Prosiding SANTIMAS Universitas PGRI Mahadewa Indonesia. Bali

<https://ojs.mahadewa.ac.id/index.php/santimas/article/view/3563>

Suanda, I.W; Martanto, E.A; Iriani, F; Nurhayati; Farni, Y; Wirda, Z and Sutiharni. 2023. Integrated pest control strategy (IPM) corncob borer (*Helicoverpa armigera* Hubner): Fertilization and weeding control. Department of Biology Education, University of PGRI Mahadewa Indonesia, Bali, Indonesia. *Caspian Journal of Environmental Sciences*; 21(2): 395-402.

DOI: 10.22124/CJES.2023.6532

https://cjes.guilan.ac.ir/article_6532_7bbf86c99b3607b8307c0d782242861d.pdf

https://drive.google.com/file/d/1RQyQuEwhgFQ_ohczQkeGqXJnR7DNmFQ/view?usp=sharing

Suanda, I.W; Kartika, I.M; Sukendra, I.K. & Widnyana, I.K. 2022. Pemberdayaan Masyarakat untuk Meningkatkan Pendapatan dalam Budidaya Stroberi Sehat dan Ramah Lingkungan. Universitas PGRI Mahadewa Indonesia. Denpasar. Jurnal Pengabdian Masyarakat Bestari (JPMB); 1(7): 669-682.

DOI: <https://https://10.55927/jpmb.v1i7.1629>

<https://journal.formosapublisher.org/index.php/jpmb/article/view/1629/1293>

Suanda, I.W. 2021. Manisnya Brotowali sebagai Fitofarmasida. Universitas PGRI Mahadewa Indonesia. Denpasar. Penerbit Klik Media. Lumajang, Jawa Timur. 193 hal.

https://drive.google.com/folderview?id=14LFZTSDwsgqORvHx0phf_Z6NFo6TUBz-

Suanda, I.W. 2020. Bioteknologi Pertanian Mendukung Pertanian Berkelanjutan *dalam* Buku Pertanian Berkelanjutan Sebuah Pendekatan Konsep dan Praktis. Penerbit: Swasta Nulus. 178 hal.

Suanda, I. W. 2019. Pengaruh Pupuk *Trichoderma* sp. dengan Media Tumbuh Berbeda Terhadap Pertumbuhan Vegetatif Tanaman Cabai Merah Besar (*Capsicum Frutescens* L.). *Jurnal Widya Biologi*; 10(01): 1–12.

<https://ejournal.unhi.ac.id/index.php/widyabiologi/article/view/569>

- Suanda, I.W. 2017. Identifikasi Patogen Penyakit Akar Putih pada Tanaman Cengkeh (*Syzygium aromaticum* L) dan Pengendalian Secara Hayati. Disertasi. Program Studi Ilmu Pertanian. Fakultas Pertanian Universitas Udayana. Denpasar.
- <https://e-perpus.unud.ac.id/repositori/disertasi?nim=1290471004>
- Sidhiawan, A.A.P; Sukiman; Sarkono; Hidayati, E. & Suryadi, B.F. 2023. Eksplorasi Potensi *Bacillus* spp. sebagai Bakteri Pemacu Pertumbuhan Tanaman di Hutan Primer Resort Kembang Kuning. Program Studi Biologi Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Mataram. *Bioscientist*; 11(2): 1017-1029.
- Sarkar, B; Kumar, C; Pasari, S. & Goswami, B. 2022. Review On *Pseudomonas fluorescens*: A Plant Growth Promoting Rhizobacteria. *Journal of Positive School Psychology*; 2701-2709
- Sitawati, M.B; Sintawati & Fajriani, S. 2022. Efektivitas *Plant Growth Promotion Rhizobacteria* (PGPR) dan Pupuk NPK terhadap Pertumbuhan dan Pembungaan Tanaman Aster *Ericoides* (*Symphotrichum ericoides*). *J. Hort. Indonesia*; 13(2): 64-71. <http://doi.org/10.29244/jhi.13.2.64-71>
- Sjaf, S; Kaswanto, R.L; Hidayat, N.K; Barlan, Z.A; Elson, L; Sampean, S & Gunadi, H. 2021. Measuring achievement of sustainable development goals in rural area: a case study of Sukamantri Village in Bogor District, West Java, Indonesia. *Sodality: J. Sosiologi Pedesaan*, 9(2).
- <https://doi.org/10.22500/9202133896>
- Suryaminarsih, P; Megasari, D. & Mujoko, T. 2020. The effect temperature pressure on multiantagonist *Streptomyces* sp., *Trichoderma* sp. biological control of *Fusarium oxysporum* wilt pathogens. Seminar Nasional Magister Agroteknologi Fakultas Pertanian UPN "Veteran" Jawa Timur. *NST Proceedings*; 85-91.
- Doi: 10.11594/nstp.2020.0609
- Suryaminarsih, P; Harijani, W.S; Syafrani, E; Rahmadhini, N. & Hidayat, R. 2019. Aplikasi *Streptomyces* sp. sebagai agen hayati pengendali lalat buah (*Bactrocera* sp.) dan *Plant*

Growth Promoting Bacteria (PGPB) pada tanaman tomat dan cabai. *Agrium*; 22(1): 62-69

<https://doi.org/10.30596/agrium.v21i3.2456>

Sahu, P.K; Singh, D.P; Prabha, R; Meena, K.K. & Abhilash, P.C. 2018. Connecting microbial capabilities with the soil and plant health: Options for agricultural sustainability. *Ecological Indicators*, S1470160X18304357-. doi:10.1016/j.ecolind.2018.05.084

Santos-Medellín. C; Edwards, J; Liechty, Z; Nguyen, B & Sundaresan, V. 2017. Drought stress results in a compartment-specific restructuring of of the rice root-associated microbiomes. *mBio* 8: e00764-17.

DOI:10.1128/mbio.00764-17

Spohn, M. & Widdig, M. 2017. Turnover of carbon and phosphorus in the microbial biomass depending on phosphorus availability. *Soil Biology and Biochemistry*; 113, pp. 53–59. doi: 10.1016/J.SOILBIO.2017.05.017.

Saputri, Y.E; Aneloi, Z; Suwirmen, N; Fisiologi, L & Biologi, T.J. 2016. Respon Pertumbuhan Tanaman *Desmodium heterophyllum* Willd D.C dengan Pemberian Fungi Mikoriza Arbuskular (FMA) pada Tanah Lahan Bekas Tambang Batubara Sawahlunto. *Jurnal Biocelebes*; 10(2): 1978–6417.

Sutarman. 2016. Seleksi Trichoderma spp dari Bawah Tegakan Pinus dan Uji Daya Dukung Isolat Terpilih Terhadap Pertumbuhan Tomat dan Sawi. hal. 125-134 dalam Prosiding Konser Karya Ilmiah Nasional; Salatiga, 4 Agustus 2016.

Sari, R. & Prayudyaningsih, R. 2015. Rhizobium: Pemanfaatannya sebagai Bakteri Penambat Nitrogen. *Info Teknis EBONI*; 12(1): 51–64.

Shailendra Singh, G. G. 2015. *Plant Growth Promoting Rhizobacteria* (PGPR): Current and Future Prospects for Development of Sustainable Agriculture. *Journal of Microbial & Biochemical Technology*; 07(02).

<https://doi.org/10.4172/1948-5948.1000188>

Suharno; Sancayaningsih, R.P; Soetarto, E. S., & Kasiamdari, R.S. 2014. Keberadaan fungi mikoriza arbuskula di Kawasan Tailing Tambang Emas Timika sebagai upaya rehabilitasi

- lahan ramah lingkungan. *Jurnal Manusia dan Lingkungan*; 21(3): 295–303.
- Suharno & Sancayaningsih, R.P. 2013. Fungi Mikoriza Arbuskula: Potensi teknologi mikorizoremediasi logam berat dalam rehabilitasi lahan tambang. *Jurnal Bioteknologi*; 10(1): 23–34. <https://doi.org/10.13057/biotek/c100104>
- Sufardi, S & Karnilawati. 2013. Organic Ameliorant and Mycorrhiza Increase Soil Phosphate Status and Maize Yield on Andisol. *Jurnal Agrista*; 17(1): 1–48.
- Setiadi, Y. & Setiawan, A. 2011. Studi Status Fungi Mikoriza Arbuskula di Areal Rehabilitasi Pasca Penambangan Nikel. *Jurnal Silvikultur Tropika*; 03(01): 88–95.
- Srivastava, R; Khalid, A; Singh, U.S. & Sharma, A.K. 2010. Evaluation of arbuscular mycorrhizal fungus, *Pseudomonas fluorescent* and *Trichoderma harzianum* formulation against *Fusarium oxysporum* f. sp. *lycopersici* for the management of tomato wilt. *Biological Control*; 55: 24–31.
- Sugito, T. *et al.* 2010. Soil microbial biomass phosphorus as an indicator of phosphorus availability in a Gleyic Andosol. *Soil Science and Plant Nutrition*; 56(3): 390–398. doi: 10.1111/J.1747-0765.2010.00483.X.
- Timofeeva, A; Galyamova, M. & Sedykh, S. 2022. Prospects for Using Phosphate-Solubilizing Microorganisms as Natural Fertilizers in Agriculture. *Plants*; 11(16), 2119. Doi: 10.3390/PLANTS11162119.
- Thant, S; Aung, N.N; Aye, O.M; Oo, N.N; Htun, T.M.M; Mon, A.A; Mar, K.T; Kyaing, K; Oo, K.K; Thywe, M; Phwe, P; Hnin, T.S.Y; Thet, S.M. & Latt, Z.K. 2018. Phosphate Solubilization of *Bacillus Megaterium* Isolated from Non-Saline Soils under Salt Stressed Conditions. *Journal of Bacteriology & Mycology*; 6(6): 335–341. <https://doi.org/10.15406/jbmoa.2018.06.00230>
- Vinale, F; Sivasithamparam, K; Ghisalberti, E.L; Marra, R; Barbetti, M.J; Li, H; Woo, S.L. & Lorito, M. 2008. A novel role for *Trichoderma* secondary metabolites in the interactions with plants. *Physiol. Mol. Plant Pathol.* 72: 80–86.

- Widnyana, I.K; Suanda, I.W & Ariati, P.E.P. 2023. Eksplorasi, Isolasi & Pemanfaatan PGPR (*Plant Growth Promoting Rizobacteria*) pada Tanaman Padi. Universitas Mahasaraswati (Unmas Press). Denpasar. 72 hal.
- Widnyana, I.K; Suanda, I.W dan Ariati, P.E.P. 2022. Modul: Eksplorasi dan Isolasi PGPR (*Plant Growth Promoting Rizobacteria*) dari Kelompok *Bacillus* sp. dan *Pseudomonas* spp. dari Akar Bambu dengan Media Selektif. Fakultas Pertanian Universitas Mahasaraswati. Denpasar. 15 hal.
- Widnyana, I.K; Ariati, P.E.P. & Suanda, I.W. 2021. The Effect of Seed Soaking with Suspensions of *Pseudomonas alcaligenes* and *Bacillus* on the Growth and Yield of Bitter Melon (*Momordica charantia* L.) in a Greenhouse. Proceeding: The First Asian PGPR Indonesian Chapter International e-Conference 2021. DOI: 10.18502/kls.v7i3.11164. Page: 593-606
<https://knepublishing.com/index.php/KnELife/article/view/11164/18079>
- Wijaya, O; Juniawan, W. & Widodo. 2022. Alternatif Kebijakan Ketahanan Pangan Wilayah Kabupaten Banyumas dengan Pendekatan Cluster Analysis, Jurnal Risalah Kebijakan Pertanian dan Lingkungan, 9(3), 133-148.
<https://doi.org/10.29244/jkebijakan.v9i3.32799>
- Widyati, E. 2013. Dinamika Komunitas Mikroba di Rizosfer dan Kontribusinya terhadap Pertumbuhan Tanaman Hutan. *Tekno Hutan Tanaman*; 6(2): 56-64.
- Yogaswara, Y., Suharjo, R., Dirmawati, S.R., & Ginting, C. 2020. Uji kemampuan isolat jamur *Trichoderma* spp. sebagai antagonis *Ganoderma boninense* dan *Plant Growth Promoting Fungi* (PGPF). Jurnal Agrotek Tropika, 8(2), 235
<https://doi.org/10.23960/jat.v8i2.3904>
- Yanti, Y; Habazar, T; Reflinaldon; Nasution, C.R. & Felia, S. 2017. Indigenous *Bacillus* spp. Ability to Growth Promoting Activities And Control Bacterial Wilt Disease (*Ralstonia solanacearum*). *Biodiversitas*; 18(4): 1562-1567.
<https://doi.org/10.13057/biodiv/d180435>
- Youssef, S.A; Tartoura, K.A. & Abdelraouf, G.A. 2016. Evaluation of *Trichoderma harzianum* and *Serratia proteamaculans* effect

- on disease suppression, stimulation of ROS-scavenging enzymes and improving tomato growth infected by *Rhizoctonia solani*. *Biological Control*; 100: 79–86.
- Zerin, T. 2020. Isolation of *Bacillus* spp. from Rhizosphere of garden Soil: Their Potential Role in Amylase Production and Nitrogen Cycle. *Stamford Journal of Microbiology*; 10(1): 12-15.
<https://doi.org/10.3329/sjm.v10i1.50726>
- Zarei, T; Moradi, A; Kazemeini, S.A; Akhgar, A. & Rahi, A.A. 2020. The role of ACC deaminase producing bacteria in improving sweet corn (*Zea mays* L . var *saccharata*) productivity under limited availability of irrigation water. *Nature Research*; 10(20361): 1–12. Doi: <https://doi.org/10.1038/s41598-020-77305-6>
- Zulfiana, D; Krishanti, N.P.R.A; Wikantyoso, B. & Zulfitri, A. 2017. Bakteri Entomopatogen sebagai Agen Biokontrol Terhadap Larva *Spodoptera litura* (F.). *Berita Biologi*; 16(1): 13-21.

BAB 9

MANIPULASI IKLIM MIKRO DALAM PERTANIAN BERKELANJUTAN

Oleh Rivandi Pranandita Putra

9.1 Pendahuluan

Iklim (*climate*) merupakan pola cuaca jangka panjang di suatu wilayah tertentu. Iklim memiliki peranan penting terhadap pertumbuhan dan perkembangan tanaman. Beberapa faktor iklim yang berpengaruh terhadap pertumbuhan dan perkembangan tanaman, antara lain suhu dan kelembapan udara, suhu tanah, curah hujan, intensitas dan panjang penyinaran matahari, serta kecepatan angin. Iklim mikro (*microclimate*) sangat penting karena mengatur dan menentukan reaksi fisiologis tanaman serta proses pertukaran energi antara tanaman dan lingkungan di sekitarnya.

Dengan kejadian perubahan iklim, intensitas dan frekuensi cuaca ekstrem diprediksi akan terus meningkat di masa depan (Kingra & Kaur, 2017). Faktor iklim akan semakin tidak bisa diprediksi, terutama curah hujan (Ranomahera *et al.*, 2020a). Pada beberapa jenis tanaman yang sensitif terhadap cuaca, perubahan iklim akan sangat memengaruhi produktivitasnya (Putra *et al.*, 2021a). Abnormalitas iklim seperti El-Nino dan La-Nina menyebabkan berbagai masalah dalam pertanian, bahkan berujung pada kegagalan tumbuh tanaman maupun gagal panen (Arifien *et al.*, 2022; Puspitasari *et al.*, 2024).

Kegiatan usahatani sangat dipengaruhi oleh iklim dan memerlukan perencanaan yang baik, mulai dari tahapan pengolahan tanah, tanam, pemeliharaan, hingga panen dan pasca panen untuk meminimalkan dan bahkan meniadakan inefisiensi, kegagalan, dan kerugian karena gagal panen (Permana *et al.*, 2023). Misalnya, intensitas cahaya matahari yang cukup dibutuhkan tanaman untuk melakukan proses fotosintesis, namun bila intensitas cahaya matahari terlalu tinggi, tanaman mungkin akan

mengalami stres dan penutupan stomata yang berdampak pada berkurangnya produktivitas (Tanny, 2013). Oleh karena itu, pengetahuan mengenai iklim mikro menjadi penting untuk pengelolaan tanaman yang memadai.

Dalam skala luas, faktor iklim memang sulit atau bahkan tidak dapat dimodifikasi. Namun dalam skala kecil atau mikro, faktor iklim dapat dimodifikasi sesuai dengan kebutuhan tanaman. *Iklim mikro merupakan* iklim yang berbeda dan terlokalisasi di wilayah berskala kecil. Iklim mikro tanaman mencakup kondisi di sekitar tanaman, mulai dari akar hingga tajuk tanaman. Oleh karena lingkungannya yang tidak terlalu luas, maka iklim mikro dapat dimanipulasi. Manipulasi iklim mikro merupakan suatu upaya untuk menciptakan lingkungan menjadi lebih optimal (atau setidaknya lebih baik) untuk mendukung pertumbuhan dan perkembangan tanaman dalam suatu kegiatan pertanian.

Para pembudidaya tanaman perlu memodifikasi beberapa parameter iklim sehingga pertumbuhan hingga produksi tanaman yang ia budidayakan optimal. Manipulasi iklim mikro diharapkan dapat mengurangi ketergantungan petani terhadap perubahan iklim. Misalnya, dengan adanya fenomena El Nino yang acapkali menyebabkan peningkatan suhu permukaan laut dan berkurangnya curah hujan, pembudidaya tanaman perlu memberikan irigasi dengan jumlah dan frekuensi yang lebih sering daripada biasanya.

Modifikasi iklim mikro dapat dikembangkan pada sistem usaha tani di Indonesia melalui penyuluhan yang intensif untuk meningkatkan pengetahuan petani mengenai hal ini. Peran para penyuluh pertanian sangat penting dalam memberikan bimbingan sekaligus motivasi kepada petani. Penyuluhan dapat dilakukan secara langsung melalui tatap muka dengan petani maupun secara daring melalui media *online* (Afrianto *et al.*, 2022).

9.2 Komponen Iklim Mikro

Terdapat beberapa komponen iklim mikro yang berperan penting dalam pertanian, antara lain suhu udara, suhu tanah, kelembapan udara, kecepatan angin, intensitas cahaya matahari, dan penjang penyinaran cahaya matahari. Antar komponen iklim mikro tersebut saling berkaitan satu sama lain, misalnya suhu udara

dan intensitas cahaya yang tinggi berpengaruh terhadap tingginya jumlah air di udara sehingga membuat kelembapan udara menjadi tinggi (Darmayani *et al.*, 2022).

Suhu udara memengaruhi laju perkembangan tanaman dan mengendalikan siklus hidup atau masa pertumbuhan tanaman. Suhu udara sangat memengaruhi proses fisiologis (fotosintesis, respirasi, dan translokasi), proses biokimia (aktivitas enzimatik), serta proses biologis dan fisik (difusi, evaporasi) pada tanaman. Suhu udara maksimum termasuk tekanan uap rendah mempengaruhi fisiologi tanaman dengan berbagai cara. Misalnya, pada suhu udara yang tinggi dan tekanan uap yang rendah, evapotranspirasi akan meningkat, menyebabkan ketidakseimbangan antara air yang diserap oleh akar dan kehilangan air oleh evapotranspirasi sehingga tanaman menjadi layu dan biomassa tanaman menjadi berkurang. Ketika suhu udara tinggi, respirasi juga akan meningkat sehingga laju fotosintesis tanaman akan berkurang signifikan.

Suhu udara yang terlalu tinggi (40°C hingga 60°C) dapat berakibat pada kematian termal sel-sel aktif tanaman serta menghentikan penurunan aktivitas fisiologis tanaman akibat inaktivasi enzim dan protein. Sebaliknya, suhu udara yang terlalu rendah (<4 °C) dapat mengakibatkan aktivitas fisiologis tanaman menjadi terhenti.

Sama seperti suhu udara, suhu tanah juga memengaruhi ketersediaan unsur hara dan penyerapannya oleh akar tanaman. Suhu tanah dipengaruhi oleh penyerapan radiasi matahari, baik secara langsung maupun tidak langsung. Suhu tanah dapat memengaruhi perkecambahan benih, perkembangan akar, dan pertumbuhan tanaman secara keseluruhan. Suhu tanah juga dapat memengaruhi penyerapan air. Suhu tanah yang terlalu rendah dapat memengaruhi penyerapan air yang berdampak buruk terhadap pertumbuhan tanaman. Sementara itu, kenaikan suhu udara dapat mengakibatkan peningkatan aktivitas nitrobakteri dan sebagian besar organisme heterotrofik serta peningkatan laju dekomposisi dan mineralisasi bahan organik.

Kelembapan udara juga merupakan salah satu komponen iklim mikro yang berpengaruh terhadap pertumbuhan dan perkembangan tanaman. Kelembapan udara yang cukup rendah cocok untuk pembentukan benih pada berbagai jenis tanaman, asalkan pasokan kelembaban tanah mencukupi. Sementara itu, kondisi kelembapan udara yang tinggi dapat menyebabkan serbuk sari tidak dapat tersebar dari kepala sari. Kelembapan udara yang tinggi juga acapkali berakibat pada meningkatnya insiden hama dan penyakit tanaman karena memudahkan perkecambahan spora jamur.

Kelembapan udara juga memengaruhi laju fotosintesis tanaman. Pada saat kelembapan udara rendah, transpirasi menjadi meningkat yang mengakibatkan terjadinya defisit air pada tanaman. Defisit air ini kemudian berakibat pada penutupan sebagian atau seluruh stomata dan meningkatkan resistensi mesofil sehingga menghalangi masuknya karbon dioksida.

Komponen iklim mikro lain yang memengaruhi pertumbuhan dan perkembangan tanaman adalah kecepatan angin. Angin mempengaruhi tanaman secara langsung dengan meningkatkan transpirasi. Angin juga dapat meningkatkan turbulensi di atmosfer sehingga meningkatkan pasokan CO_2 ke tanaman dan menghasilkan fotosintesis yang lebih besar. Meskipun demikian, ada beberapa risiko yang mungkin ditimbulkan oleh adanya angin, antara lain:

1. Angin dengan kecepatan tertentu dapat mengakibatkan kerusakan mekanis pada tanaman, seperti bergugurannya daun, bunga, dan/atau buah, patahnya dahan, dan tumbangannya tanaman.
2. Apabila angin hangat bertiup terus menerus, hal ini tidak menguntungkan bagi penyerbukan dan pembuahan.
3. Angin bisa saja membawa patogen, serangan, dan serbuk sari gulma dari satu daerah ke daerah lain.

Intensitas cahaya matahari juga merupakan komponen iklim mikro yang sangat berpengaruh terhadap pertumbuhan dan perkembangan tanaman. Seperti diketahui, cahaya matahari merupakan sumber energi untuk semua proses fisik yang terjadi di

atmosfer. Energi ini juga mendorong proses fotosintesis, penguapan, serta pemanasan tanah dan udara. Energi matahari menyediakan cahaya yang dibutuhkan untuk perkecambahan biji, perluasan daun, pertumbuhan batang dan tunas, pembungaan, pembuahan, serta kondisi termal yang diperlukan untuk fungsi fisiologis tanaman.

Intensitas cahaya matahari erat kaitannya dengan radiasi matahari. Radiasi matahari dapat diklasifikasikan menjadi radiasi matahari langsung dan tersebar. Radiasi matahari langsung merupakan radiasi yang diterima langsung dari matahari oleh permukaan. Sementara itu, radiasi tersebar atau radiasi langit merupakan radiasi yang dihamburkan oleh partikel tersuspensi.

Secara umum, kecukupan cahaya matahari menjadi hal penting yang harus bisa terpenuhi dalam budidaya tanaman pertanian (Putra *et al.*, 2021b). Kekurangan cahaya matahari dapat berakibat pada terganggunya proses fotosintesis tanaman. Kekurangan cahaya matahari juga dapat mengakibatkan etiolasi, yaitu suatu kondisi di mana pertumbuhan tanaman menjadi tidak normal, seperti batang tidak kokoh, daun kecil, dan tanaman tampak pucat. Sementara itu, radiasi cahaya matahari yang terlalu tinggi juga dapat menyebabkan laju evapotranspirasi menjadi tinggi, oksigenasi rendah, dan munculnya risiko salinasi atau penggaraman tanah (Azmi *et al.*, 2022).

Namun meskipun begitu, satu hal penting yang perlu dicatat, tidak semua tanaman menghendaki intensitas cahaya matahari yang tinggi. Ada beberapa jenis tanaman yang justru membutuhkan intensitas cahaya yang rendah atau suasana yang redup. Berdasarkan kebutuhan cahayanya, tumbuhan dapat diklasifikasikan menjadi C3, C4, dan CAM. Ketiga jenis tumbuhan ini mempunyai reaksi fisiologis yang berbeda terhadap pengaruh intensitas, kualitas, serta panjang penyinaran cahaya matahari.

1. Tumbuhan C3 tumbuh baik pada lokasi dengan intensitas cahaya matahari yang rendah. Tumbuhan C3 memiliki proses fotosintesis paling sederhana dan laju fotosintesisnya cenderung rendah karena tanaman tidak menggunakan banyak energi. Tumbuhan C3 tidak mempunyai adaptasi fotosintesis untuk mengurangi laju

fotorespirasi. Adapun contoh tumbuhan ini adalah padi, kedelai, dan gandum.

2. Sebaliknya, tumbuhan C4 tumbuh baik pada lokasi dengan intensitas cahaya matahari penuh. Tumbuhan C4 memiliki laju fotosintesis yang tinggi. Contoh tumbuhan C4 adalah jagung, sorgum, dan tebu.
3. Tumbuhan CAM merupakan tumbuhan yang melakukan fotosintesis menggunakan lintasan *crassulacean acid metabolism* (CAM) untuk meminimalkan laju fotorespirasi. Tumbuhan CAM membuka stomata pada malam hari untuk menyerap CO₂ dan menutup stomata pada siang hari. Contoh tumbuhan CAM adalah kaktus, nanas, dan anggrek.

Komponen iklim mikro lain yang berperan penting terhadap pertumbuhan dan perkembangan tanaman adalah panjang penyinaran matahari (fotoperiode). Beberapa proses fisiologis tanaman seperti laju produksi daun, pembungaan, dan lain sebagainya sangat ditentukan oleh durasi sinar matahari. Kebutuhan panjang penyinaran matahari pada setiap jenis tanaman berbeda-beda. Berdasarkan kebutuhan panjang penyinaran matahari yang diperlukan untuk inisiasi bunga, tumbuhan diklasifikasikan menjadi tumbuhan hari panjang, hari pendek, dan hari netral.

1. Tumbuhan hari panjang, yaitu tumbuhan yang membutuhkan durasi penyinaran matahari yang panjang. Contohnya adalah gandum, barley, dan oat.
2. Tumbuhan hari pendek, yaitu tumbuhan yang memerlukan durasi penyinaran matahari yang pendek. Contohnya yaitu padi, sorgum, dan jagung.
3. Tanaman hari netral, yaitu tumbuhan yang tidak terpengaruh oleh panjang penyinaran matahari. Contohnya adalah kapas.

9.3 Model Manipulasi Iklim Mikro dalam Pertanian

Seperti yang telah dijabarkan sebelumnya, manipulasi iklim mikro bertujuan untuk mempertahankan kondisi optimal untuk pertumbuhan tanaman dan produksi tanaman yang lebih baik. Hal ini dapat dicapai dengan melakukan penyesuaian di tingkat lapangan, baik penyesuaian jangka pendek maupun jangka panjang.

1. Penyesuaian jangka pendek, misalnya melalui pengaturan waktu tanam yang tepat, pengaturan jarak tanam, rotasi tanaman, pemilihan jenis dan varietas tanaman, penyesuaian pengolahan tanah dan metode penanaman, serta aplikasi mulsa.
2. Penyesuaian jangka panjang, misalnya melalui penggunaan penahan angin, pengendalian keseimbangan air, tumpang sari, dan lain sebagainya. Upaya-upaya jangka panjang ini diharapkan dapat menciptakan iklim mikro tanaman yang menguntungkan dengan mengurangi suhu ekstrem, menjaga kelembaban tanah, dan meningkatkan intersepsi radiasi.

Terdapat dua model modifikasi iklim mikro, antara lain:

1. Modifikasi iklim mikro terkendali penuh
2. Modifikasi iklim mikro semi terkendali.

Model modifikasi iklim mikro pertama yaitu terkendali penuh. Pada model ini, modifikasi iklim mikro dilakukan di dalam suatu bangunan tertutup (seperti rumah kaca tertutup). Melalui rumah kaca ini, berbagai parameter iklim seperti suhu, kelembapan, cahaya, dan kecepatan angin dapat dikendalikan sesuai dengan persyaratan tumbuh suatu jenis tanaman. Misalnya, suhu dan kelembapan udara dapat diatur sedemikian rupa dengan menggunakan *air conditioner* (AC), curah hujan diatur melalui sistem irigasi otomatis, dan intensitas dan radiasi cahaya diatur dengan menggunakan lampu dengan warna dan tingkat kecerahan tertentu. Mengingat pentingnya cahaya untuk proses fotosintesis, maka cahaya buatan yang digunakan sebaiknya memiliki kemampuan sebagai spektrum emisi, efisiensinya tinggi, dan bebas dari radiasi termal, misalnya *fluorescent* (Ariffin *et al.*, 2020).

Melalui modifikasi iklim mikro secara terkendali penuh seperti ini, usaha pertanian menjadi tidak tergantung lagi terhadap perubahan musim. Model ini juga memungkinkan penanaman tanaman tropis di negara dengan empat musim, misalnya pisang telah umum dibudidayakan di berbagai rumah kaca di Belanda. Namun, model modifikasi terkendali penuh juga memiliki kekurangan, yaitu membutuhkan banyak biaya terutama dalam penggunaan energi listrik.

Model modifikasi iklim mikro kedua yaitu semi terkendali yang dilakukan terhadap satu atau dua unsur iklim di alam terbuka. Model ini disebut sebagai semi terkendali karena tidak mungkin atau sulit untuk dapat mengendalikan semua parameter iklim secara luas di alam atau suatu areal terbuka. Misalnya, upaya mengendalikan suhu tanah agar perbedaan antara suhu tanah pada siang dan malam hari tidak terlalu jauh. Berbagai upaya yang dapat dilakukan untuk memanipulasi iklim mikro akan dijelaskan pada subbab berikutnya.

9.4 Upaya-Upaya Manipulasi Iklim Mikro Semi Terkendali dalam Pertanian

Mengingat besarnya manfaat dari manipulasi iklim mikro, maka pengetahuan mengenai upaya nyata apa saja yang dapat dilakukan terkait hal tersebut menjadi sesuatu yang penting. Dalam sub bab ini dibahas mengenai berbagai upaya yang dapat dilakukan untuk memanipulasi iklim mikro dalam pertanian. Jenis manipulasi yang perlu dilakukan di suatu lahan pertanian dapat menyesuaikan kebutuhan sesuai jenis tanaman yang dibudidayakan dan kondisi iklim *existing* di lahan yang akan digunakan untuk membudidayakan tanaman tersebut.

Modifikasi iklim mikro pertanian dapat dilakukan tanpa mengeluarkan banyak dana dengan melakukan perubahan atau penyesuaian sederhana dalam manajemen dan pengelolaan tanaman. Manipulasi iklim mikro semi terkontrol dapat dilakukan melalui manajemen dan pengelolaan tanaman yang tepat. Manajemen pengelolaan tanaman seperti penentuan waktu tanam, cara tanam, jarak tanam, tumpangsari, pengolahan tanah, pemberian mulsa, pengelolaan irigasi, dan lain sebagainya dapat

mempengaruhi beberapa komponen iklim mikro, seperti suhu udara dan tanah, kanopi, kecepatan angin, kelembaban tanah, intersepsi cahaya, tingkat kehilangan air, dan lain sebagainya. Oleh karena itu, dengan melakukan beberapa penyesuaian dalam manajemen dan pengelolaan tanaman, kita sebenarnya sudah dapat memodifikasi iklim mikro.

1. Irigasi atau pengairan

Irigasi atau pengairan merupakan upaya untuk mengatasi rendahnya curah hujan yang tidak dapat memenuhi kebutuhan tanaman. Seperti diketahui, kekeringan yang disebabkan oleh curah hujan yang rendah dapat menurunkan performa serta produksi tanaman. Kecukupan air pada budidaya tanaman penting karena dapat mengakibatkan kehilangan hasil yang cukup signifikan bila mengalami kekeringan terutama pada fase kritis tanaman (Dewi *et al.*, 2022). Kebutuhan air dapat dipasok melalui upaya penambahan air (kegiatan irigasi). Irigasi dilakukan terutama pada lahan kering dengan curah hujan yang rendah. Pada lahan kering, ketersediaan air seringkali menjadi masalah. Apabila di sekitar lahan tersebut tidak ada sumber air yang dapat dimanfaatkan sebagai sumber irigasi, maka dapat dilakukan pembuatan embung atau sumur bor. Irigasi harus dilakukan secara efisien, terutama pada lahan kering, dengan tujuan untuk memaksimalkan efisiensi penggunaan air (*water use efficiency*/WUE) dan meminimalkan biaya operasional. Pemberian air irigasi yang efisien perlu diperhatikan untuk dapat beradaptasi terhadap perubahan iklim (Sonkar *et al.*, 2020). Terdapat beberapa metode irigasi yang dapat dipilih, seperti irigasi tetes, irigasi pancaran (*sprinkler*), irigasi permukaan, irigasi pompa air, dan lain sebagainya. Pemilihan jenis irigasi ini didasarkan pada berbagai faktor, misalnya karakteristik tanah (Ranomahera *et al.*, 2020b). Di samping pemilihan jenis irigasi, hal penting lain dalam manajemen irigasi adalah penjadwalan dan perhitungan estimasi kebutuhan air irigasi untuk menentukan kapan dan berapa banyak air

yang diperlukan agar dapat meningkatkan hasil panen secara optimal (Permana *et al.*, 2023).

2. Hujan buatan (*artificial rain*)

Selama ini, teknologi hujan buatan sering dimanfaatkan untuk mengatasi bencana kebakaran hutan. Namun, teknologi hujan buatan ini juga sebenarnya dapat dimanfaatkan untuk kegiatan pertanian. Hujan buatan cocok diterapkan pada suatu lahan kering dengan curah hujan yang tidak mencukupi untuk kebutuhan tanaman, baik karena kondisi alami di wilayah tersebut atau karena terjadinya perubahan iklim. Proses pembuatan hujan buatan dapat dilakukan melalui pesawat udara khusus dengan menyemprotkan material tertentu (misalnya aerosol es kering dan silver iodide) ke bagian atas awan. Material yang diberikan tersebut dapat membantu menstimulasi terbentuknya awan jenuh yang berakibat pada terjadinya hujan.

3. Penggunaan mulsa (*mulching*)

Mulsa adalah material yang sengaja digunakan untuk menutup tanah bedengan atau lahan di sekitar tanaman. Mulsa dapat berupa mulsa organik (jerami, dedaunan, kerikil, dll) dan artifisial (plastik berwarna atau transparan, aluminium foil, serta bahan-bahan kimia seperti aspal lateks cair). Penggunaan mulsa, baik mulsa organik maupun artifisial, dapat membantu mengurangi kehilangan air dari dalam tanah akibat evaporasi (Putra *et al.*, 2021c). Kandungan air tanah pun menjadi lebih stabil. Mulsa juga berkontribusi menurunkan suhu permukaan tanah di bawahnya. Manfaat lain dari penggunaan mulsa adalah dapat menghambat pertumbuhan gulma di sekitar tanaman utama. Kelebihan lain dari upaya ini adalah tidak terlalu banyak memerlukan biaya dan dapat secara praktis diterapkan pada areal yang luas.

4. Aplikasi antitranspiran

Antitranspiran merupakan suatu zat kimia yang dapat diaplikasikan pada daun tanaman dengan tujuan untuk mengurangi laju transpirasi. Antitranspiran cocok diterapkan pada lahan kering dengan sumber air terbatas dan radiasi matahari yang tinggi. Aplikasi antitranspiran juga dapat dilakukan bersamaan dengan pemberian mulsa. Terdapat beberapa jenis antitranspiran, antara lain:

- a. Penutup stomata, yaitu antitranspiran yang bekerja dengan menginduksi penutupan stomata. Seperti diketahui, sebagian besar transpirasi terjadi melalui stomata pada permukaan daun. Contohnya adalah fenil merkuri asetat (PMA) dan Atrazin dalam konsentrasi rendah.
- b. Pembentuk film, yaitu antitranspiran yang berupa bahan plastik/lilin yang membentuk lapisan tipis pada permukaan daun. Contohnya adalah etil alkohol.
- c. Reflektan, yaitu bahan berwarna putih yang membentuk lapisan pada daun dan meningkatkan reflektansi daun (albedo). Bahan ini dapat membantu memantulkan radiasi dan gradien tekanan uap yang pada akhirnya dapat mengurangi transpirasi. Contohnya adalah kaolin 5% yang dicairkan.
- d. Penghambat pertumbuhan, yakni zat kimia yang dapat mengurangi pertumbuhan tunas dan meningkatkan pertumbuhan akar sehingga memungkinkan tanaman tahan terhadap kekeringan. Zat ini juga dapat menyebabkan penutupan stomata. Contohnya adalah Cycocel.

5. Penggunaan pemecah angin (*wind breaker*)

Pemecah angin (*wind breaker*) merupakan bentuk penghalang angin yang dibuat dari suatu bahan/bangunan buatan atau dapat pula menggunakan jenis tanaman tertentu yang kokoh dan mampu menahan angin. Tujuannya adalah untuk mengurangi kecepatan angin yang berembus di suatu lahan pertanian sehingga tidak mengakibatkan

kerusakan mekanis pada tanaman atau mengakibatkan tanaman menjadi roboh. Kecepatan angin juga dapat memengaruhi suhu udara di sekitar tanaman. Dengan berkurangnya kecepatan angin, maka penguapan air dari dalam tanah dapat berkurang dibandingkan dengan area yang tidak terlindungi. Maka secara tidak langsung pemecah angin dapat berguna sebagai sarana untuk menjaga kandungan air tanah. Pemecah angin cocok diterapkan di daerah dengan angin yang cukup kencang, seperti di kawasan pinggiran pantai atau di kaki gunung.

6. Penggunaan naungan

Naungan dapat dibuat sebagai alat untuk mengurangi intensitas cahaya matahari yang diterima oleh tanaman. Tanaman yang dapat diberikan naungan umumnya merupakan jenis tanaman C3 yang menyukai naungan atau tidak membutuhkan terlalu banyak cahaya matahari, misalnya kacang-kacangan, kopi, jahe, dan beberapa jenis tanaman sayur. Penurunan intensitas cahaya matahari akibat adanya naungan dapat berpengaruh terhadap penurunan suhu udara dan tanah serta laju evapotranspirasi di sekitar pertanaman. Naungan yang digunakan dapat berupa material alami (jerami, alang-alang, dll), material buatan (sungkup, agronet, jala plastik hitam, dll), atau tanaman penaung yang memiliki tajuk rindang. Beberapa contoh tanaman penaung yang umum digunakan, antara lain lamtoro (*Leucaena glauca* L.), sengan (*Albizia falcata* Backer), orok-orok (*Crotalaria* sp.), dan lain sebagainya. Beberapa penelitian terdahulu telah memperlihatkan dampak positif penggunaan naungan terhadap pertumbuhan dan hasil tanaman C3. Misalnya, Gogo *et al.* (2014) menemukan bahwa penggunaan agronet dapat meningkatkan hasil dan kualitas buncis melalui peningkatan iklim mikro dan pengurangan insiden hama di sekitar tanaman. Khusus untuk penggunaan sungkup plastik, dapat pula dilakukan penggunaan sungkup berwarna. Menurut Silistyaningsih *et al.* (2005), jika cahaya

tampak melalui suatu sungkup atau lembar plastik transparan, maka radiasi matahari yang diloloskan ke bawahnya akan memiliki warna yang sama seperti warna sungkup atau lembar plastik tersebut. Dengan kata lain, tanaman yang dibudidayakan di bawah sungkup akan menerima radiasi sesuai dengan warna sungkup tersebut. Beberapa penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa setiap warna sungkup plastik memberikan pengaruh yang berbeda terhadap pertumbuhan tanaman, meski diperlukan penelitian lebih lanjut untuk mengidentifikasi warna sungkup apa yang paling cocok untuk jenis tanaman tertentu. Sebagai contoh, Sulistyaningsih *et al.* (2005) serta Muamar & Maiyana (2014) menemukan bahwa sungkup merah berpengaruh baik pada pertumbuhan dan hasil tanaman sawi dibandingkan sungkup transparan dan biru.

7. Pemangkasan (*pruning*)

Pada beberapa jenis tanaman terutama tanaman buah dan bunga (kakao, kopi, mawar, dll), dapat dilakukan pemangkasan. Pemangkasan dilakukan dengan cara mengurangi daun/tajuk tanaman. Pemangkasan dapat mengatur iklim mikro seperti intensitas sinar matahari, kelembapan, dan suhu udara (Siregar *et al.*, 2019). Dengan pemangkasan, radiasi matahari dapat masuk semakin banyak ke dalam sistem pertanaman. Pemangkasan juga dapat menjadi strategi untuk mengurangi transpirasi, kelembapan kebun, serta insiden hama dan penyakit tanaman. Di samping itu, ketika bagian-bagian tanaman yang tidak produktif dipangkas atau dikurangi, maka hasil dari fotosintesis akan lebih banyak dialokasikan untuk meningkatkan proses pertumbuhan tanaman seperti pembesaran sel (Gadner *et al.*, 1991).

8. Pengaturan jarak tanam (*row spacing*)

Pengaturan jarak tanam sangat erat kaitannya dengan intensitas cahaya matahari yang dapat diterima oleh tanaman. Pemilihan jarak tanam yang tepat dapat

disesuaikan dengan jenis tanamannya. Ketepatan pemilihan jarak tanam dapat membantu kanopi tanaman menangkap cahaya matahari yang diperlukan untuk pertumbuhannya sehingga produktivitas tanaman dapat menjadi lebih tinggi.

9. Pengaturan sistem tanam

Pengaturan sistem tanam bisa dilakukan melalui beberapa cara, misalnya:

a. Tumpang sari (*intercropping*)

Pada sistem tumpang sari, akan ada lebih banyak kanopi dibandingkan monokultur. Hal tersebut akan berimbas pada berkurangnya penguapan tanah dan suhu tanah dan berkurangnya gulma yang tumbuh karena persaingan cahaya dengan tanaman inti. Di samping itu, kemungkinan terjadinya erosi tanah pun menjadi turun karena air hujan melalui penyaringan kanopi dan struktur akar yang lebih besar. Meskipun demikian, pemilihan jenis tanaman yang tepat pada sistem tumpang sari perlu diperhatikan untuk mencegah kompetisi memperebutkan radiasi cahaya matahari, unsur hara, dan air antara tanaman utama dan tanaman pendampingnya (Putra *et al.*, 2020).

b. Agroforestri/wanatani

Agroforestri merupakan sistem bercocok tanam yang menggabungkan antara tanaman pertanian dan kehutanan. Tanaman pertanian berupa tanaman semusim umumnya ditanam sebagai tanaman sela di sekitar atau di antara barisan pohon. Pohon berperan dalam manipulasi iklim mikro dengan cara mengurangi suhu udara dan tanah, menjaga lengas dan kelembaban tanah, serta meningkatkan kandungan nitrogen dalam tanah. Keberadaan pohon pada sistem agroforestri juga sangat mendukung siklus hidrologi dan pengisian ulang akuifer sehingga mencegah tanaman pertanian dari kekeringan dan juga banjir. Agroforestri juga berperan meningkatkan simpanan karbon dalam biomassa tanaman dan tanah, menjaga atau meningkatkan

kesuburan tanah, mengendalikan erosi tanah, meningkatkan penyerbukan, serta menyediakan pangan, kayu bakar, pakan ternak, obat-obatan, dan berbagai jenis produk lainnya (Kuyah *et al.*, 2016; Kuyah *et al.*, 2017). Meskipun demikian, terdapat pula kelemahan dari sistem agroforestri, yaitu kemungkinan tanaman pertanian ternaungi oleh tanaman kehutanan sehingga tanaman pertanian tidak bisa mendapatkan cahaya matahari secara optimal. Untuk mensiasatinya, dapat dilakukan pemilihan jenis tanaman kehutanan dengan tajuk yang tidak terlalu lebar, pemilihan jenis tanaman pertanian yang tidak membutuhkan cahaya matahari penuh (seperti tebu), dan/atau melalui pengaturan jarak tanam yang sesuai. Tanaman kehutanan juga dapat dipangkas secara periodik selama penanaman dengan tanaman semusim untuk menghindari naungan dan mengurangi kompetisi unsur hara.

c. Sistem pertanaman lorong (*alley cropping*)

Sistem pertanaman lorong sebenarnya termasuk salah satu sistem agroforestri, di mana dilakukan penanaman tanaman semusim atau tanaman pangan di antara lorong-lorong yang dibentuk oleh pagar pohon atau semak. Sistem pertanaman lorong diketahui dapat mengurangi kecepatan angin, intensitas cahaya yang terlalu tinggi, dan limpasan air permukaan (*surface runoff*) (Jacobs *et al.*, 2022).

9.5 Penutup

Iklim merupakan faktor penting dalam pertanian karena memengaruhi proses fisiologis tanaman. Pada berbagai kondisi, anomali iklim dapat menjadi penghambat dalam produksi pertanian, misalnya kekeringan, angin kencang, dan lain sebagainya. Faktor iklim semakin penting untuk diperhatikan terutama dengan adanya isu perubahan iklim. Kabar baiknya, faktor iklim dalam skala mikro merupakan faktor yang dapat dimodifikasi. Iklim mikro tanaman mencakup kondisi di sekitar tanaman, mulai dari akar

hingga tajuk tanaman. Beberapa komponen iklim mikro yang berpengaruh terhadap pertumbuhan dan perkembangan tanaman, antara lain suhu udara, suhu tanah, kelembapan udara, kecepatan angin, intensitas cahaya matahari, dan penjang penyinaran cahaya matahari. Modifikasi iklim mikro bertujuan untuk menciptakan kondisi lingkungan yang sesuai dengan pertumbuhan tanaman sehingga diharapkan tanaman dapat tumbuh dan berproduksi dengan optimal.

Terdapat dua model modifikasi iklim mikro, yaitu modifikasi iklim mikro terkendali penuh dan semi terkendali. Modifikasi iklim mikro terkendali penuh pada umumnya dilakukan di dalam suatu bangunan tertutup, misalnya di dalam rumah kaca. Melalui rumah kaca ini, berbagai parameter iklim seperti suhu, kelembapan, cahaya, dan kecepatan angin dapat dikendalikan sesuai dengan persyaratan tumbuh tanaman yang dibudidayakan. Sementara itu, modifikasi iklim mikro semi terkendali dilakukan pada satu atau beberapa komponen iklim pada lahan terbuka. Beberapa upaya manipulasi iklim mikro semi terkendali dalam pertanian, antara lain irigasi atau pengairan, hujan buatan, penggunaan mulsa, aplikasi antitranspiran, penggunaan pemecah angin (*wind breaker*), penggunaan naungan, dan pengaturan sistem tanam. Manipulasi iklim mikro dapat menjadi salah satu strategi yang adaptif untuk mengatasi kondisi perubahan iklim dan berbagai risiko terkait iklim ekstrem di bidang pertanian.

DAFTAR PUSTAKA

- Afrianto WF, Wati SI, Putra RP, & Hidayatullah T. 2022. Empowerment of farmers through the online extension in improving agricultural information literacy. *Jurnal Pengabdian Magister Pendidikan IPA*, 5(2): 374-378.
- Ariffin, Fajriani S, & Novitasari A. 2020. Strategi Manipulasi Agroekosistem. UB Press, Malang.
- Arifien Y, Putra RP, Wibaningwati DB, Anasi PT, Masnang A, Rizki FH, Suradi AR, Rismaya R, Marlina L, Anggarawati S, Prihatini R, Sunardi, & Indrawati E. 2022. Pengantar Ilmu Pertanian. PT Global Eksekutif Teknologi, Padang.
- Azmi Y, Yulistiyono A, Karyasa TB, Putra RP, Salama SH, Thamrin NT, Septiadi D, Dinata GF, Jumiayati S, & Rizki FH. 2022. Pertanian Terpadu. PT Global Eksekutif Teknologi, Padang.
- Darmayani S, Tribakti I, Musa B, Satriawan D, Rustiah W, Helilusiatiningsih N, Sahabuddin ES, Putra RP, Rahmawati, Dewadi FM, & Cundaningsih N. 2022. Kimia Lingkungan. PT Global Eksekutif Teknologi, Padang.
- Dewi VAK, Putra RP, & Afrianto WF. 2022. Kajian potensi vinase sebagai bahan fertigasi di perkebunan tebu (*Saccharum officinarum* L.). *Sang Pencerah*, 8(1): 187-201.
- Gardner FP, Pearce RB, & Mitchell RL. 1991. Physiology of Plant Cultivation. *Translation Susilo, H. University of Indonesia. Jakarta. p*, 174-205.
- Gogo EO, Saidi M, Ochieng JM, Martin T, Baird V, & Ngouajio M. 2014. Microclimate modification and insect pest exclusion using agronet improve pod yield and quality of French bean. *HortScience*, 49(10): 1298-1304.
- Jacobs SR, Webber H, Niether W, Grahmann K, Lüttschwager D, Schwartz C, Breuer L, & Bellingrath-Kimura SD. 2022. Modification of the microclimate and water balance through the integration of trees into temperate cropping systems. *Agricultural and Forest Meteorology*, 323: 109065.
- Kaur PK & Kingra H. 2017. Microclimatic modifications to manage extreme weather vulnerability and climatic risks in crop production. *Journal of Agricultural Physics*, 17(1): 1-15.

- Kuyah S, Öborn I, Jonsson M, Dahlin AS, Barrios E, Muthuri C, Malmer A, Nyaga J, Magaju C, Namirembe S, Nyberg Y, & Sinclair FL. 2016. Trees in agricultural landscapes enhance provision of ecosystem services in Sub-Saharan Africa. *International Journal of Biodiversity Science, Ecosystem Services & Management*, 12(4): 255-273.
- Kuyah S, Öborn I, & Jonsson M. 2017. Regulating ecosystem services delivered in agroforestry systems. In: Dagar JC, Tewari VP (eds) *Agroforestry: Anecdotal to modern science*. Springer Singapore, Singapore, pp 797–815.
- Muamar MR & Maiyana. 2014. Pengaruh penggunaan sungkup plastik berwarna terhadap pertumbuhan tanaman sawi (*Brassica rapa*). *Jurnal Edukasi dan Sains Biologi*, 3(2): 14-21.
- Permana I, Anggoro O, Carsidi D, Alam S, Sihalohe NK, Killa YM, Wida WA, Putra RP, Mutiara C, Masnang A, Wirda Z, & Elizabeth R. 2022. Kesuburan Tanah dan Pemupukan. PT Global Eksekutif Teknologi, Padang.
- Puspitasari AR, Ariyani D, Putra RP, Widaryanto E, Maghfoer MD, & Tyasmoro SY. 2024. Enhancement of sugarcane maturity using glyphosate and bispyribac sodium as chemical ripeners in wet climate. *BIO Web of Conferences*, 91: 01006.
- Putra RP, Arini N, & Ranomahera MRR. 2021a. Implementation of climate-smart agriculture to boost sugarcane productivity in Indonesia. *Jurnal Penelitian dan Pengembangan Pertanian*, 40(2): 89-102.
- Putra RP, Dewi VAK, & Afrianto WF. 2021b. Serba-Serbi Pertanian Perkotaan. *Insan Cendekia Mandiri*, Solok.
- Putra RP, Ranomahera MRR, Arini N, & Afrianto WF. 2021c. Tindakan pengembalian residu panen tebu untuk meningkatkan kualitas tanah dan produktivitas tebu (*Saccharum officinarum* L.). *Buletin Tanaman Tembakau, Serat & Minyak Industri*, 13(1): 48-66.
- Putra RP, Ranomahera MRR, Rizaludin MS, Supriyanto R, & Dewi VAK. 2020. Investigating environmental impacts of long-term monoculture of sugarcane farming in Indonesia through DPSIR framework. *Biodiversitas*, 21(9): 4945-4958.

- Ranomahera MRR, Nugroho BDA, Riajaya PD, & Putra RP. 2020a. Using global climate indices to predict rainfall and sugarcane productivity in drylands of Banyuwangi, East Java, Indonesia. *Indonesian Journal of Agricultural Science*, 21(2): 78-88.
- Ranomahera MRR, Puspitasari AR, Putra RP, Gustomo D, & Winarsih S. 2020b. Agronomic performance and economic benefits of sugarcane (*Saccharum officinarum* L.) under drip irrigation for sandy and clay soils in East Java, Indonesia. *Jurnal Tanah dan Iklim*, 44(2): 141-153.
- Siregar SR, Hayati E, & Hayati M. 2019. Respon pertumbuhan dan produksi melon (*Cucumis melo* L.) akibat pemangkasan dan pengaturan jumlah buah. *Jurnal Ilmiah Mahasiswa Pertanian Unsyiah*, 4(1): 202-209.
- Sonkar G, Singh N, Mall RK, Singh KK, & Gupta A. 2020. Simulating the impacts of climate change on sugarcane in diverse agro-climatic zones of Northern India using CANEGRO-sugarcane model. *Sugar Tech*, 22: 460-472.
- Sulistyaningsih E, Kurniasih B, & Kurniasih E. 2005. Pertumbuhan dan hasil caisin pada berbagai warna sungkup plastik. *Ilmu Pertanian*, 12(1): 65-76.
- Tanny J. 2013. Microclimate and evapotranspiration of crops covered by agricultural screens: A review. *Biosystems Engineering*, 114(1): 26-43.

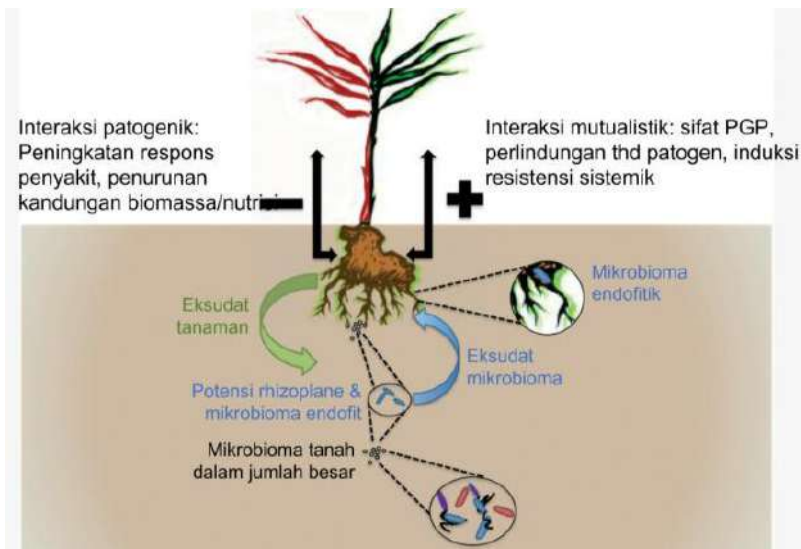
BAB 10

MIKROBIOM DAN KOMUNITAS SINTETIK

Oleh Indah Sriwahyuni

10.1 Pendahuluan

Saat ini populasi makhluk hidup semakin hari semakin padat dan jumlahnya semakin meningkat. Hal ini tentu mempengaruhi keadaan sumber daya alam seperti air dan tanah yang jumlahnya akan menjadi terbatas akibat penggunaannya yang semakin banyak bagi seluruh makhluk hidup. Maka dari itu dengan kondisi saat ini perlu dilakukannya penggunaan sumber daya alam dengan cara yang seefesien mungkin untuk meminimalisir dampak negative dari padatnya populasi makhluk hidup saat ini. Sistem pertanian berkelanjutan perlu diterapkan untuk menimalisir dampak tersebut. Pada penerapan sistem pertanian berkelanjutan yang mengutamakan prinsip keamanan makhluk hidup serta ramah lingkungan maka salah satunya juga dengan penerapan pada pemanfaatan mikrobiom dan komunitas sintetik. Mikrobiom merupakan kumpulan mikroorganisme contohnya seperti virus, jamur, dan bakteri pada suatu ekosistem tertentu. Komunitas mikroba tanah memiliki peran yang sangat penting pada kesehatan tanaman, agar tanaman dapat beradaptasi dengan cepat terhadap berbagai macam cekaman baik abiotik maupun biotik (Abdul Rahman et al., 2021). Keseburun tanah dipengaruhi oleh mikrobioma tanah.



Gambar 10.1. (Mikrobioma Tanah)

(Sumber:<https://www.swadayaonline.com/artikel/12138/Teknologi-Mikrobioma-Mendukung-Praktik-Pertanian-Berkelanjutan/>)

Pengelolaan tanah pada ekosistem pertanian bergantung pada banyak masukan kimia sintetis untuk meningkatkan profitabilitas dan produktivitas. Namun, penggunaan bahan-bahan kimia secara intensif telah menyebabkan dampak buruk terhadap lingkungan dari skala regional hingga global. Untuk mengurangi masukan bahan kimia dan dampak yang tidak diinginkan terkait pada tanah dan lingkungan, intervensi mikroba sebagai produk biologis menjadi bagian integral dari program pengelolaan nutrisi tanaman serta praktik pengelolaan hama dan penyakit.

Kondisi Tanah yang subur dan sehat menggambarkan keberlanjutan produktifitas agroekosistem. Keberlanjutan sistem produksi di lahan pertanian sangat dibantu oleh keanekaragaman mikroba tanah, yang bekerjasama dengan sistem perakaran tanaman dalam menyediakan bahan pangan. Komunitas mikroba yang berasosiasi dengan tanaman merangsang pertumbuhan tanaman serta menambah ketahanannya untuk menghadapi berbagai cekaman abiotik dan biotik. Keragaman dan jumlah mikroba yang berlimpah pada ekosistem pertanian dipengaruhi oleh sistem pertanian yang diterapkan, yaitu semakin organik

sistem pertanian itu maka terbukti semakin beragam. Hal tersebut dapat memberikan pengaruh pada komposisi, produktivitas, serta keberlanjutan suatu tanaman. Agregat mikroba pada lingkungan tanah adalah mikrobioma (*microbiome*) yang muncul berperan penting bagi komponen utama pertanian berkelanjutan.

10.2 Manfaat Mikrobiom Bagi Tanaman

Mikrobiom berperan penting untuk menjaga unsur hara tanah. Mikrobioma tanah memiliki hubungan terhadap ekosistem tanaman yaitu interaksi antara tanaman dan mikroorganisme. Mikroorganisme berlimpah di tanah pada lapisan tanah dekat akar, rizosfer. Hal itu disebabkan karena tanaman melepaskan berbagai jenis nutrisi. Tanaman mengeluarkan berbagai macam nutrisi yang dibutuhkan oleh mikroorganisme, seperti asam amino, glukosa, fruktosa, dan sukrosa.

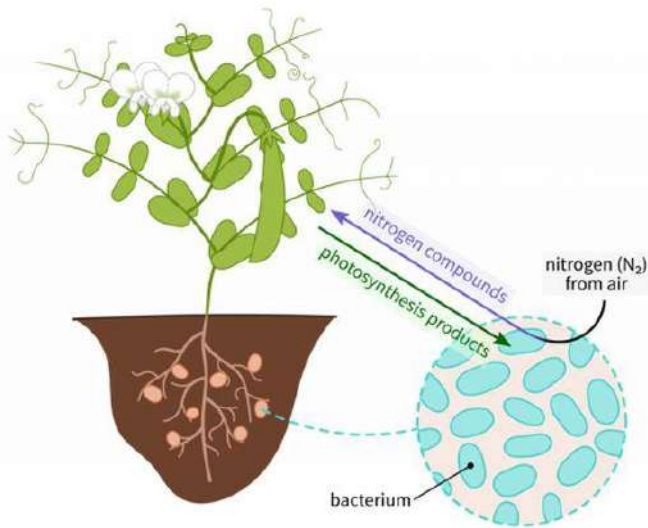
Mikroba yang berperan penting pada suatu mikrobioma dapat diisolasi, diformulasi, serta dikembangkan menjadi produk biologis baru yang disebut dengan pupuk hayati (*biofertilizer*). Mikroba dengan sifat penting sebagai pelarut Fe dan Zn dapat digunakan sebagai biofortifikasi mikronutrien pada jenis-jenis tanaman serealia yang berbeda. Mikroba probiotik, seperti *Lactobacillus*, juga dimanfaatkan sebagai suplemen bagi pertanian berkelanjutan, yaitu memiliki fungsi pelarutan fosfat (PO₄).

Pada permukaan akar terdapat bakteri tanah yang merupakan faktor pendorong untuk menstimulasi pertumbuhan dan perkembangan tanaman melalui produksi dan juga sekresi berbagai bahan kimia pengatur pada lingkup sekitar rizosfer (Ahemad and Kibret 2014). Rizosfer adalah bagian tanah di mana lebih banyak terdapat bakteri di sekitar akar tanaman daripada tanah yang jauh dari akar tanaman (Cahyani T. et al. 2017).

Pada mikrobiom dan tanaman yang ada di lahan terjalin hubungan simbiosis mutualisme, dimana tanaman mengeluarkan nutrisi menuju ke tanah yang menyebabkan mikrobioma di sekitar lapisan rizosfer berupa asam amino, glukosa, fruktosa, dan sukrosa. Zat – zat tersebut dimanfaatkan untuk sumber makanan mikrobioma. Sementara pada keuntungan yang didapat tanaman,

yaitu mikrobioma mampu membuat tanah lebih subur dengan adanya fiksasi nitrogen yang merangsang terbentuknya fitohormon untuk pertumbuhan tanaman. ikrobioma juga mampu melarutkan unsur makro sehingga mudah diserap kembali oleh tanaman. Berikut contoh peranan spesifik mikrobioma dalam tanah pertanian:

1. *Rhizobium* sp., *Clostridium* sp. dan *Azotobacter* sp. bermanfaat untuk fiksasi nitrogen pada udara sehingga mudah diserap tanaman
2. Bakteri *Pseudomonas* dan *Bacillus* serta jamur *Aspergillus* dan *Penicillium* berguna sebagai pelarut fosfat sehingga mudah diserap tanaman.
3. Bakteri *copiotrophic* berperan penting dalam siklus karbon pada tanah pertanian organik.



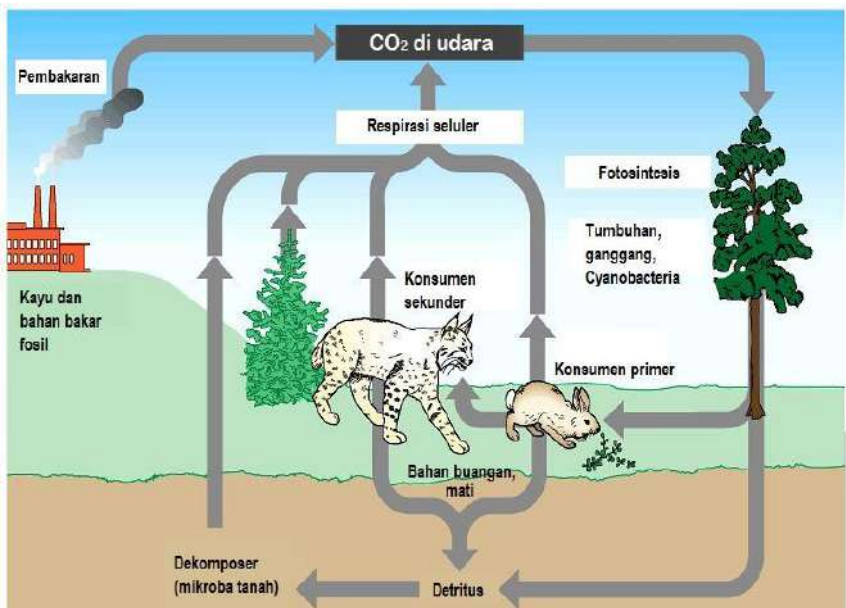
Gambar 10.2. (Simbiosis bakteri *Rhizobium* sp. dengan akar tanaman) (Sumber:

<https://www.kompas.com/skola/read/2023/08/22/160000769/rhizobium-sp.-bakteri-pengikat-nitrogen.>)

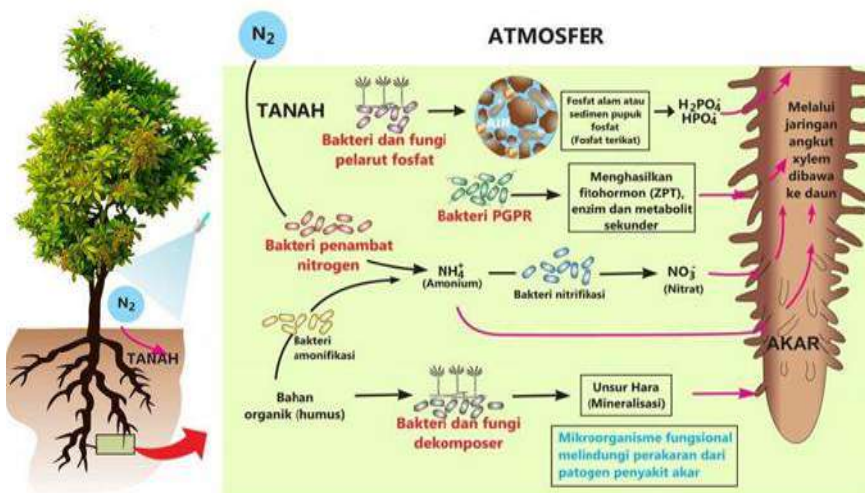
Banyak mikroba yang bermanfaat sebagai pupuk hayati karena kemampuannya dalam mengikat nitrogen dari udara

sehingga dapat membantu tanaman mengakses nutrisi dari pupuk organik. Selain itu, ada jenis mikroba tertentu dapat meningkatkan toleransi terhadap kekeringan, meningkatkan kesehatan tanaman, atau meningkatkan toleransi terhadap garam.

Mikrobiom bagi tanaman memberikan dampak pada peningkatan hasil panen. Selain itu juga dapat mengurangi biaya pupuk. Hasil panen pada tanaman dapat mengalami peningkatan hingga 40 persen dengan adanya mikroorganisme tanah yang bermanfaat atau pupuk hayati ditambahkan ke dalam tanah selama penanaman. Penggunaan mikroba bermanfaat untuk meningkatkan pemanfaatan fosfor dan nitrogen oleh tanaman dapat menghemat biaya dengan mengurangi kebutuhan pupuk mineral. Hal ini juga dapat mengurangi dampak lingkungan dari pemupukan berlebihan.



Gambar 10.3. (Siklus Karbon)

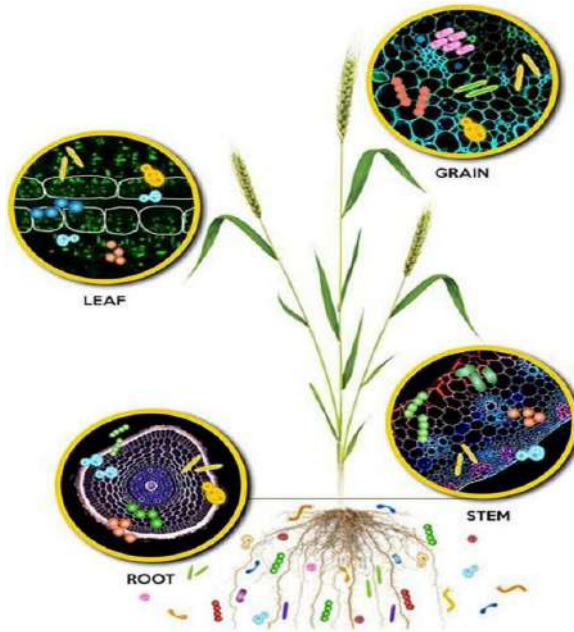


Gambar 10.4. (Mikroorganisme fungsional melindungi perakaran dari patogen penyakit akar)

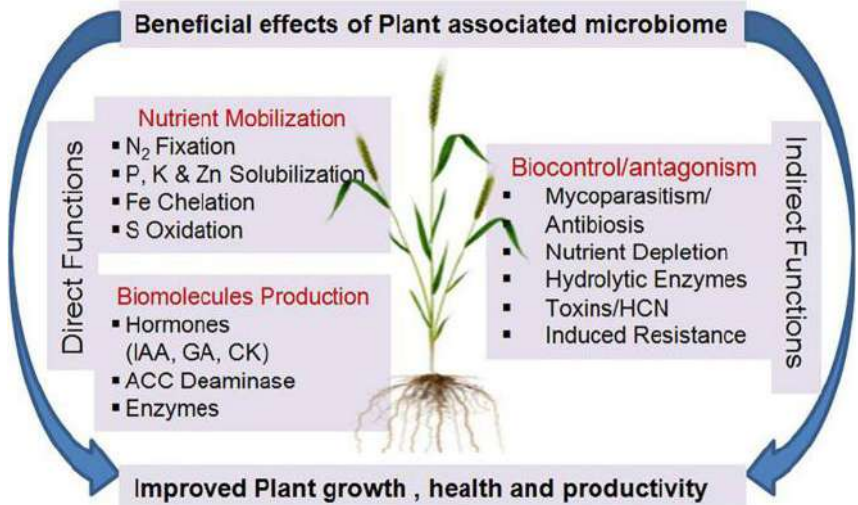
(Sumber ; <https://distanpangan.baliprov.go.id/potensi-bakteri-untuk-produktivitas-lahan-pertanian/>)

10.3 Komunitas Mikroba Sintetik

Komunitas mikroba sintetik meniru komposisi mikroba alami yang biasanya terdapat jumlah komponen berkurang. Akan tetapi untuk dapat menciptakan komunitas mikroba sintetik itu, perlu memahami setiap dasar dan prinsip mengenai komunitas alami dan pemilihan mikroorganisme yang kompatibel dengan sifat kolonisasi.



Gambar 10.5. (Kolonisasi mikroba digambarkan dalam relung tanaman yang berbeda: Rhizosfer, filosfer dan endosfer akar, batang, daun, dan biji-bijian.) (Sumber : Suman et al., 2021)



Gambar 10.6. (Kolonisasi mikroba digambarkan dalam relung tanaman yang berbeda: Rhizosfer, filosfer dan endosfer akar, batang, daun, dan biji-bijian.) (Sumber : Suman et al., 2021)

Komunitas mikroba sintetik meniru komposisi mikroba alami yang biasanya terdapat jumlah komponen berkurang. Akan tetapi untuk dapat menciptakan komunitas mikroba sintetik itu, perlu memahami setiap dasar dan prinsip mengenai komunitas alami dan pemilihan mikroorganisme yang kompatibel dengan sifat kolonisasi. Pada bidang bioteknologi, mikroba direkayasa dan ditanam secara monokultur untuk menjalankan fungsi tertentu, yang memiliki Fungsi yang baru dan diberikan dengan memperkenalkan proses genetik heterolog yang tidak akan terjadi biasanya ditemukan dalam organisme.

Tabel 10.1. Status berbagai inokulan mikroba dikembangkan sebagai komunitas mikroba tersintesis yang digunakan untuk meningkatkan serapan hara dan perlindungan terhadap patogen tanaman.

No.	Mikroorganisme(Bakteri)	Host/Tanaman	Aktivitas PGP
	Single culture inoculation		
1.	<i>Bacillus megaterium</i> TRS-4	Teh	Aktivitas biofertilisasi dan biokontrol untuk mengurangi penyakit busuk akar coklat
2.	<i>Pseudomonas fluorescens</i> GRS1	Kacang Polong	Pelarutan fosfor dan peningkatan produksi biomassa
3.	<i>Bacillus pumilus</i> ES4	Tanah	Fiksasi Nitrogen
4.	<i>Enterobacter cloacae</i> ZSB14	Padi	Pelarutan Zinc dan peningkatan pertumbuhan tanaman
5.	<i>Azospirillum</i> sp. P1AR6-2	Lada Hitam	Pelarutan fosfor seiring dengan peningkatan akar
6.	<i>Paenibacillus polymyxa</i> P2b-2R	Kanola	Fiksasinitrogen, pelarutan fosfat,

No.	Mikroorganisme(Bakteri)	Host/Tanaman	Aktivitas PGP
			produksi antibiotik, dan zat pengatur tumbuh lainnya untuk meningkatkan biomassa tanaman
7.	<i>Pseudomonas fluorescens</i> PGPR1	Kacang Tanah	Produksi siderofor, pelarutan fosfat, peningkatan hasil dan produksi biomassa
8.	<i>Bacillus</i> sp. EUCB 10	Karet	Produksi IAA, pelarutan fosfat, fiksasi nitrogen dan peningkatan produksi biomassa
9.	<i>Herbaspirillum seropedicae</i> ZAE94	Padi	Fiksasi nitrogen dan peningkatan produksi biomassa
10.	<i>Bacillus megaterium</i> B388	Pinus	Produksi IAA, pelarutan fosfat, aktivitas antagonis dan peningkatan produksi biomassa
11.	<i>Pseudomonas fluorescens</i> L321	Kacang Polong	Pelarutan fosfat dan peningkatan produksi biomassa
12.	<i>Bacillus aryabhattai</i> MDSR7	Kacang Kedelai	Pelarutan seng(Zinc), penurunan pH tanah rizosfer, peningkatan dehidrogenase, glukosidase, produksi auksin, biomassa mikroba

No.	Mikroorganisme(Bakteri)	Host/Tanaman	Aktivitas PGP
13.	<i>Acinetobacter</i> sp. AGM3	Padi	Pelarutan seng (Zinc) dan produksi IAA
14.	<i>Bacillus megaterium</i> CDK25	Kotoran Sapi	Pelarutan fosfat, produksi IAA, produksi fitase, produksi siderofor dan peningkatan pertumbuhan tanaman
15.	<i>Rhizobium leguminosarum</i> bv. <i>viciae</i>	Kacang Polong	Peningkatan jumlah bintil, akumulasi N dan fiksasi nitrogen

(Sumber : Suman et al., 2021)

Bioinokulan dimasukkan sebagai pupuk hayati atau bioagen yang merupakan perlindungan pertumbuhan tanaman. Pupuk hayati tersebut mencakup spesies individu *Azotobacter*, *Azospirillum*, dan *Rhizobium*; bakteri pelarut Seng, fosfat, dan kalium; mikoriza vesikular-arbuskular (VAM), dan *Acetobacter*. Tidak hanya bakteri yang mengkolonisasi rhizosfer tetapi juga beberapa bakteri yang mengkolonisasi endosfer telah dieksploitasi karena kontribusinya yang bermanfaat dalam pertanian berkelanjutan (White et al., 2019). Saat ini, bioinokulan sebagian besar tersedia dalam bentuk tunggal (Bashan et al., 2014) namun juga diformulasikan dalam bentuk konsorsium dengan beberapa bakteri dan jamur, yang memiliki sifat PGP yang sinergis untuk meningkatkan produksi dan produktivitas tanaman. Tabel 11.1 merupakan status contoh terkini dari berbagai formulasi mikroba yang dikembangkan menggunakan isolat tunggal, sebagai bioinokulan untuk meningkatkan penyerapan nutrisi atau melindungi terhadap berbagai tekanan biotik dan abiotik (Suman et al., 2021)

DAFTAR PUSTAKA

- Abdul Rahman N. S. N., Abdul Hamid N. W., Nadarajah K. (2021). Effects of abiotic stress on soil microbiome. *Int. J. Mol. Sci.* 22:9036. 10.3390/ijms22169036
- Ahemad, Munees, and Mulugeta Kibret. 2014. 'Mechanisms and Applications of Plant Growth Promoting Rhizobacteria: Current Perspective'. *Journal of King Saud University – Science* 26 (1): 1–20. <https://doi.org/10.1016/j.jksus.2013.05.001>.
- Bashan Y., de-Bashan L. E., Prabhu S. R., Hernandez J. P. (2014). Advances in plant growth-promoting bacterial inoculant technology: formulations and practical perspectives (1998-2013). *Plant Soil* 378 1–33. 10.1007/s11104-013-1956-x
- Cahyani T., Ashifa, Muh. Ichsan Putrayani, Hasrullah, Muh Ersyan, Tita Aulia S., and Abdul Mollah Jaya. 2017. 'Teknologi Formulasi Rhizobakteria Berbasis Bahan Lokal Dalam Menunjang Bioindustri Pertanian Berkelanjutan'. *Hasanuddin Student Journal* 1 (1): 16–21. <http://journal.unhas.ac.id/index.php/jt/>.
- Distanpangan.baliprov.go.id. 2023. Potensi Bakteri Untuk Produktivitas Lahan Pertanian. <https://distanpangan.baliprov.go.id/potensi-bakteri-untuk-produktivitas-lahan-pertanian/>.
- Suman A, Govindasamy V, Ramakrishnan B, Aswini K, SaiPrasad J, Sharma P, Pathak D, Annapurna K. Microbial Community and Function-Based Synthetic Bioinoculants: A Perspective for Sustainable Agriculture. *Front Microbiol.* 2022 Mar 11;12:805498. doi: 10.3389/fmicb.2021.805498. PMID: 35360654; PMCID: PMC8963471.
- swadayaonline.com. 2022. Teknologi Mikrobioma Mendukung Praktik Pertanian Berkelanjutan. <https://www.swadayaonline.com/artikel/12138/Teknologi-Mikrobioma-Mendukung-Praktik-Pertanian-Berkelanjutan/>
- Kompas.com. 2023. Rhizobium sp., Bakteri Pengikat Nitrogen. <https://www.kompas.com/skola/read/2023/08/22/160000769/rhizobium-sp.-bakteri-pengikat-nitrogen>.

White J. F., Kingsley K. L., Zhang Q., Verma R., Obi N., Dvinskikh S., et al. (2019). Endophytic microbes and their potential applications in crop management. *Pest. Manag. Sci.* 75 2558–2565. 10.1002/ps.5527

BAB 11

POLUTAN DAN AGROEKOSISTEM

Oleh Victor Bintang Panunggul

11.1 Pendahuluan

Polusi merupakan proses masuknya zat partikel-partikel berbahaya dalam lingkungan. Zat partikel berbahaya dalam lingkungan disebut polutan. Polutan dapat berasal dari atmosfer, udara, tanah dan berbentuk seperti abu vulkanik. Polutan dapat disebabkan oleh aktivitas manusia, seperti pembuangan sampah dilingkungan atau berasal dari limbah yang dihasilkan oleh industri-industri atau pabrik. Hal ini polutan dapat menyebabkan rusaknya kualitas oksigen atau udara, air, serta tanah.

Kendaraan bermotor dapat mengeluarkan polutan berupa asap dari pipa pembuangan. Kawasan industri dan perumahan menghasilkan sampah dan limbah yang dapat mencemari tanah dan air. Pestisida mengandung bahan kimia yang digunakan untuk membunuh gulma dan serangga dapat meresap ke saluran air dan tanah menjadikan tanah kurang sehat, rendah hara serta mengganggu ekosistem.

Udara dan air dapat berperan membawa polusi di lingkungan pertanian. Air laut mempengaruhi migrasi ikan dapat sebagai perantara dalam membawa sumber polutan. Udara dapat sebagai faktor membawa bahan polutan seperti radioaktif yang dilepaskan dalam bentuk reaktor nuklir. Disamping itu, Polusi udara yang disebabkan oleh asap dari pabrik di suatu negara akan terbawa melalui udara ke negara lain.

Ada beberapa faktor utama yang dapat membawa polusi di bidang pertanian diantaranya adalah polusi udara, polusi air, dan polusi tanah yang dapat mempengaruhi agroekosistem lingkungan pertanian.

Agroekosistem adalah ekosistem yang dikelola terutama untuk produksi pangan, bahan bakar atau serat. Agroekologi adalah studi tentang ekosistem pertanian dan sumber daya alam yang

dibutuhkan untuk mempertahankannya. Pertanian ekologis mengharuskan produsen untuk bekerja dalam keterbatasan lingkungan mereka dan menggunakan teknologi untuk mengatasi kendala ekosistem, dan mendapatkan keunggulan kompetitif di pasar. Pengelolaan agroekologi meningkatkan keberlanjutan ekosistem pertanian dengan mencoba memanfaatkan hubungan dan proses ekologi dalam ekosistem yang lebih luas. Agroekologi mempromosikan konservasi tanah dan bahan organik, serta sumber daya lain seperti energi dan air. Agroekosistem mencerminkan keanekaragaman dalam lanskap, melalui integrasi tanaman/ternak dan pemasaran. Mereka juga berupaya memperkuat petani dan komunitasnya dengan mengembangkan pengetahuan pertanian lokal dan membangun ikatan antara petani dan konsumennya.

Polutan

Beberapa faktor utama yang dapat mempengaruhi polusi dalam lingkungan pertanian adalah berikut ini.

11.2 Polusi Udara

Polusi udara dari kawasan industri berdampak negatif pada kesehatan dan lingkungan pertanian sehingga berdampak terhadap kesejahteraan petani. Kerugian ekonomi langsung pada produksi pertanian dan dampak tidak langsung terhadap reseptor lainnya merupakan isu politik dan ilmiah di seluruh dunia (Vlachokostas *et al.*, 2010). Penilaian biaya eksternal tidak hanya memberikan informasi untuk menilai kelayakan ekonomi dari kegiatan industri yang mencemari namun juga dapat berfungsi sebagai masukan untuk pembuatan kebijakan. Ada empat sumber utama pencemar udara berdasarkan aktivitas industri diantaranya: (1) karbon monoksida, oksida belerang, oksida nitrogen dan debu dari proses pembakaran; (2) oksidan fotokimia, karbon monoksida dan asap asam sulfat dari proses stasioner, termasuk tungku, kilang, dan lain-lain; (3) gas organik beracun dari proses Limbah B3.

Polusi udara mempengaruhi produktivitas pertanian dalam dua cara (1) polutan mengganggu reaksi biokimia dan fisiologis tanaman sampai tingkat tertentu, dan (2) hujan asam akibat polusi udara menyebabkan degradasi tanah dan menurunkan konsentrasi

nutrisi yang dibutuhkan tanaman. Dampak ini bersifat kumulatif dan permanen (Wei and Wang, 2021).

11.3 Polusi Air

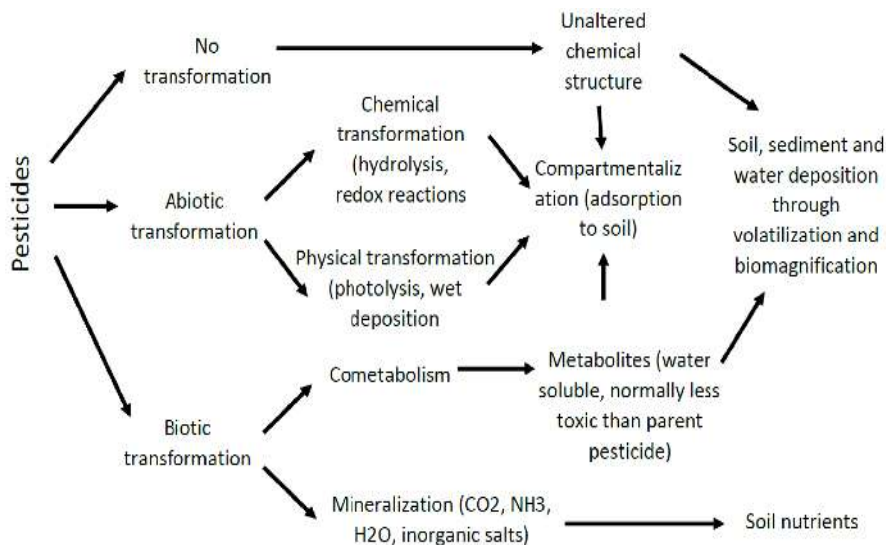
Penggunaan pestisida/herbisida di bidang pertanian sangat umum dilakukan untuk meningkatkan produksi dan memastikan ketersediaan pangan berkualitas tinggi dan terjangkau bagi populasi yang terus bertambah. Pestisida-pestisida ini sebagian besar diproduksi secara sintetis dan seperti hampir semua bahan kimia lainnya, menimbulkan potensi risiko terhadap kesehatan manusia dan lingkungan. Penggunaan pestisida tidak bisa dihindari dalam sistem pertanian. Pestisida baru terus diperkenalkan dengan sifat yang ditingkatkan untuk penggunaan selektif dan dampak negatif yang lebih sedikit. Penyemprotan merupakan cara yang umum untuk memasukkan pestisida ke lahan yang luas, yang sebagian besar dapat terbawa oleh angin, limpasan air, dan proses pelapukan di atmosfer, sehingga 95% herbisida dan lebih dari 98% insektisida mungkin tidak mencapai target. hama sasaran (*The Environmental Impact Of Pesticides*, 2022). Interaksi fisik dan kimia di atmosfer dapat menyebabkan pembentukan zat antara yang berdampak negatif. Namun demikian, pestisida-pestisida ini pada akhirnya menyebar ke air permukaan dan air tanah serta danau dan lautan melalui mekanisme yang berbeda. Penggunaan pestisida yang tidak terkontrol di bidang pertanian dapat mengakibatkan perubahan kualitas produk dan perubahan tingkat enzim yang berbeda-beda dalam tubuh manusia, sehingga menyebabkan berbagai masalah kesehatan (Abdollahdokht *et al.*, 2021). Formulasi pestisida tradisional umumnya memiliki konsentrasi pelarut organik yang tinggi dengan dispersi rendah, bertahan di tanah dalam waktu lama, dan berpindah melalui lingkungan serta membahayakan sistem biologis. Mereka yang bekerja di lahan pertanian terbuka dan rumah kaca serta industri pestisida biasanya terpapar pada konsentrasi pestisida yang lebih tinggi.

Meskipun beberapa dari herbisida ini dapat terdegradasi secara alami di dalam tanah, banyak diantaranya yang tidak mudah terdegradasi dan tetap berada di lingkungan dalam jangka waktu yang lama (Youssef, Younes and Al-Oweini, 2019). Limbah kota,

industri, dan pertanian dibuang langsung ke berbagai badan air di banyak negara. Obat-obatan, pewarna, herbisida, pestisida, dan produk lain yang digunakan sehari-hari telah terdeteksi di air tanah/bawah tanah. Irigasi dan hujan juga memudahkan transportasi pestisida ke dalam tanah/air bawah tanah terutama yang larut dalam air (Sharma *et al.*, 2019).

Konsumsi maksimum pestisida per hektar adalah sekitar 25 kg dan Asia merupakan yang tertinggi di dunia. Penggunaan pestisida secara global terdiri dari 47,5% herbisida, 29,5% insektisida, 17,5% fungisida, dan lainnya hanya sebesar 5,5% (Rad, Ray and Barghi, 2022). Penggunaan pestisida sangat penting dalam pertanian modern. Tanpa penggunaan dan pengelolaan pestisida yang tepat, produk pertanian akan mengalami kerugian yang cukup besar akibat serangan hama (misalnya, sekitar 40% pada tanaman pangan). Paparan pestisida yang digunakan di bidang pertanian telah dikaitkan dengan penyakit autoimun seperti lupus eritematosus sistemik (Parks *et al.*, 2022) . Hal ini dapat menyebabkan penyakit neurodegeneratif dan pernapasan serta berbagai bentuk kanker (Kim, Kabir and Jahan, 2017).

Pestisida hidrokarbon terklorinasi yang tidak larut berpotensi bertahan lebih lama di dalam tanah. Oleh karena itu, senyawa organofosfat seperti Diazinon dan Malathion digunakan sebagai gantinya. Alasan utama penggunaannya adalah sifat cepat terurai sehingga tidak mencemari air. Pestisida karbamat digunakan sebagai pengganti hidrokarbon terklorinasi. Bahan aktifnya tidak mudah teradsorpsi pada partikel tanah sehingga mencapai perairan permukaan/bawah permukaan. Pestisida mengalami proses yang berbeda-beda di lingkungan sebagai gambar berikut ini.



Gambar 11.1. Transformasi pestisida dan pengaruhnya
(Sumber: (Ikehata and El-Din, 2005))

11.4 Polusi Tanah

Polusi tanah merupakan masalah lingkungan yang serius karena mengandung banyak bahaya kesehatan. Misalnya, paparan tanah yang mengandung benzena konsentrasi tinggi meningkatkan risiko tertular leukemia. Penting untuk dipahami bahwa semua tanah mengandung senyawa yang berbahaya/beracun bagi manusia dan organisme hidup lainnya. Namun konsentrasi zat-zat tersebut di tanah yang tidak tercemar cukup rendah sehingga tidak menimbulkan ancaman apa pun terhadap ekosistem sekitarnya. Jika konsentrasi satu atau lebih zat beracun tersebut cukup tinggi sehingga menyebabkan kerusakan pada organisme hidup, maka tanah dikatakan terkontaminasi.

Pada lahan pertanian, rasionya adalah 19,4%. Kontaminan seperti kadmium, merkuri, arsenik, tembaga, timbal, nikel, diklorodifeniltriokloroetana (DDT), dan hidrokarbon aromatik polisiklik (PAH) merupakan polutan utama, dengan rasio kelebihan sebesar 7,0%, 1,6%, 2,7%, 2,1%, 4,8% , 1,9%, dan 1,4% (Li *et al.*, 2019).

Pencemaran tanah adalah pengurangan produktivitas tanah karena adanya limbah kontaminan yang mencemari tanah.. Tanah yang sudah terkontaminasi polutan mempunyai dampak negatif pada sifat fisik kimia dan biologis tanah . Pestisida, pupuk organik, pupuk kimia, limbah radioaktif, mempunyai efek negatif yang mengakibatkan tanah menjadi tercemar.

Senyawa kimia seperti Fe, Pb, merkuri, Cu, Al, Si, dan bahan alkali aluminium, sianida, asam dan alkali akan terakumulasi di dalam tanah sebagaimana adanya terdegradasi sangat lambat oleh tanah dan air bakteri. Akibatnya, mereka memiliki sangat mempunyai dampak buruk terhadap pertumbuhan tanaman menghambat pertumbuhan mereka dan mengurangi hasil dan ukuran buah.

Tanah yang tercemar berdampak terhadap kualitas air, hal ini jika bahan kimia beracun larut ke dalam air tanah, serta terkontaminasi langsung dengan sungai, danau, atau lautan. Tanah juga secara alami berkontribusi terhadap polusi udara dengan melepaskan senyawa volatil ke dalam suasana. Nitrogen dapat mengalami penguapan amonia dan denitrifikasi. Dekomposisi dari bahan organik dalam tanah dapat melepaskan belerang dioksida dan senyawa belerang lainnya, menyebabkan hujan asam. Logam berat dan lainnya unsur yang berpotensi beracun adalah yang paling banyak polutan tanah yang serius dalam limbah. Lumpur mengandung logam berat dalam jumlah besar, dimana tanah yang diolah dapat mengakumulasi logam berat dan akibatnya menjadi tidak mampu menyamakan kedudukan mendukung kehidupan tanaman.

Polusi tanah dapat berupa bahan kimia atau kontaminan yang membahayakan organisme hidup. Polutan dalam tanah dapat berdampak negatif terhadap kualitas tanah serta menyebabkan erosi tanah. Jenis pencemaran tanah mungkin menjadi polusi pertanian, limbah industri dan aktivitas perkotaan.

Polusi Pertanian

1. Proses pertanian berkontribusi terhadap polusi tanah.
2. Pupuk kimia dapat meningkatkan pertumbuhan dan hasil secara instan, namun memberikan dampak terhadap menurunnya unsur hara dan sifat tanah.

3. Pestisida memberikan dampak negatif terhadap kualitas tanah, manusia, tanaman, hewan serta ekosistem.
4. Senyawa kimia yang diaplikasikan ke dalam tanah dapat meracuni, menurunkan unsur hara dan tidak mengandung mikroorganisme.
5. Limpasan bahan kimia ini melalui hujan dan irigasi juga mencemari penduduk setempat sistem air dan disimpan di sistem lain lokasi.

Limbah industri

1. Sekitar 90% polusi minyak disebabkan oleh hal ini oleh produk limbah industri.
2. Pembuangan limbah sembarangan dapat mencemari lingkungan dan ekosistem serta menjadikan tanah tidak subur.
3. Dampak pencemaran lingkungan mempengaruhi tanaman dan hewan, persediaan air setempat dan air minum.
4. Asap beracun dari regulasi tempat pembuangan sampah mengandung bahan kimia yang dapat jatuh kembali ke bumi dalam bentuk asam hujan dan dapat merusak profil tanah.

Agroekosistem

Agroekosistem adalah ekosistem pertanian autotrofik yang dikendalikan oleh manusia. Sejarah dari pertanian berusia sekitar sepuluh ribu tahun, namun meskipun memiliki pengalaman yang begitu luas, konsepnya pengelolaan agroekosistem belum dikembangkan, yang didalamnya seluruh elemen struktural akan diikutsertakan bersama-sama menjadi satu kesatuan.

Agroekosistem dikelola melalui perantara biologis. Perantara berperan sebagai peningkat biologis dalam agroekosistem dan mengurangi biaya energi antropogenik. Perantara meliputi tanaman pangan, hewan ternak, biota tanah, dan seluruh organisme lain yang menghuni agroekosistem. Di antara sifat-sifat agroekosistem, pengelolaannya patut mendapat perhatian khusus. Agroekosistem dikelola terutama dari lingkungan eksternal. Inilah perbedaan utamanya antara agroekosistem dan sistem alam, dimana pengaturan mandiri memainkan peranan paling penting.

Manajemen dari dalam jauh lebih efisien dibandingkan reaksi dan umpan balik yang terbentuk di bawah manajemen pengaruh regulator eksternal.

Rancangan Agroekosistem

Agroekosistem merupakan rancangan ekologi dalam bidang pertanian, merupakan tatanan alami yang diubah oleh manusia. Agroekosistem merupakan proses budidaya serta material lain yang berinteraksi antara manusia dengan makhluk hidup satu sama lain. Fakta empirik dan faktual menunjukkan bahwa setiap ekosistem pasti memiliki komponen abiotik dan biotik. Agroekosistem merupakan proses interaksi antar komponen-komponen satu sama lain, yang menyebabkan keseimbangan ekosistem.

Komponen Agroekosistem

Komponen agroekosistem meliputi dibawah ini.

1. Air

Air adalah komponen abiotik berperan dalam kelangsungan hidup makhluk hidup karena mencakup lebih dari setengah dari penyusun tubuhnya. Air bagi makhluk hidup berperan untuk perkembangan dan pertumbuhan. Air bermanfaat untuk tanaman berperan untuk fotosintesis dan proses metabolisme. Pada budidaya tanaman keadaan lahan kering dan berair memiliki cara perawatan berbeda hal ini tergantung dari jenis varietas tanaman, misalnya padi gogo dapat ditanam diareal kebun dan padi sawah harus cukup kondisi airnya.

2. Tanah

Kehidupan berlangsung di tanah. Mikroorganisme berasal dari tanah. Oleh karena itu, suatu lahan pertanian di berbeda ketinggian mempunyai tingkat kesuburan dan jenis tanah yang berbeda. Tanah yang subur dikarenakan karena kandungan unsur hara makro dan mikronya yang tinggi, struktur tanah yang remah remah, dan mengandung biomass yang bermanfaat bagi tanaman dan tanah.

3. Udara

Atmosfer Bumi terdiri dari gas dan udara, yang berfungsi sebagai selimut Bumi dan sebagai sumber berbagai zat lain,

seperti hidrogen, nitrogen, oksigen, dan karbon dioksida. Udara juga merupakan komponen utama atmosfer.

Tanah yang memiliki pori atau rongga yang cukup akan mempengaruhi pertukaran udara atau aerasinya, dan juga akan memengaruhi kualitas proses mineralisasi. Oleh karena itu, unsur-unsur udara baik di tanah maupun di atmosfer sangat memengaruhi kesuburan tanah, yang berdampak pada daya dukung tumbuh tanaman.

4. Cahaya

Komponen abiotik ekosistem menyediakan energi utama melalui cahaya matahari. Seperti yang kita ketahui, tanaman dan tumbuhan menyerap dan menggunakan energi matahari melalui proses fotosintesis. Konsumen I kemudian memakan tumbuhan, dan rantai makanan berlanjut. Cahaya matahari tidak tersebar merata di permukaan bumi. Oleh karena itu, makhluk memiliki cara untuk menyesuaikan diri dengan lingkungan yang memiliki intensitas dan kualitas cahaya yang berbeda.

5. Suhu

Proses kimia yang berhubungan dengan suhu, setiap tubuh makhluk hidup membutuhkan suhu lingkungan tertentu, termasuk tanaman, yang juga membutuhkan suhu ideal untuk metabolismenya. Varietas mana yang cocok untuk ditanam di lingkungan tergantung pada tinggi rendahnya suhunya. Absorpsi air dan unsur hara akan terganggu jika suhu tanah rendah karena transpirasi meningkat. Tingkat kerusakan jaringan yang disebabkan cekaman suhu yang bervariasi berpengaruh terhadap kapasitas air dalam tanaman, morfologis, dan mempengaruhi proses fisiologis tanaman. Cekaman suhu dapat mematikan jaringan tanaman.

6. Kelembaban udara

Kadar air di udara dikenal sebagai kelembapan. Kelembapan udara memengaruhi ketersediaan air tubuh, yang sangat penting untuk proses metabolisme pada tanaman .

7. Derajat keasaman/ pH

Distribusi organisme sangat dipengaruhi oleh tingkat keasaman media atau pH. Organisme yang berbeda akan memiliki pH yang berbeda di berbagai lingkungan. Penanganan tergantung pada tingkat keasamannya dalam agroekosistem dan ekosistem pertanian. Kawasan gambut biasanya memiliki derajat keasaman yang tinggi.

8. Iklim

Kelembapan udara, suhu, curah hujan, dan komponen abiotik lainnya berinteraksi untuk membentuk iklim.

Cuaca adalah kondisi atmosfer selama periode waktu tertentu dan di wilayah tertentu, sedangkan iklim adalah kondisi cuaca rata-rata selama periode waktu yang lama dan di wilayah yang luas. Jenis tanaman dan hasil produksi pertanian dipengaruhi secara signifikan oleh iklim suatu daerah. Perubahan iklim yang tiba-tiba akan membuat petani bingung, terutama tentang kapan harus tanam, atau bahkan bisa menyebabkan gagal panen. Selain itu, akibat iklim tertentu dapat menyebabkan populasi hama meledak, yang dapat membahayakan tanaman petani.

Produksi tanaman di Indonesia, termasuk hortikultura, tanaman pangan, dan perkebunan, dihambat oleh organisme pengganggu tanaman (OPT). Tiga kategori organisme pengganggu tanaman adalah hama, penyakit, dan gulma. Hama mengganggu tanaman secara fisik dan dapat disebabkan oleh serangga, tungau, vertebrata, dan moluska. Sedangkan penyakit mengganggu tanaman secara fisiologis dan dapat disebabkan oleh cendawan, bakteri, fitoplasma, virus, viroid, nematoda, dan tumbuhan tingkat tinggi.

Dinamika faktor iklim sangat memengaruhi perkembangan hama dan penyakit. Tidak mengherankan jika dunia pertanian disibukkan dengan masalah penyakit tanaman seperti penyakit kresek dan blas pada padi, antraknosa cabai, dan sebagainya pada musim hujan.

9. Topografi

Altitude dan latitude suatu tempat dipengaruhi oleh topografi, yang berdampak besar pada penyebaran makhluk hidup, dengan penyebaran tumbuhan menjadi contoh yang paling jelas.

10. Unsur hara

Unsur hara adalah larutan garam mineral diambil oleh tumbuhan dari tanah atau air di sekitarnya. Tanaman dapat menyerap hara dalam tanah melalui akar tanaman yang mengandung mikroorganisme. Misalnya tanaman yang mempunyai bintil akar, dalam bintil akar mengandung bakteri rhizobium berperan untuk mengikat nitrogen.

Komponen Biotik

1. Manusia

Manusia memainkan peran penting dalam membuat ekosistem buatan manusia dalam proses budidaya tanaman dalam persiapan awal hingga pasca panen tanaman.

2. Biota dalam tanah

Jasad hayati tanah dalam budidaya tanaman berperan: yang menguntungkan dan berdampak negatif. Misalnya seperti mikroorganisme nitromonas dan nitrobacter yang melakukan proses nitrifikasi. Pada bintil akar terdapat bakteri rhizobium berperan mengikat Nitrogen bebas, dan endomikoriza yang membantu tanaman menyediakan dan menyerap hara P. Jasad nonfungsional termasuk bakteri yang tidak berfungsi.

3. Gulma

Gulma adalah tumbuhan yang tidak diinginkan atau tidak cocok di tempatnya. Dalam pertanian, gulma dapat menyebabkan banyak kerugian, seperti menurunkan jumlah hasil, menurunkan kualitas hasil, menjadi tempat patogen atau hama alternatif, mempersulit pengolahan, meningkatkan biaya produksi, menumbuhkan zat beracun dari golongan fenol untuk umbuhan lainnya, dan mengurangi debit dan kualitas air.

4. Hama dan penyakit

Mikroorganisme yang menyebabkan penyakit tanaman. Hama dalam bidang pertanian diantaranya berupa jenis nematoda tanaman parasit, golongan insek, tungau, moluska, dari golongan vertebrata, satwa liar, dan aves.

Tipe Agroekosistem

Tiga kategori utama agroekosistem adalah ekosistem akuatik (air), ekosistem terestrial (darat), dan ekosistem buatan. Lebih lanjut dijelaskan di bawah ini:

1. Ekosistem akuatik

Ekosistem akuatik, yang sebagian besar lingkungan fisiknya didominasi oleh air, dipengaruhi oleh empat faktor: penetrasi cahaya matahari, substrat, suhu, dan jumlah material terlarut. Namun, faktor paling penting untuk ekosistem perairan adalah jumlah garam terlarut di dalam air; jika perairan sedikit mengandung garam terlarut, itu disebut ekosistem air tawar. Sebaliknya, jika perairan mengandung kadar garam terlarut yang tinggi, itu disebut ekosistem. Sungai adalah contohnya. Dalam ekosistem ini,

2. Laut

Sumber daya alam terluas adalah laut. Rata-rata salinitas laut, atau kadar garam, adalah 3%, dan hampir 71% dari permukaan bumi tertutup oleh laut. Namun, angka ini bervariasi menurut geografi dan kedalaman. Suhu tinggi di daerah tropis menyebabkan laju penguapan yang cepat, yang menghasilkan salinitas laut yang tinggi. Laut Merah, misalnya, memiliki salinitas 4%.

3. Estuari

Ekosistem estuari terletak di muara sungai, di mana sungai dan laut bertemu. Pantai Lumpur adalah nama lain untuk muara sungai. Ciri-ciri air payau estuari membedakan mereka dari air tawar dan laut. Tumbuhan bakau menempati mayoritas vegetasi.

4. Terumbu karang

Hanya tempat yang jernih yang memungkinkan pertumbuhan ekosistem terumbu karang. Ekosistem terumbu karang terdiri dari jenis organisme laut dari

kelompok Porifera, Coelenterata, ganggang, berbagai jenis ikan, dan udang. Ekosistem ini terletak di perairan di Nusa Tenggara dan Maluku.

Terrestrial ekosistem

Ekosistem terrestrial (darat) adalah jenis ekosistem yang sebagian besar lingkungan fisiknya terdiri dari daratan. Bioma menggambarkan ekosistem terrestrial, yang mencakup area yang luas dengan komunitas.

1. Hutan Musim.

Nama bioma diberikan berdasarkan karakteristik umum ekosistem atau vegetasi dominan. Tumbuhan dengan pohon keras seperti oak (*Quercus* sp.), beach, dan maple (*Acer saccharinum*) ditemukan di bioma hutan musim, yang menggugurkan daunnya pada musim gugur. Rusa, musang, dan salamander adalah beberapa spesies hewan yang tinggal di bioma ini.

2. Padang rumput

Bioma padang rumput terletak di sebelah barat dari hutan musim di Amerika Utara. Bioma padang rumput tidak banyak membantu pertumbuhan tumbuhan dengan curah hujan. Bison, anjing padang rumput, antelope, belalang, dan ular adalah hewan yang hidup di daerah ini. Suatu bioma yang menyerupai sabana. Ada banyak spesies sabana di Amerika Selatan.

3. Gurun

Gurun terletak di antara 20 dan 30 derajat lintang utara dan selatan Bumi. Gurun memiliki curah hujan kurang dari 25 cm per tahun. Kehidupan organisme di gurun menyesuaikan diri dengan iklimnya yang kering. Habitatnya terdiri dari berbagai jenis belukar akasia, sukulen, dan kaktus. Belalang, burung pemangsa serangga, dan kadal adalah hewan yang sangat umum di gurun.

4. Tundra

Bioma tundra terletak di sebelah utara dari bioma taiga. Bioma tundra unik karena musim dingin lebih lama dari musim panas. Jenis flora dan fauna yang hidup di sana

sangat terbatas karena kondisi ini. Likan, atau lumut, adalah tumbuhan semusim yang tumbuh cepat selama musim tumbuh.

5. Hutan hujan tropik

Akhir dari spektrum iklim bioma tundra, bioma hutan hujan tropik terutama ditemukan di dekat ekuator di Amerika Selatan dan Amerika Tengah, Afrika, bagian selatan Asia, dan pulau di kepulauan Pasifik. Ciri-cirinya termasuk suhu yang tinggi, hujan hampir setiap hari, dan ribuan spesies tumbuhan dan hewan. Tumbuhan tumbuh dengan cabang berdaun lebat yang membentuk tudung atau kanopi.

6. Savana

Curah hujan sekitar 90-150 cm per tahun, savana tumbuh di daerah yang lebih dekat dengan khatulistiwa. Rumput dengan semak dan pohon yang tumbuh terpencair adalah mayoritas vegetasi savanna. Berbagai jenis serangga seperti belalang, kumbang, rayap, herbivora, dan karnivora hidup di savana. Savana ada di Kenya (Afrika), dan di Sumbawa (NTB) di Indonesia. Di sana hidup gajah, jerapah, zebra, dan singa.

Ekosistem buatan

Ekosistem Buatan: Ekosistem yang dibuat oleh manusia untuk berfungsi.

1. Ekosistem perkebunan.

Kondisi topografi pada sistem pengairan pertanian lahan kering sangat penting untuk menyediakan air dan menentukan metode dan fasilitas pengairan.

2. Ekosistem sawah

Sawah adalah jenis pertanian yang ditanam di tanah yang basah atau di mana ada pengairan. Hara N, P, K, Ca, dan Mg menghambat pertumbuhan dan hasil padi pada lahan sawah bukaan baru; pada ultisol, Hara N, P, dan K menghambat pertumbuhan dan hasil padi.

3. Ekosistem hutan

Agrikultur dengan intensitas rendah, seperti perladangan berpindah, pekarangan tradisional, talun, dan rotasi lahan,

menyisakan banyak proses ekosistem alami dan komposisi tumbuhan, hewan, dan mikroorganisme.

4. Ekosistem kebun campur

Area tanah yang biasanya berdekatan dengan bangunan disebut pekarangan. Tanah ini dapat digunakan untuk berkebun, ditanami bunga, diplester, atau terkadang memiliki kolam. Pekarangan dan isinya saling menguntungkan menggunakan sistem terpadu. Sebagian dari tanaman digunakan untuk pakan ternak dan sebagian lagi untuk manusia. Kotoran ternak digunakan sebagai pupuk kandang untuk menyuburkan tanah pekarangan.

DAFTAR PUSTAKA

- Abdollahdokht, D. *et al.* (2021) 'Pesticide exposure and related health problems among farmworkers' children: a case-control study in southeast Iran', *Environmental Science and Pollution Research*, 28(40), pp. 57216–57231. doi: 10.1007/s11356-021-14319-1.
- Ikehata, K. and El-Din, M. G. (2005) 'Aqueous pesticide degradation by ozonation and ozone-based advanced oxidation processes: A review (part I)', *Ozone: Science and Engineering*, 27(2), pp. 83–114. doi: 10.1080/01919510590925220.
- Kim, K.-H., Kabir, E. and Jahan, S. A. (2017) 'Exposure to pesticides and the associated human health effects', *Science of The Total Environment*, 575, pp. 525–535. doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.09.009>.
- Li, T. *et al.* (2019) 'Soil Pollution Management in China: A Brief Introduction', *Sustainability (Switzerland)*, 11(3), pp. 1–15. doi: 10.3390/su11030556.
- Parks, C. G. *et al.* (2022) 'Pesticide use and risk of systemic autoimmune diseases in the Agricultural Health Study', *Environmental Research*, 209, p. 112862. doi: <https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.112862>.
- Rad, S. M., Ray, A. K. and Barghi, S. (2022) 'Water Pollution and Agriculture Pesticide', *Clean Technologies*, 4(4), pp. 1088–1102. doi: 10.3390/cleantechnol4040066.
- Sharma, A. *et al.* (2019) 'Worldwide pesticide usage and its impacts on ecosystem', *SN Applied Sciences*, 1(11), p. 1446. doi: 10.1007/s42452-019-1485-1.
- The Environmental Impact Of Pesticides* (2022).
- Vlachokostas, C. *et al.* (2010) 'Economic damages of ozone air pollution to crops using combined air quality and GIS modelling', *Atmospheric Environment*, 44(28), pp. 3352–3361. doi: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2010.06.023>.
- Wei, W. and Wang, Z. (2021) 'Impact of industrial air pollution on agricultural production', *Atmosphere*, 12(5). doi: 10.3390/atmos12050639.

Youssef, L., Younes, G. and Al-Oweini, R. (2019) 'Photocatalytic degradation of atrazine by heteropolyoxotungstates', *Journal of Taibah University for Science*, 13(1), pp. 274–279. doi: 10.1080/16583655.2018.1563368.

BIODATA PENULIS



Ir. Roosganda Elizabeth, M.Si., MS.PNLP.
BRIN

Google Scholar : roosimanru@yahoo.com ; roosimanru@gmail.com
Orcid : 0000-0003-4137-1731
SCOPUS ID : 57218812768
SINTA ID : 6671403

Penulis, berkarya nyata sebagai fungsionalis peneliti ASN – Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN) di bidang Pemberdayaan dan Inovasi Kompetensi SDM, Kelembagaan, Sosial Ekonomi Manajemen Bisnis dan Agribisnis, Ekonomi Khusus, Kerakyatan dan Kreatif, Pengabdian Masyarakat, Founder Start Up, Dewan Komisaris Perkebunan Swasta Nasional, Mitra Bestari, Reviewer, dan Editor anggota Tim Dewan Redaksi dan Editorial Board beberapa publikasi dan jurnal. Aktif menulis karya tulis ilmiah (KTI) di berbagai publikasi nasional dan internasional; berkarya nyata sebagai fungsionalis dan pengurus aktif di beberapa organisasi dan profesi ilmiah. Ber-orientasi sektor publik dengan menyelaraskan keberpihakan dan pendampingan. Pembimbing Mahasiswa agar mampu menyelesaikan tugas akhir, skripsi, tesis, desertasi berkualitas dan sempurna agar segera mampu memanfaatkan keilmuannya di masyarakat dan lingkungan luas dengan kompetensi, qualified, bernilai jual tinggi dan bertanggungjawab serta ber-ahlak, ber-attitude, menjunjung tinggi dan komit melaksanakan etika dan norma empati, simpati dan toleransi dalam

bermasyarakat yang majemuk dan beragam, untuk dan supaya mampu menuliskan, mendiseminasikan, mensosialisasikan dan menyebarluaskan hasil karya nyata mereka kepada masyarakat luas (nasional dan internasional) melalui karya tulis ilmiah, artikel, deskripsi dan statement ilmiah dan populer yang kompeten, bertanggungjawab, bermanfaat tinggi dan luas.

BIODATA PENULIS



Dr. Silvia Permata Sari, SP., MP.

Dosen Program Studi Agroteknologi, Departemen Agronomi
Fakultas Pertanian, Universitas Andalas

Dr. Silvia Permata Sari, SP., MP. lahir di Kota Padang, Sumatera Barat pada tanggal 21 Mei 1986 sebagai anak pertama dari 5 bersaudara dari Bapak Syofyan Tanjung dan Ibu Kasmawati, S.Pd. Penulis lulus pendidikan SD Negeri 30 Cengkeh tahun 1998, SLTP Negeri 11 Padang tahun 2001, dan SMA Negeri 4 Padang tahun 2004. Pendidikan S1 ditempuh di Fakultas Pertanian Universitas Andalas tahun 2004 dan lulus tahun 2008 dengan predikat lulusan terbaik. Penulis mendapatkan beasiswa *Fast Track* Magister (S2) di Universitas Andalas tahun 2008 dan lulus dengan predikat Cumlaude (Dengan Pujian) tahun 2010. Lulus pendidikan Magister, penulis lulus PNS sebagai dosen Fakultas Pertanian, Universitas Andalas pada tahun 2010. Pada tahun 2012, penulis mewakili Indonesia dalam kegiatan pengembangan Gandum Tropis ke Slovakia, Eropa Timur. Tahun 2013-2018, penulis mendapatkan beasiswa Pendidikan Pascasarjana Dalam Negeri dari Kemeristek Dikti untuk pendidikan Doktor (S3) pada Program Studi Entomologi di Institut Pertanian Bogor (IPB) dengan IPK 3,76. Kemudian tahun 2018, penulis kembali menempuh pendidikan Doktor pada program studi Ilmu Pertanian, Fakultas Pertanian, Universitas Andalas dan lulus pada tahun 2022 dengan IPK 3,97 pada usia 36 tahun. Penulis juga aktif mengikuti berbagai kegiatan, mulai dari mengajar perkuliahan, penelitian, pengabdian kepada masyarakat, mengikuti

seminar nasional dan internasional, menulis jurnal nasional dan internasional terindeks Scopus, Chief editor di jurnal nasional, reviewer jurnal nasional dan jurnal internasional, serta menulis buku dan artikel di media massa nasional maupun internasional.

BIODATA PENULIS



Ika Purnamasari, S.Si., M.Si.

Dosen Program Studi Agroteknologi Fakultas Pertanian
Universitas Jember

Penulis lahir di Paniai tanggal 3 Agustus 1991. Menyelesaikan pendidikan S1 pada Departemen Geofisika dan Meteorologi Program Studi Meteorologi Terapan dan melanjutkan S2 pada Klimatologi Terapan Institut Pertanian Bogor dengan Beasiswa Unggulan. Pada tahun 2019 sampai dengan sekarang, penulis menjadi staf dosen di Program Studi Agroteknologi, Fakultas Pertanian Universitas Jember. Keahlian yang ditekuni penulis meliputi Agrometeorologi, teknologi Spasial Bidang Pertanian dan Pertanian Presisi. Aktivitas penelitian dan pengabdian masyarakat penulis yang telah dipublikasikan terekam dalam google scholar dengan alamat: <https://scholar.google.com/citations?user=WNYI5DoAAAAJ&hl=id>. Penulis sebelumnya menjadi salah satu kontributor penulis pada buku Pengantar Informasi Geospasial (978-623-147-148-8) serta buku Agroklimatologi (978-623-198-964-2).

BIODATA PENULIS



(Ilham, S.Pd., M.P.)

Dosen Program Studi Agroekoteknologi
Fakultas Pertanian dan Kehutanan
Universitas Sulawesi Barat

Penulis biasa disapa Ilham, lahir dari keluarga yang notabenenya berprofesi nelayan di daerah pesisir pantai di kabupaten Bima Provinsi Nusa Tenggara Barat pada tanggal 07 September 1992. Penulis adalah salah satu dosen tetap pada Dosen Program Studi Agroekoteknologi Fakultas Pertanian dan Kehutanan Universitas Sulawesi Barat sejak tahun 2022 hingga sekarang. Riwayat pendidikan dari SD sampai SMA di kampung halamannya tepatnya di Desa Melayu Kecamatan Lambu Kabupaten Bima sejak tahun 1998–2010. Dengan alasan ekonomi, penulis baru dapat melanjutkan S1 pada tahun 2011 di salah satu kampus besar di Makassar yakni Universitas Negeri Makassar pada Jurusan Pendidikan Teknologi Pertanian hingga selesai tahun 2015 dan melanjutkan kembali pendidikan S2 pada tahun 2017 di kampus swasta yakni Universitas Islam Makassar Program Pascasarjana Jurusan Agroteknologi.

BIODATA PENULIS

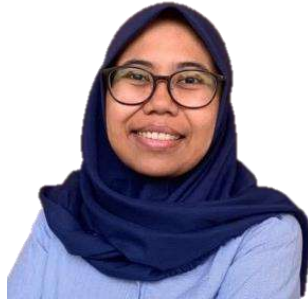


Ir. Eliyani, M. Si

Dosen Program Studi Agroekoteknologi
Fakultas Pertanian Universitas Mulawarman

Penulis lahir di Banjarmasin tanggal 12 Maret 1963. Penulis adalah dosen tetap pada Program Studi Agroekoteknologi, Fakultas Pertanian, Universitas Mulawarman. Menyelesaikan pendidikan S1 pada Program Studi Agronomi di Universitas Mulawarman dan S2 pada Program Studi Agronomi (Fisiologi Tanaman) di Institut Pertanian Bogor.

BIODATA PENULIS



Hermawati Cahyaningrum, SP., M.Sc.

Peneliti Pusat Riset Hortikultura
Organisasi Riset Pertanian dan Pangan, BRIN

Penulis lahir di Kota Magelang pada tanggal 18 September 1985. Menyelesaikan pendidikan S1 Program Studi Ilmu Hama dan Penyakit Tanaman di Universitas Jenderal Soedirman, Purwokerto tahun 2008. Lulus pendidikan S2 di Program Studi Fitopatologi di Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta pada tahun 2018. Penulis memulai karir sebagai peneliti di Balai Pengkajian Teknologi Pertanian Maluku Utara, Balitbangtan, Kementerian Pertanian (2009 – 2022), dan saat ini menjadi peneliti di Pusat Riset Hortikultura, Organisasi Riset Pertanian dan Pangan, BRIN.

BIODATA PENULIS



Dr. Jefri Sembiring., SP, MSi
Dosen Program Studi Agroteknologi
Fakultas Pertanian Universitas Musamus

Penulis lahir di Tigapanah Kabupaten Karo Sumatra Utara tanggal 18 Oktober 1983. Penulis adalah dosen tetap pada Program Studi Agroteknologi Fakultas Pertanian Universitas Musamus. Menyelesaikan Pendidikan S3 Bidang Entomologi pada Tahun 2016. Penulis menekuni bidang entomologi khususnya yang berkaitan dengan ekologi.

BIODATA PENULIS



Dr. Drs. I Wayan Suanda, S.P., M.Si

Dosen Program Studi Pendidikan Biologi Fakultas Sains dan
Teknologi PGRI Mahadewa Indonesia, Bali

Email: suandawayan65@gmail.com dan

wayansuanda@mahadewa.ac.id

I Wayan Suanda, kelahiran 31 Desember 1965 di Kelurahan Pedungan, Kecamatan Denpasar Selatan Kota Denpasar-Bali (80222). Jenjang pendidikan dasar dan menengah sampai perguruan tinggi ditempuh di Bali. Pendidikan Tinggi S1 Pendidikan Biologi (1985-1990); S1 Pertanian, Jurusan Hama dan Penyakit Tumbuhan (1989-1993); Program Pascasarjana S2 Jurusan Bioteknologi Pertanian Universitas Udayana, Bali (1999-2002) dan Program Doktor (S3) tahun 2012-2017 di Program Studi Ilmu Pertanian, Konsentrasi Sumber Daya Hayati (SDH) di Universitas Udayana, Bali. Penulis mulai mengajar di SMP, SMA, SMK di Kota Denpasar dari tahun 1986-2012 dan Dosen PNS Kopertis Wil. VIII (sekarang LLDIKTI) Wil. VIII tahun 1991 yang dipekerjakan pertama kali di Universitas Katolik Widya Mandira Kupang dan akhirnya tahun 1993 direkomendasi di IKIP PGRI Bali yang sekarang menjadi Universitas PGRI Mahadewa Indonesia, di Denpasar-Bali. Penulis ditempatkan (*homebase*) di Program Studi Pendidikan Biologi dan pernah menduduki jabatan di PT yaitu: Kaprodi Pendidikan Biologi (1995-1999); PD III FPMIPA (1999-2003); Kaprodi Pendidikan Biologi (2003-2011); Dekan FPMIPA

(2011-2015) dan sebagai Ketua Badan Penjamin Mutu (BPM) di tingkat institusi (2015-2020) dan beberapa jabatan organisasi di luar kampus. Penulis pernah memenangkan beberapa kali hibah penelitian dan pengabdian dari Perguruan Tinggi, Pemda dan Kementerian, termasuk hibah dari BRIN. Penulis hingga kini mengajar di Prodi Pendidikan Biologi Fakultas Sains dan Teknologi (FST) Universitas PGRI Mahadewa Indonesia (UPMI) Bali. Penulis membuat Modul/Diktat mengajar serta beberapa produk Pupuk Organik, Pestisida Organik dan pengelolaan sumber daya hayati (SDH) termasuk produk Hasil Fermentasi, serta menjadi Asesor Nasional BKD.

BIODATA PENULIS



Indah Sriwahyuni, B.Sc., M.P.

Dosen Program Studi Agroekoteknologi
Fakultas Pertanian Universitas Mulawarman

Penulis lahir di Samarinda tanggal 14 Juni 1993. Penulis adalah dosen tetap pada Program Studi Agroekoteknologi Fakultas Pertanian, Universitas Mulawarman. Menyelesaikan pendidikan S1 pada Jurusan Teknologi Pangan Universiti Putra Malaysia dan selanjutnya menyelesaikan studi S2 pada Jurusan Agronomi Magister Pertanian Tropika Basah Universitas Mulawarman. Penulis pernah mengajar sebagai dosen tetap program studi Teknologi Industri Pertanian di Universitas Nahdlatul Ulama Kalimantan Timur Program Studi Teknologi Industri Pertanian pada 2019-2021.

BIODATA PENULIS



Victor Bintang Panunggul S.P.,M.P.

Dosen Program Studi Agribisnis
Fakultas Sains dan Teknik Universitas Perwira Purbalingga

Victor Bintang Panunggul, S.P.,M.P lahir di Kabupaten Banyumas pada tanggal 21 Maret 1992. Ia Lulus pada Tahun 2019 hingga mendapatkan gelar Magister Pertanian di Universitas Jenderal Soedirman. Saat ini ia tercatat sebagai dosen tetap untuk mata kuliah bidang Budidaya Pertanian di Universitas Perwira Purbalingga. Selain mengajar penulis aktif dalam kegiatan Tridharma Perguruan Tinggi diantaranya ialah penelitian dan pengabdian masyarakat. Beberapa penelitian yang ia teliti diantaranya Pengaruh Pupuk Kandang dan Pupuk Hayati Provibio Terhadap Pertumbuhan dan Hasil Tanaman Caisim (*Brassica Juncea* L), Respon Ketahanan Pupuk Kandang dan Pupuk Hayati Provibio Terhadap Intensitas Serangan Hama dan Penyakit Tanaman Caisim (*Brassica Juncea* L), Respon Pupuk SP-36 dan Pupuk Hayati Provibio Terhadap Pertumbuhan dan Hasil Tanaman Kedelai (*Glycine max*) Merrill L Var. Wilis dan Hibah DRTPM PDP 2023 dengan Judul Pengaruh Pupuk kandang dan Pupuk Bakteri Fotosintesis terhadap Pertumbuhan dan Hasil Tanaman Kale. Sebagai bentuk pengabdian kepada masyarakat, ia pernah terlibat aktif sebagai pemateri dalam sosialisasi pembuatan pestisida nabati berbahan daun sereh, dan pelatihan pemanfaatan lahan sempit menggunakan teknik microgreen. Pelatihan Budidaya Sayuran Microgreens dengan

Hidroponik Wick System di SD N 2 Kedungrandu Kabupaten Banyumas. Adapun karya buku yang telah ditulisnya, diantaranya berjudul : Dasar Agronomi, Aquaponic for Urban Farming mewujudkan petani inovatif 5.0, Pengantar Ilmu Pertanian.