ISBN 978-634-255-721-1



FITOMIKROBIOLOGI



TIM PENULIS :

- Eka Pratiwi Tenriawaru
- Gallyndra Fatkhu Dinata
- Ni'matuljannah Akhsan
- Zurrahmi Wirda
- Resti Fajarfika
- Anwar
- Mieke Rochimi Setiawati
- Yonce Melyanus Killa
- Kurniawan Shidiq Sutikno
- Abdul Sahid

FITOMIKROBIOLOGI

Eka Pratiwi Tenriawaru
Gallyndra Fatkhu Dinata
Ni'matuljannah Akhsan
Zurrahmi Wirda
Resti Fajarfika
Anwar
Mieke Rochimi Setiawati
Yonce Melyanus Killa
Kurniawan Shidiq Sutikno
Abdul Sahid

GET PRESS INDONESIA

FITOMIKROBIOLOGI

Penulis :
Eka Pratiwi Tenriawaru
Gallyndra Fatkhu Dinata
Ni'matuljannah Akhsan
Zurrahmi Wirda
Resti Fajarfika
Anwar
Mieke Rochimi Setiawati
Yonce Melyanus Killa
Kurniawan Shidiq Sutikno
Abdul Sahid

ISBN : 978-634-255-721-1

Editor : DR., D.Sc., Drs., Sunarno SastroAtmodjo, S.E., S.H.,S.T., S.AP., S.IP.,S.Sos.,S.IKom., M.M., M.Sc., M.Si.
Desain Sampul dan Tata Letak : Tri Putri Wahyuni, S. Pd.

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

Cetakan pertama, September 2026

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

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur kami panjatkan ke hadirat Tuhan Yang Maha Esa, yang telah memberikan rahmat dan karunia-Nya sehingga buku berjudul *Fitomikrobiologi* ini dapat diselesaikan. Isi buku ini mencakup pembahasan tentang Fitomikrobiologi, konsep dasar fitomikrobiologi, mikroorganisme indigenus (fungi, bakteri, actinomycetes) yang menguntungkan bagi tanaman, mikroorganisme yang berpotensi menghasilkan metabolit primer dan metabolit sekunder yang bermanfaat bagi tanaman, mikroorganisme yang berperan sebagai agen hayati, mikroorganisme yang berperan sebagai agen biokontrol, mikroorganisme endofitik dan filosfer, mikroorganisme pelarut fosfat dan penambat nitrogen, teknik inokulasi mikroorganisme yang berpotensi sesuai pemanfaatan untuk aplikasinya, dan mikroorganisme: fungi, bakteri, dan virus yang berperan sebagai patogen tanaman. Akhir kata, semoga buku ini dapat menjadi referensi dan dapat memberikan manfaat serta inspirasi bagi semua pembaca.

Padang, Juli 2026

Penulis

DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR ..... **i**
DAFTAR ISI ..... **ii**
DAFTAR GAMBAR ..... **ix**
DAFTAR TABEL ..... **xii**
BAB 1 FITOMIKROBIOLOGI **1**
1.1 Definisi Fitomikrobiologi 1
1.2 Prinsip Fitomikrobiologi 3
1.2.1 Interaksi Kompleks Antara Tanaman dan Mikroorganisme 3
1.2.2 Pengaturan oleh Sinyal Kimiawi 4
1.2.3 Mekanisme Peningkatan Pertumbuhan Tanaman 5
1.2.4 Ketahanan Tanaman Terhadap Patogen 6
1.2.5 Simbiosis dan Siklus Nutrisi 7
1.2.6 Keanekaragaman dan Struktur Komunitas Mikroba 8
1.3 Keterkaitan Fitomikrobiologi dengan Bidang Lain 10
1.4 Aplikasi Prinsip Fitomikrobiologi 11
1.5 Arah dan Tantangan Riset Fitomikrobiologi 13
DAFTAR PUSTAKA **14**
BAB 2 KONSEP DASAR FITOMIKROBIOLOGI **20**
2.1 Sejarah Perkembangan Fitomikrobiologi 20
2.2 Mikroorganisme yang Berasosiasi dengan Tanaman 21
2.3 Habitat Mikroorganisme pada Tanaman 22
2.4 Peran Mikroorganisme bagi Tanaman 23
2.5 Mikroorganisme Patogen Tanaman 25
2.6 Fitomikrobiologi dalam Pertanian Berkelanjutan 27
2.7 Tantangan dan Prospek Pengembangan 28
2.8 Interaksi Tanaman dan Mikroorganisme 30

2.9 Metode Dasar dalam Studi Fitomikrobiologi.....31
DAFTAR PUSTAKA 33
BAB 3 MIKROORGANISME INDIGENUS (FUNGI, BAKTERI, ACTINOMYCETES) YANG MENGUNTUNGKAN BAGI TANAMAN.....35
3.1 Pengertian Mikroorganisme Indigenus Perannya di Ekosistem Tanah/ Rizosfer.....35
3.2 Rhizosfer dan Interaksi Tanaman–Mikroba 39
3.3 Eksudat Akar Memengaruhi Pertumbuhan Mikroba 40
3.4 Mekanisme Interaksi Akar Tanaman Dan Mikroba 41
3.4.1 Potensi Mikroba Sebagai Pendukung Kesehatan Tanah dan Pertumbuhan Tanaman 43
3.5 Fungi Indigenus yang Menguntungkan bagi Tanaman.....44
3.5.1 Gambaran Umum Fungi Indigenus di Tanah dan Rhizosfer.....44
3.5.2 Peran Fungi Peran Fungi dalam Penyediaan Unsur Hara 45
3.5.3 Peran Fungi dalam Kesehatan Tanaman 46
3.5.4 Fungi Pembentuk Simbiosis dengan Akar.....47
3.5.6 Dampak Terhadap Pertumbuhan Tanaman 49
3.6 Bakteri Indigenus yang Menguntungkan bagi Tanaman 50
3.6.1 Gambaran Umum Bakteri di Rhizosfer.....50
3.6.2 Bakteri Penambah Ketersediaan Hara.....51
3.6.3 Bakteri Pengatur Pertumbuhan Tanaman (PGPR— Plant Growth Promoting Rhizobacteria) 52
3.6.4 Peran Bakteri Sebagai Agen Biokontrol 54
3.7 Actinomycetes Indigenus yang Menguntungkan bagi Tanaman 56
3.7.1 Gambaran Umum Actinomycetes Indegenus Rizosfere 56

3.7.2 Peran Actinomycetes dalam Menyediakan Hara Bagi Tanaman 57
3.7.3 Peran Actinomycetes Sebagai Agen Biokontrol 58
DAFTAR PUSTAKA 60
BAB 4 MIKROORGANISME YANG BERPOTENSI MENGHASILKAN METABOLIT PRIMER DAN METABOLIT SEKUNDER YANG BERMANFAAT BAGI TANAMAN 66
4.1 Konsep Dasar Metabolit Primer dan Sekunder 67
4.1.1 Metabolit Primer....67
4.1.2 Metabolit Sekunder 68
4.2 Mikroorganisme Tanah dan Rizosfer....70
4.3 Bakteri Endofit dan Rizosfer Penghasil Metabolit Bermanfaat....73
4.3.1 Bakteri Endofit 74
4.4.2 Bakteri Rizosfer....77
4.5 Fungi Endofit dan Rizosfer Penghasil Metabolit Bermanfaat....80
4.5.1 Jamur Endofit dan Potensi Metabolitnya....81
4.5.2 Jamur Rizosfer dan Potensi Metabolitnya 83
4.6 Aktinomiset Sebagai Sumber Metabolit Bioaktif 86
DAFTAR PUSTAKA 89
BAB 5 MIKROORGANISME YANG BERPERAN SEBAGAI AGEN HAYATI 98
5.1 Konsep Umum Mikroorganisme Agen Hayati 99
5.2 Pemanfaatan Mikroorganisme Agen Hayati 100
5.3 Aplikasi Mikroorganisme Agen Hayati di Lapangan....109
DAFTAR PUSTAKA 110
BAB 6 MIKROORGANISME YANG BERPERAN SEBAGAI AGEN BIOKONTROL.... 117
6.1 Kelompok Mikroorganisme Agen Biokontrol....118
6.1.1 Bakteri 118

6.1.2 Jamur 121
6.1.3 Aktinomisetes 122
6.1.4 Virus 124
6.1.5 Protozoa 125
6.2 Mekanisme Kerja Mikroorganisme Biokontrol 126
6.2.1 Antagonisme 127
6.2.2 Kompetisi 128
6.2.3 Parasitisme 129
6.2.4 Produksi Senyawa Bioaktif 129
6.2.5 Induksi Ketahanan Tanaman 130
6.3 Keunggulan dan Keterbatasan Agen Biokontrol 131
6.3.1 Keunggulan 132
6.3.2 Keterbatasan 134
6.4 Aplikasi Agen Biokontrol dalam Pertanian 135
DAFTAR PUSTAKA 140
BAB 7 MIKROORGANISME ENDOFITIK DAN FILOSFER 143
7.1 Mikroorganisme Endofitik 147
7.1.1 Pengertian dan Karakteristik Mikroorganisme Endofitik 147
7.1.2 Habitat dan Distribusi Endofit pada Tanaman 151
7.1.3 Mekanisme Kolonisasi Endofit 153
7.1.4 Keanekaragaman Mikroorganisme Endofitik 158
7.1.5 Faktor yang Mempengaruhi Populasi Endofit 165
7.2 Mikroorganisme Filosfer 168
7.2.1 Pengertian Filosfer 168
7.2.2 Komunitas Mikroorganisme Filosfer 172
7.2.3 Adaptasi Mikroorganisme di Filosfer 175
7.2.4 Faktor yang Mempengaruhi Komunitas Filosfer 177
7.2.5 Interaksi Antar Mikroorganisme di Filosfer 182

7.3 Metode Isolasi dan Karakterisasi 185
7.3.1 Teknik Isolasi Mikroorganisme Endofitik dan Filosfer 185
7.3.2 Identifikasi Secara Morfologi dan Molekuler 188
7.3.3 Uji Aktivitas Biologis 191
7.3.4 Pendekatan Metagenomik 193
7.4 Aplikasi dalam Pertanian Berkelanjutan 196
7.4.1 Pupuk Hayati dan Biofertilizer 196
7.4.2 Peningkatan Produktivitas Tanaman 199
7.4.3 Tantangan dan Prospek Masa Depan 202
7.5 Tantangan dan Prospek Penelitian 205
7.5.1 Tantangan Penelitian Mikroorganisme Endofitik dan Filosfer 205
7.5.2 Arah Penelitian dan Inovasi Masa Depan 209
DAFTAR PUSTAKA 217
BAB 8 MIKROORGANISME PELARUT FOSFAT DAN PENAMBAT NITROGEN 224
8.1 Mikroorganisme Pelarut Fosfor (P) 226
8.1.1 Pengertian dan Jenis Mikroorganisme Pelarut Fosfat 226
8.1.2 Mekanisme Pelarut Fosfat 227
8.1.3 Fungi Mikoriza 229
8.2 Mikroorganisme Penambat Nitrogen (N) 231
8.2.1 Pengertian dan Jenis Mikroorganisme Penambat Nitrogen 231
8.2.1 Mekanisme Penambatan Nitrogen 233
DAFTAR PUSTAKA 236
BAB 9 TEKNIK INOKULASI MIKROORGANISME YANG BERPOTENSI SESUAI PEMANFAATAN UNTUK APLIKASINYA 239
9.1 Persiapan Inokulum dan Bentuk Formulasi 241

9.1.1 Karakteristik Inokulum Siap Pakai 241
9.1.2 Karakteristik Inokulum Siap Pakai 242
9.2 Teknik Inokulasi Berdasarkan Target Sasaran (Metode Aplikasi) 244
9.2.1 Perlakuan Benih (*Seed Treatment*) 244
9.2.2 Aplikasi pada Tanah dan Area Perakaran 245
9.2.3 Aplikasi pada Tajuk/ Daun (*Foliar Application*) 246
9.2.4 Teknik Spesifik Lainnya 247
9.3 Strategi Inokulasi Berdasarkan Tujuan Pemanfaatan 248
9.3.1 Aplikasi untuk Pupuk Hayati (*Biofertilizer*) 248
9.3.2 Aplikasi untuk Agen Biokontrol (*Bioprotectant*) 249
9.3.3 Aplikasi untuk Mikroba Endofit 250
9.4 Faktor-faktor yang Mempengaruhi Keberhasilan Inokulasi di Lapangan 251
9.4.1 Aplikasi untuk Pupuk Hayati (*Biofertilizer*) 251
9.4.2 Faktor Biotik (Interaksi Ekologis) 252
9.4.3 Faktor Teknis dan Praktik Agronomis 253
9.5 Evaluasi dan Indikator Keberhasilan Inokulasi 254
9.5.1 Faktor Teknis dan Agronomis 255
9.5.2 Indikator Mikroskopis dan Laboratorium (Validasi Kolonisasi) 256
DAFTAR PUSTAKA 259
BAB 10 MIKROORGANISME: FUNGI, BAKTERI, DAN VIRUS YANG BERPERAN SEBAGAI PATOGEN TANAMAN 263
10.1 Peran Mikroorganisme dalam Ekosistem Tanaman 263
10.2 Mikroorganisme sebagai Patogen Tanaman 265
10.3 Dampak Penyakit Tanaman terhadap Hasil Pertanian dan Ekonomi 266
10.4 Konsep Dasar Patogen Tanaman 268

10.4.1 Proses Infeksi dan Perkembangan Penyakit Tanaman 268
10.4.2 Faktor yang Mempengaruhi Virulensi Patogen 270
10.5 Fungi sebagai Patogen Tanaman 273
10.5.1 Karakteristik Umum Fungi Patogen 273
10.5.2 Struktur dan Morfologi Fungi 274
10.5.3 Cara Reproduksi Fungi 276
10.5.4 Habitat dan Penyebaran Fungi 278
10.5.5 Mekanisme Infeksi Fungi 279
10.5.6 Gejala Umum Infeksi Fungi 283
10.5.7 Penyakit yang Disebabkan oleh Fungi 287
10.6 Bakteri sebagai Patogen Tanaman 292
10.6.1 Struktur Sel Bakteri 293
10.6.2 Pergerakan (*Flagel*) 296
10.6.3 Cara Hidup dan Penyebaran Bakteri Patogen Tanaman 298
10.6.4 Mekanisme Infeksi Bakteri 299
10.6.5 Gejala Infeksi Bakteri 302
10.6.6 Penyakit yang Disebabkan oleh Bakteri 305
10.7 Virus sebagai Patogen Tanaman 309
10.7.1 Karakteristik Umum Virus Patogen Tanaman 309
10.7.2 Struktur Virus Patogen Tanaman 310
10.7.3 Sistem Metabolisme Virus Patogen Tanaman 312
10.7.4 Cara Penularan Virus 313
10.7.5 Mekanisme Infeksi Virus pada Tanaman 315
10.7.6 Gejala Infeksi Virus 317
10.7.7 Penyakit yang Disebabkan oleh Virus 319
DAFTAR PUSTAKA 323
BIODATA PENULIS 343

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Habitat Mikroorganisme pada Tanaman 22
Gambar 2. 2 Kemajuan dalam Mikroorganisme Tanaman: Rizosfer, Endosfer, dan Filosfer 23
Gambar 2. 3 Gejala Layu Bakteri Akibat *Ralstonia Solanacearum* yang Menyebabkan Kelayuan Permanen pada Tanaman 25
Gambar 2. 4 Uji Potensi Bakteri Baru Sebagai Agens Hayati 27
Gambar 2. 5 Interaksi Mikroorganisme Rizosfer dengan Tanaman 30
Gambar 4. 1 Proses Kolonisasi Akar oleh Bakteri Endofit. Sel Berwarna Merah: Bakteri Penghuni Tanah; Sel Berwarna Biru: Endofit Oportunistik; Sel Berwarna Kuning: Endofit Kompetitif 74
Gambar 4. 2 Mekanisme Kerja *Pseudomonas* spp. di Rizoxfer 79
Gambar 4. 3 Perbedaan Fungsi Asosiasi Endofit Pada Tanaman 84
Gambar 5. 1 Mekanisme Langsung dan Tidak Langsung yang Dimediasi oleh Plant Growth-Promoting Rhizobacteria (PGPR) dengan efek Menguntungkan pada Tanaman Inang. ACC, 1-Aminocyclopropane-1-Carboxylic Acid; SOD, Superoxide Dismutase; CAT, Catalase; danPOX, Peroxidase 102
Gambar 5. 2 Mekanisme Peningkatan Pertumbuhan Tanaman Oleh Azospirillum. Inokulasi Bakteri Pada Tanaman Meningkatkan Toleransi Terhadap Stres Abiotik Melalui Penyesuaian Osmotik Yang Dimediasi Asam Absisat, Dan Peningkatan Pertumbuhan Akar Serta Percabangan Melibatkan Sekresi Auksin Dan Sitokinin, Serta Komponen Sel Struktural Seperti Flagelin Dan Lipopolisakarida (LPS) Yang Bertindak Sebagai Elisitor Juga Memengaruhi Imunitas Inang. Pemanjangan Batang Dapat Melibatkan Deteksi Gibberellin Bakteri. Peningkatan Biomassa Secara Keseluruhan Terjadi Melalui Fiksasi Nitrogen Biologis Serta Mekanisme Untuk Peningkatan Perolehan Fosfor Dan Besi. 105
Gambar 6. 1 Bakteri Sebagai Agen Biokontrol Pada Tanaman 120

Gambar 6. 2 Jamur/Cendawan Sebagai Agen Biokontrol Pada Tanaman 121
Gambar 6. 3 Aktinomisetes Sebagai Agen Biokontrol Pada Tanaman 123
Gambar 6. 4 Virus Sebagai Agen Biokontrol Pada Tanaman 125
Gambar 6. 5 Protozoa Sebagai Agen Biokontrol Pada Tanaman 126
Gambar 7. 1 Sifat Menguntungkan Dari Endofit. Kiri Atas Tanaman Yang Diinokulasi (In) Mikroorganisme Bermanfaat Yang Secara Signifikan Meningkatkan Pertumbuhan Tanaman Dibandingkan Dengan Tanaman Yang Tidak Diinokulasi (Ni). Berbagai Mikroorganisme, Khususnya Bakteri (Warna Oranye) Dan Jamur (Ungu), Dapat Mengkolonisasi Jaringan Internal Tanaman. Setelah Berada Di Dalam Tumbuhan, Bakteri Dan Jamur (Mikoriza) Endofit Berinteraksi Erat Dengan Sel Tumbuhan Dan Dengan Mikroorganisme Di Sekitarnya 150
Gambar 7. 2 Interaksi Tumbuhan-Endofit. Endofit Terdapat Di Akar, Batang, Daun, Bunga, Buah Dan Biji. Endofit Masuk Ke Dalam Tanaman Terutama Melalui Akar Dan Stomata. Endofit Benih Berpotensi Dalam Penularan Ke Generasi Berikutnya 154
Gambar 7. 3 Filosfer Yaitu Seluruh Bagian Permukaan Organ Tanaman Di Atas Permukaan Tanah Seperti Daun, Batang Muda, Bunga, Dan Buah Yang Dapat Merupakan Habitat Mikrob 171
Gambar 7. 4 Faktor yang Mempengaruhi Mikrobioma Filosfer dan Rizosfer 180
Gambar 8. 1 Mekanisme Pelarutan Fosfat Anorganik oleh Mikoorganisme Pelarut Fosfat 228
Gambar 8. 2 Mekanisme Pelarutan Fosfat Organik oleh Mikoorganisme Pelarut Fosfat 229
Gambar 8. 3 Mekanisme Kerja Mikoriza 231
Gambar 8. 4 Tiga Kelompok Bakteri Penambat Nitrogen. Tulisan Merah Adalah Spesies Bakteri yang Bersimbiosis. Tulisan Hitam Miring Adalah Spesies yang Hidup Bebas 233

Gambar 8. 5 Mekanisme Penambatan Nitrogen oleh Bakteri yang Hidup Bebas (Non-Simbiosis) Dan Bakteri yang Bersimbiosis dengan Tanaman..... 235

DAFTAR TABEL

Tabel 4. 1 Karakteristik Isolat Bakteri Endofit pada Akar Tanaman Jagung Varietas Motoro 75
Tabel 4. 2 Identifikasi Morfologi Sel Beberapa Isolat Bakteri Endofit Dari Colacasia Esculenta Menggunakan Pewarnaan Gram. (a) Isolat Bakteri Endofit TD1A, (b) Isolat Bakteri Endofit TD1C1, (c) Isolat Bakteri Endofit TD2D, (d) Isolat Bakteri Endofit TD2E, (e) Isolat Bakteri Endofit TD1C2, (f) Isolat Bakteri Endofit TD1C3, (g) Isolat Bakteri Endofit TD2C, (h) Isolat Bakteri Endofit TD2B 77
Tabel 4. 3 Hasil Metabolit Sekunder Ekstrak Isolat Jamur Endofit Daun Pacar Air..... 83
Tabel 7. 1 Peran Menguntungkan Endofit dalam Meningkatkan Pertumbuhan dan Kesehatan Tanaman Melalui Berbagai Mekanisme 161

BAB 1
FITOMIKROBIOLOGI

Oleh Eka Pratiwi Tenriawaru

1.1 Definisi Fitomikrobiologi

Fitomikrobiologi merupakan bidang interdisipliner yang mengkaji tentang interaksi kompleks antara tanaman dan komunitas mikroorganisme di lingkungan sekitar tanaman. Bidang ini meneliti tentang bagaimana mikroorganisme memengaruhi pertumbuhan, imunitas, kesehatan, produktivitas, hingga infeksi patogenik melalui berbagai mekanisme biokimia dan ekologis yang saling terkait (Antoszewski dkk., 2022; Sahoo dkk., 2024). Mikroorganisme yang berinteraksi dapat berupa bakteri, jamur, virus, dan alga di rizosfer (zona akar), filosfer (bagian tanaman di atas tanah), spermosfer (biji) dan endosfer (jaringan internal), baik sebagai epifit maupun endofit. Interaksi antara tanaman dan mikroorganisme ini secara signifikan memengaruhi perkembangan tanaman, nutrisi, pertahanan, dan ketahanan terhadap stres lingkungan. Secara fundamental, mikroba seperti bakteri penambat nitrogen, fungi mikoriza, dan rhizobacteria pemacu pertumbuhan tanaman (PGPR) berkontribusi terhadap kesehatan tanaman dengan memfasilitasi akuisisi nutrisi, memproduksi senyawa bioaktif, dan menginduksi resistensi sistemik. Sebaliknya, mikroba patogen memicu respons imun kompleks pada tanaman yang bertujuan membatasi infeksi dan kolonisasi (Berg, 2009; Sahoo dkk., 2024).

Tanaman menampung mikrobiom yang sangat luas dan kompleks yang meliputi bakteri, fungi, arkea, dan mikroorganisme lainnya. Mikrobioma akar, khususnya, merepresentasikan "mayoritas tak terlihat" di ekosistem daratan, secara jumlah mendominasi populasi mikroba dan secara langsung memengaruhi sifat tanaman serta produktivitas ekosistem (Rout & Southworth, 2013). Mikrobioma ini menyumbangkan gen dan fungsi metabolik esensial yang mungkin tidak dimiliki tanaman itu sendiri, sehingga memperluas kapasitas fenotipik dan adaptif tanaman. Selain itu, keanekaragaman dan struktur mikroba di rizosfer juga dipengaruhi oleh genotip tanaman, eksudat akar, dan lingkungan. Interaksi ini diatur oleh sinyal kimiawi yang melibatkan eksudat akar dan metabolit mikroba, termasuk fitohormon dan flavonoid, yang memodulasi pembentukan koloni mikroba dan sistem imun tanaman (Sarsaiya dkk., 2025; Tharanath dkk., 2024). Selain akar, filosfer dan spermosfer merupakan habitat mikroba yang kritis namun berbeda dengan interaksi yang unik. Spermosfer, yaitu mikrobiom yang mengelilingi biji yang berkecambah, memengaruhi biologi awal biji termasuk dormansi dan perkecambahan, serta berdampak pada pembentukan rizosfer dan filosfer berikutnya (Aziz dkk., 2021). Mikrobioma rizosfer, sebagai konsorsium mikroba yang sangat beragam, berfungsi sebagai mikrokosmos penting di mana tanaman merekrut mikroba yang mendukung penyerapan nutrisi, toleransi terhadap stres, dan penekanan penyakit (Kumar dkk., 2017; Tharanath dkk., 2024).

Perkembangan teknologi dan ditemukannya pendekatan omik (metagenomik dan metabolomik) memungkinkan pemahaman mendalam tentang fitomikrobiologi sekaligus merevolusi riset fitomikrobiologi. Melalui pendekatan metagenomik, struktur mikroba di rizosfer dapat diketahui dengan cepat tanpa perlu

dikulturkan terlebih dahulu, *real-time*, serta dapat mendata mikroba yang tidak dapat dikulturkan (Tenriawaru dkk., 2021). Sementara itu, pendekatan metabolomik membantu dalam mengungkap dialog kimia yang memediasi kolonisasi mikroba dan respon tanaman. Teknologi omik ini didukung dengan perkembangan dalam bidang bioinformatika dan kecerdasan buatan yang mendukung analisis data besar dan pemodelan prediktif (Baettie dkk., 2024; Xu & Fan, 2024).

1.2 Prinsip Fitomikrobiologi

Prinsip-prinsip fitomikrobiologi mencakup beberapa aspek utama yang menjelaskan bagaimana interaksi antara tanaman dan mikroorganisme berlangsung dan berperan dalam mendukung pertumbuhan serta kesehatan tanaman. Prinsip-prinsip fitomikrobiologi adalah sebagai berikut.

1.2.1 Interaksi Kompleks Antara Tanaman dan Mikroorganisme

Tanaman dan mikroorganisme epifit maupun mikroorganisme endofit membentuk hubungan mutualisme, komensalisme, atau antagonisme (Kumar dkk., 2017; Tharanath dkk., 2024). Pertumbuhan tanaman dipacu oleh mikroorganisme melalui peningkatan ketersediaan nutrisi, seperti nitrogen, pelarutan fosfat, dan produksi siderofor, serta stimulasi hormonal oleh fitohormon seperti auksin yang merangsang perkembangan akar (Berg, 2009; Sahoo dkk., 2024). Contoh nyata dari interaksi ini adalah hubungan simbiotik antara tanaman legum dengan bakteri penambat nitrogen *Rhizobium*. *Rhizobium* mengkolonisasi akar tanaman legum dan membentuk nodul akar, di mana bakteri ini menambat nitrogen atmosfer menjadi bentuk yang dapat diserap tanaman, sehingga meningkatkan ketersediaan nutrisi tanpa

penambahan pupuk sintetis. Sebagai imbalannya, tanaman menyediakan karbon organik sebagai sumber energi bagi *Rhizobium* (Antoszewski dkk., 2022; Berg, 2009). Mikroorganisme juga berperan dalam ketahanan tanaman terhadap patogen melalui antagonisme langsung dan induksi ketahanan sistemik terinduksi (ISR), dengan mikroba seperti *Bacillus, Pseudomonas*, dan *Trichoderma* yang banyak diteliti untuk fungsi pengendalian hayatinya (Berg, 2009; Sahoo dkk., 2024).

1.2.2 Pengaturan oleh Sinyal Kimiawi

Interaksi ini diatur oleh sinyal kimiawi yang melibatkan eksudat akar dan metabolit mikroba, termasuk fitohormon (auksin, sitokinin, giberelin, etilen, asam absisat), flavonoid, dan strigolaktone. Senyawa-senyawa ini memediasi perekrutan mikroba, pembentukan koloni, dan modulasi sistem imun tanaman (Sarsaiya dkk., 2025; Tharanath dkk., 2024). Interaksi yang diatur oleh sinyal kimiawi ini memastikan bahwa tanaman dapat mengelola komunitas mikroba di sekitarnya secara selektif dan adaptif, sehingga mendukung pertumbuhan, kesehatan, dan ketahanan tanaman terhadap patogen melalui mekanisme seperti induksi ketahanan sistemik terinduksi (ISR) oleh mikroba seperti *Bacillus* dan *Pseudomonas* (Berg, 2009; Sahoo dkk., 2024).

Contoh nyata dari prinsip ini adalah peran flavonoid yang dikeluarkan oleh akar tanaman legum. Flavonoid ini berfungsi sebagai sinyal spesifik yang menarik bakteri penambat nitrogen *Rhizobium* ke akar tanaman. Setelah *Rhizobium* merespon sinyal ini, bakteri menginisiasi proses pembentukan nodul akar, tempat di mana penambatan nitrogen atmosfer berlangsung. Proses ini memungkinkan tanaman mendapatkan nitrogen dalam bentuk yang dapat diserap, sementara

Rhizobium mendapatkan sumber karbon dari tanaman sebagai imbalannya (Sarsaiya dkk., 2025; Tharanath dkk., 2024). Selain itu, senyawa seperti strigolaktone juga berperan dalam merekrut jamur mikoriza arbuskular yang membentuk hubungan simbiotik dengan akar tanaman. Jamur ini membantu penyerapan fosfat dan nutrisi lain serta meningkatkan toleransi tanaman terhadap stres abiotik seperti kekeringan dan salinitas (Sahoo dkk., 2024).

1.2.3 Mekanisme Peningkatan Pertumbuhan Tanaman

Mikroorganisme berperan aktif dalam mendukung pertumbuhan tanaman melalui berbagai mekanisme biokimia dan fisiologis yang saling terkait. Mekanisme ini berkontribusi pada peningkatan efisiensi penggunaan nutrisi, pertumbuhan biomassa, dan hasil panen (Antoszewski dkk., 2022; Berg, 2009; Sahoo dkk., 2024). Mikroorganisme dapat meningkatkan ketersediaan nutrisi, memproduksi fitohormon, serta memperbaiki kondisi lingkungan akar yang secara langsung atau tidak langsung merangsang perkembangan dan produktivitas tanaman. Sebagai contoh, bakteri *Rhizobium* yang mampu menambat nitrogen, penyediaan fosfat terlarut, dan produksi siderofor. Contoh lain adalah mikroorganisme penghasil fitohormon seperti auksin, sitokinin, dan giberelin yang merangsang perkembangan akar, pembelahan sel, meningkatkan penyerapan air dan nutrisi (Berg, 2009; Sahoo dkk., 2024).

Bakteri Promotor Pertumbuhan Tanaman (PGPR) berperan penting dalam modulasi metabolisme hormon auksin pada tanaman, khususnya di lahan yang mengalami cekaman logam berat. Di lingkungan dengan kontaminasi logam berat, tanaman mengalami stres oksidatif dan gangguan fisiologis yang dapat menghambat pertumbuhan akar dan penyerapan nutrisi.

Mekanisme pengikatan atau transformasi logam oleh mikro secara tidak langsung mengurangi konsentrasi logam toksik di rizosfer. PGPR yang mampu menghasilkan atau memodulasi auksin (indole-3-asam asetat/IAA) membantu tanaman mengatasi stres tersebut dengan beberapa mekanisme, yaitu:

a. PGPR penghasil auksin meningkatkan konsentrasi hormon ini di sekitar akar, yang merangsang pemanjangan akar dan pembentukan akar lateral. Hal ini memperluas volume zona penyerapan sehingga tanaman dapat mengakses lebih banyak air dan nutrisi meskipun dalam kondisi tanah yang tercemar logam berat. Peningkatan biomassa akar ini juga memperbaiki kemampuan tanaman dalam mengeluarkan eksudat akar yang dapat mengikat logam berat, mengurangi toksisitasnya (Berg, 2009; Sahoo dkk., 2024).
b. PGPR dapat menginduksi perubahan pada metabolisme hormon auksin tanaman dengan menghasilkan enzim seperti indole-3-asam asetat oksidase yang mengatur kadar auksin agar tetap optimal, mencegah akumulasi berlebih yang dapat merugikan. Selain itu, PGPR juga dapat menghasilkan senyawa lain yang berinteraksi dengan jalur sinyal auksin, meningkatkan toleransi tanaman terhadap stres logam berat melalui regulasi ekspresi gen terkait pertumbuhan dan respon stres (Antoszewski dkk., 2022).

1.2.4 Ketahanan Tanaman Terhadap Patogen

Mikroba bermanfaat melindungi tanaman melalui antagonisme langsung terhadap patogen (produksi antibiotik, enzim litik) dan induksi ketahanan sistemik terinduksi (ISR), yang meningkatkan respons imun tanaman terhadap serangan pathogen. Selain itu,

mikroba ini dapat menginduksi sistem kekebalan tanaman melalui mekanisme yang dikenal sebagai Induksi Ketahanan Sistemik Terinduksi (ISR), di mana tanaman dipersiapkan untuk merespon serangan patogen dengan lebih efektif. (Berg, 2009; Sahoo dkk., 2024).

Contoh nyata dari prinsip ini adalah penggunaan bakteri *Bacillus* dan *Pseudomonas* yang dikenal sebagai agen pengendali hayati (*biocontrol agents*). Bacillus dapat menghasilkan antibiotik dan enzim yang melisis dinding sel patogen, sementara *Pseudomonas* menghasilkan siderofor yang menurunkan ketersediaan besi bagi patogen sehingga menghambat pertumbuhannya. Kedua mikroba ini juga dapat memicu ISR pada tanaman, meningkatkan produksi senyawa pertahanan seperti fitoaleksin dan protein patogen-resisten, yang memperkuat ketahanan tanaman terhadap infeksi (Berg, 2009; Sahoo dkk., 2024).

Jamur *Trichoderma* juga banyak digunakan sebagai biopestisida karena kemampuannya bersaing dengan patogen melalui mekanisme kompetisi ruang dan nutrisi, produksi senyawa antimikroba, serta stimulasi pertumbuhan tanaman dan sistem kekebalan tanaman. *Trichoderma* mampu meningkatkan aktivitas enzim pertahanan tanaman dan mengaktifkan jalur sinyal hormonal yang berhubungan dengan respon stres (Berg, 2009; Sahoo dkk., 2024).

1.2.5 Simbiosis dan Siklus Nutrisi

Dalam siklus nutrisi, mikroorganisme memainkan peran kunci dalam mineralisasi dan mobilisasi nutrisi, terutama fosfor dan nitrogen, yang sangat penting bagi pertumbuhan tanaman. Misalnya, mikroorganisme di rizosfer mampu melepas asam karboksilat dan enzim

fosfatase yang membantu melarutkan fosfat yang terikat pada kalsium, besi, atau aluminium sehingga menjadi lebih tersedia bagi tanaman (Deubel & Merbach, 2005). Selain itu, mikroba saprofitik mendukung penguraian bahan organik di tanah sehingga melepaskan nutrisi ke dalam siklus tanah.

Simbiosis mikoriza secara signifikan mengubah properti kimia dan biologis dari rizosfer, membentuk zona khusus yang dikenal sebagai mikorizosfer, di mana terjadi interaksi dinamis antara jamur mikoriza, tanaman, dan mikroba tambahan. Contohnya adalah mikorizosfer pada tanaman legum yang melibatkan simultan simbiosis dengan bakteri pengikat nitrogen, sehingga memperkuat siklus nitrogen di ekosistem tersebut (Azcón-Aguilar & Barea, 2015).

Fungsi mutualistik ini juga mengatur keseimbangan karbon dan nitrogen. Jamur mikoriza ini memperoleh karbon hasil fotosintesis dari tanaman dan sebagai balasan meningkatkan penyerapan nitrogen dan fosfor dari tanah, bahkan menyesuaikan strategi pengambilan nutrisi berdasarkan jumlah karbon yang diterima (Fellbaum dkk., 2012). Hubungan ini diatur sedemikian rupa sehingga kedua pihak (tanaman dan mikroba) saling menghargai sumber daya yang diberikan, menjamin manfaat timbal balik optimal.

1.2.6 Keanekaragaman dan Struktur Komunitas Mikroba

Keanekaragaman spesies tanaman secara signifikan membentuk struktur komunitas mikroba tanah, terutama mikroba di rizosfer, dengan pengaruh yang lebih nyata terhadap komunitas jamur dibandingkan bakteri. Keberagaman tanaman meningkatkan biomassa mikroba, aktivitas respirasi, dan kelimpahan jamur, yang pada gilirannya meningkatkan proses pembentukan

nutrisi seperti mineralisasi nitrogen di tanah (Zak dkk., 2003). Tanaman tidak hanya menjadi sumber karbon organik melalui eksudat akar yang menjadi energi bagi mikroorganisme, tetapi juga mampu mengubah sifat kimiawi dan biologis tanah (misalnya pH, kandungan karbon organik tanah) yang secara tidak langsung memengaruhi keragaman dan komposisi komunitas mikroba (Song dkk., 2025). Faktor-faktor ini memungkinkan terbentuknya habitat mikro yang mendukung komunitas mikroba spesifik seperti kelompok bakteri *Rhizobium* yang berperan dalam siklus nutrisi.

Komunitas mikroba tanah terdiri dari berbagai kelompok mikroorganisme, termasuk bakteri, fungi, archaea, protista, dan virus, yang masing-masing memiliki peran unik dalam ekosistem tanah. Bakteri dan fungi merupakan dominan utama, dengan kelompok jamur *Ascomycota* dan bakteri seperti *Actinobacteria* dan *Proteobacteria* yang sering ditemukan dominan di habitat tanah yang berkaitan dengan vegetasi kompleks (Song dkk., 2025; Tharanath dkk., 2024). Selain itu, protista tanah, sebagai bagian dari komunitas mikroba yang lebih luas, turut memengaruhi fungsi ekosistem melalui interaksi seperti predasi dan dekomposisi bahan organik, yang berdampak positif pada stabilitas dan ketahanan ekosistem, terutama dalam menghadapi kondisi stres lingkungan seperti kekeringan (Liu dkk., 2026).

Susunan komunitas mikroba dikendalikan oleh interaksi kompleks antara jenis tanaman, sifat akar, dan fitur lingkungan tanah seperti pH dan kandungan bahan organik tanah. Misalnya, variasi filogenetik tanaman dan sifat akar berkorelasi kuat dengan variasi kekayaan dan komposisi komunitas mikroba rizosfer, sekaligus mempengaruhi aktivitas siklus nitrogen seperti

nitrifikasi, yang penting bagi ketersediaan nutrisi bagi tanaman (Wang dkk., 2025). Tanaman juga melepaskan eksudat yang dapat memengaruhi interaksi dan stabilitas jaringan mikroba di sekitarnya, mengubah dinamika komunitas mikroba dan kapasitasnya dalam mendukung fungsi ekosistem (Tharanath dkk., 2024; Wang dkk., 2025).

Keanekaragaman mikroba yang tinggi cenderung meningkatkan ketahanan komunitas terhadap gangguan eksternal serta memperbaiki fungsi ekosistem tanah seperti siklus nutrisi, penyerapan mineral, dan proteksi terhadap patogen. Pentingnya keragaman ini juga mencakup aspek mikroba pengikat nitrogen, pelarut fosfat, dan penghasil senyawa tumbuh-pengatur (*phytohormone*) yang berkontribusi pada peningkatan produktivitas tanaman dan keberlanjutan praktik pertanian (Kiprotich dkk., 2025; Tharanath dkk., 2024). Faktor dominasi kelompok mikroba pun memengaruhi fungsi komunitas. Misalnya, dominasi bakteri dengan aktivitas mikroba yang tinggi berkorelasi dengan produktivitas padang rumput yang tinggi namun retensi karbon dan nitrogen lebih rendah. Sebaliknya, komunitas yang didominasi oleh jamur dan bakteri dengan aktivitas lebih lambat mendukung penyimpanan karbon dan retensi nitrogen yang lebih baik di dalam tanah (Grigulis dkk., 2012).

1.3 Keterkaitan Fitomikrobiologi dengan Bidang Lain

Fitomikrobiologi merupakan disiplin ilmu yang multidisipliner, yaitu menggabungkan ilmu mikrobiologi, biokimia, kimia tanaman, ekologi mikroba, bioteknologi, ilmu tanah, bioinformatika, ilmu pertanian, dan biologi sintetik

(Liu dkk., 2019; Jansson dkk., 2023; Kamath dkk., 2025; Kumar dkk., 2025; Wankhade dkk., 2025).

1.4 Aplikasi Prinsip Fitomikrobiologi

Fitomikrobiologi memiliki berbagai penerapan penting dalam bidang pertanian berkelanjutan dan peningkatan produktivitas tanaman. Aplikasi tersebut dapat digambarkan sebagai berikut:

1. Peningkatan pertumbuhan dan kesehatan tanaman

   Mikroorganisme seperti bakteri penghasil hormon pertumbuhan (PGPR), mikoriza, dan mikroba endofit dapat secara langsung meningkatkan pertumbuhan tanaman melalui peningkatan ketersediaan nutrisi (misalnya pengikatan nitrogen, pelarutan fosfat), stimulasi hormon tanaman, dan peningkatan penyerapan air dan nutrisi. Aplikasi inokulan mikroba ini dapat digunakan sebagai biofertilizer untuk menggantikan atau mengurangi penggunaan pupuk kimia secara ramah lingkungan (Berg, 2009; Kashyap dkk., 2017; Sharma dkk., 2025).
2. Pengendalian hayati penyakit dan hama

   Fitomikrobiologi menyediakan mikroorganisme antagonis yang mampu mengendalikan patogen tanaman dan hama secara alami. Misalnya, jamur entomopatogen *Beauveria bassiana* dan *Metarhizium* spp. serta bakteri seperti *Bacillus thuringiensis* tidak hanya efektif dalam pengendalian serangga tetapi juga dapat meningkatkan sistem imun tanaman dan menekan penyakit tanaman melalui metabolit sekunder antimikroba. Pendekatan ini mendukung pengurangan penggunaan pestisida kimia (Berg, 2009; Saha dkk., 2025).

3. Rekayasa dan manajemen Mikrobioma tanah

   Penerapan konsep rekayasa mikrobioma dan penggunaan komunitas mikroba sintetis (*SynComs*) memungkinkan peningkatan stabilitas dan fungsi komunitas mikroba rizosfer yang menguntungkan tanaman, seperti peningkatan ketahanan terhadap stres abiotik (kering, salinitas) dan biotik (penyakit). Pengelolaan mikrobioma yang tepat dapat meningkatkan kesehatan tanah dan efisiensi penggunaan sumber daya alam (Kamath dkk., 2025; Sharma dkk., 2025; Wankhade dkk., 2025b).

4. Sintesis metabolit mikroba

   Penggunaan pengetahuan tentang eksudat akar yang menarik mikroba menguntungkan dan produksi metabolit mikroba yang melindungi tanaman digunakan untuk memodifikasi komunitas mikroba di rizosfer. Hal ini membantu mengoptimalkan interaksi mutualistik serta menghambat perkembangan patogen secara alami. Pendekatan ini mendukung pengembangan biofertilizer dan biostimulan baru yang berbasis metabolit alami (Fan dkk., 2025; Hiremath dkk., 2024).

5. Pengembangan pertanian organik dan ramah lingkungan

   Dengan menggantikan input kimia melalui inokulan mikroba, fitomikrobiologi berkontribusi pada sistem pertanian organik dan berkelanjutan yang menjaga kesuburan tanah dan mengurangi pencemaran lingkungan. Penerapan mikroba efektif dalam biofertilizer dan biopestisida mendukung produksi tanaman yang sehat, bebas residu kimia, serta meningkatkan kekebalan tanaman terhadap stres lingkungan (Kumar dkk., 2025; Xu dkk., 2024).

6. Pemulihan dan rehabilitasi tanah terdegradasi

   Mikroba tanah memiliki kemampuan untuk memperbaiki kondisi tanah yang rusak atau terkontaminasi (bioremediasi), serta meningkatkan struktur fisik dan kesuburan tanah. Ini sangat penting untuk menjaga produktivitas lahan dan mendukung ekosistem pertanian yang lebih tangguh dalam menghadapi perubahan iklim (Kumar dkk., 2025; Sharma dkk., 2025).

7. Pengurangan stres lingkungan pada tanaman

   Mikroorganisme menguntungkan mampu membantu tanaman dalam menghadapi berbagai stres lingkungan seperti kekeringan, salinitas, dan suhu ekstrem dengan meningkatkan toleransi fisiologis tanaman melalui produksi hormon, enzim pengurangi stres, dan metabolit lainnya. Aplikasi mikroba ini penting dalam menjaga produktivitas tanaman di tengah tantangan perubahan iklim global (Semwal dkk., 2025).

1.5 Arah dan Tantangan Riset Fitomikrobiologi

Kompleksitas komunitas mikroba, pengaruh faktor abiotik, dan kesulitan isolasi mikroba non-kultur menjadi tantangan utama. Implementasi hasil riset ke lapangan memerlukan pendekatan berbasis lokasi dan kolaborasi multidisiplin. Penelitian masa depan fokus pada integrasi multi-omik dan pengelolaan mikrobioma presisi untuk mendukung ketahanan pangan dan keberlanjutan lingkungan (Beattie dkk., 2024; Sarsaiya dkk., 2025).

DAFTAR PUSTAKA

Antoszewski, M., Mierek-Adamska, A., & Dąbrowska, G. B. 2022. The Importance of Microorganisms for Sustainable Agriculture-A Review. *Metabolites*, 12(11), 1100. https://doi.org/10.3390/metabo12111100

Azcón-Aguilar, C., & Barea, J. M. 2015. Nutrient cycling in the mycorrhizosphere. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 15, https://doi.org/10.4067/s0718-95162015005000035

Aziz, U., Rehmani, M. S., Wang, L., Luo, X., Xian, B., Wei, S., Wang, G., & Shu, K. 2021. Toward a Molecular Understanding of Rhizosphere, Phyllosphere, and Spermosphere Interactions in Plant Growth and Stress Response. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 40(6), 479–500. https://doi.org/10.1080/07352689.2022.2031728

Beattie, G. A., Bayliss, K. L., Jacobson, D. A., Broglie, R., Burkett-Cadena, M., Sessitsch, A., Kankanala, P., Stein, J., Eversole, K., & Lichens-Park, A. 2024. From Microbes to Microbiomes: Applications for Plant Health and Sustainable Agriculture. *Phytopathology*, 114(8), 1742–1752. https://doi.org/10.1094/phyto-02-24-0054-kc

Berg, G. 2009. Plant–microbe interactions promoting plant growth and health: perspectives for controlled use of microorganisms in agriculture. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 84(1), 11–18. https://doi.org/10.1007/s00253-009-2092-7

Deubel, A., & Merbach, W. 2005. *Influence of Microorganisms on Phosphorus Bioavailability in Soils* (pp. 177–191). Springer. https://doi.org/10.1007/3-540-26609-7_9

Fan, X., Ge, A.-H., Qi, S., Guan, Y., Wang, R., Yu, N., & Wang, E. 2025. Root exudates and microbial metabolites: signals and nutrients in plant-microbe interactions. Science China. *Life Sciences*, 68(8), 2290–2302. https://doi.org/10.1007/s11427-024-2876-0

Fellbaum, C. R., Mensah, J. A., Pfeffer, P. E., Kiers, E. T., & Bücking, H. 2012. The role of carbon in fungal nutrient uptake and transport. *Plant Signaling & Behavior*, 7(11), 1509–1512. https://doi.org/10.4161/psb.22015

Grigulis, K., Lavorel, S., Krainer, U., Legay, N., Baxendale, C., Dumont, M., Kastl, E., Arnoldi, C., Bardgett, R. D., Poly, F., Pommier, T., Schloter, M., Tappeiner, U., Bahn, M., & Clément, J. 2012. Relative contributions of plant traits and soil microbial properties to mountain grassland ecosystem services. *Journal of Ecology*, 101(1), 47–57. https://doi.org/10.1111/1365-2745.12014

Hiremath, S. S., Prasanna, N. L., S, S., M, A., C.K, A., Nigam, R., Kumar, S., & Elangovan, M. 2024. A Review on Role of Root Exudates in Shaping Plant-Microbe-Pathogen Interactions. *Journal of Advances in Microbiology*, 24(12), 1–17. https://doi.org/10.9734/jamb/2024/v24i12868

Jansson, J. K., Mcclure, R., & Egbert, R. G. 2023. Soil microbiome engineering for sustainability in a changing environment. *Nature Biotechnology*, 41(12), 1716–1728. https://doi.org/10.1038/s41587-023-01932-3

Kamath, A., Patel, D., Saraf, M., & Patel, S. 2025. Rooted intelligence: Integrating AI, Omics, and Synthetic biology to engineer the plant microbiome. *3 Biotech*, 16(1), 10. https://doi.org/10.1007/s13205-025-04614-w

Kashyap, A. S., Pandey, V. K., Manzar, N., Kannojia, P., Singh, U. B., & Sharma, P. K. 2017. *Role of Plant Growth-Promoting Rhizobacteria for Improving Crop Productivity in Sustainable Agriculture* (pp. 673–693). Springer Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-10-6593-4_28

Kiprotich, K., Muema, E., Wekesa, C., Ndombi, T., Muoma, J., Omayio, D., Ochieno, D., Motsi, H., Mncedi, S., & Tarus, J. 2025. Unveiling the roles, mechanisms and prospects of soil microbial communities in sustainable agriculture. *Discover Soil*, 2(1). https://doi.org/10.1007/s44378-025-00037-4

Kumar, J., Singh, D., Ghosh, P., & Kumar, A. 2017. *Endophytic and Epiphytic Modes of Microbial Interactions and Benefits* (pp. 227–253). Springer Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-10-5813-4_12

Kumar, R., Farda, B., Mignini, A., Djebaili, R., Koolman, L., Paul, A., Mondal, S., Joel, J. M., Pandit, A., Panneerselvam, P., Pellegrini, M., & Mitra, D. 2025. Microbial Solutions in Agriculture: Enhancing Soil Health and Resilience Through Bio-Inoculants and Bioremediation. *Bacteria*, 4(3), 28. https://doi.org/10.3390/bacteria4030028

Liu, F., Hewezi, T., Lebeis, S. L., Pantalone, V., Grewal, P. S., & Staton, M. E. 2019. Soil indigenous microbiome and plant genotypes cooperatively modify soybean rhizosphere microbiome assembly. *BMC Microbiology*, 19(1), 201. https://doi.org/10.1186/s12866-019-1572-x

Liu, H., Martins, C. S. C., Zhou, G., Jayaramaiah, R. H., Zhang, H., Li, J., Singh, P., Yan, Z., Wang, J., Reich, P. B., Eisenhauer, N., Delgado-Baquerizo, M., & Singh, B. K. 2026. Soil Protist Diversity and Biotic Interactions Shape Ecosystem Functions Under Climate Change. *Global*

Change Biology, 32(1), e70692. https://doi.org/10.1111/gcb.70692

Rout, M. E., & Southworth, D. 2013. The root microbiome influences scales from molecules to ecosystems: The unseen majority. *American Journal of Botany*, 100(9), 1689–1691. https://doi.org/10.3732/ajb.1300291

Saha, N., Sharma, A., & Bora, P. 2025. Expanding the functional landscape of microbial entomopathogens in agriculture beyond pest management. *Folia Microbiologica*, 70(2), 343–357. https://doi.org/10.1007/s12223-025-01251-x

Sahoo, S., Panda, S. S., Kumar, S., Nigam, R., Sarangi, S., Choudhary, M., Yuvarani, R., & Shivam, S. 2024. A Review on Plant-microbe Interactions and its Defence Mechanism. *Plant Cell Biotechnology and Molecular Biology*, 25(11–12), 159–175. https://doi.org/10.56557/pcbmb/2024/v25i11-128920

Sarsaiya, S., Jain, A., Singh, R., Gong, Q., Wu, Q., Chen, J., & Shi, J. 2025. Unveiling the rhizosphere microbiome of Dendrobium: mechanisms, microbial interactions, and implications for sustainable agriculture. *Frontiers in Microbiology*, 16, 1531900. https://doi.org/10.3389/fmicb.2025.1531900

Semwal, P., Dave, A., Israr, J., Misra, S., Kumar, M., & Paul, D. 2025. Exploring Microbial Ecosystem Services for Environmental Stress Amelioration: A Review. *International Journal of Molecular Sciences*, 26(10), 4515. https://doi.org/10.3390/ijms26104515

Sharma, S., Gupta, N., Kaur, S., Kumawat, K. C., & Chakkal, A. S. 2025. Soil microbial resources: Unlocking sustainable strategies for crop productivity and soil health.

Current Research in Microbial Sciences, 9(5), 100468. https://doi.org/10.1016/j.crmicr.2025.100468

Song, Y.-H., Xu, F.-B., Wang, M.-H., Xie, Y.-B., Tian, L.-M., Lv, C.-X., Zhang, X.-W., Guo, Z.-M., & Zhang, D. 2025. Plant Species Diversity Improves Soil Physicochemical Traits and Modulates Soil Microbial Community Structure, with a Pronounced Enhancement of Fungal Diversity in Urban Forests. *Plants*, 15(1), 79. https://doi.org/10.3390/plants15010079

Tenriawaru, Suharjono, Ardyati, T., & Zubaidah, E. 2021. Diversity and the potency of indigenous bacteria in dengen fruit (*Dillenia serrata*), passsion fruit (*Passiflora edulis*), and pineapple fruit (*Ananas* sp.) of South Sulawesi, Indonesia. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 743: 012071. Doi: 10.1088/1755-1315/743/1/012071.

Tharanath, A. C., Upendra, R. S., & Rajendra, K. 2024. Soil Symphony: A Comprehensive Overview of Plant–Microbe Interactions in Agricultural Systems. *Applied Microbiology*, 4(4), 1549–1567. https://doi.org/10.3390/applmicrobiol4040106

Wang, R., Chen, Y., Zhang, H., Wang, Z., Zheng, F., Mu, Y., Bao, H., Ma, Z., Chu, C., & Yang, Y. 2025. Plant–microbe interactions drive the rhizosphere microbial assembly and nitrogen cycling in a subtropical forest. *Functional Ecology*, 39(5), 1274–1287. https://doi.org/10.1111/1365-2435.70025

Wankhade, A., Wilkinson, E., Britt, D. W., & Kaundal, A. 2025. Plant-Microbe Interactions in the Rhizosphere and the Role of Root Exudates in Chemical Signaling and Microbiome Engineering.. https://doi.org/10.20944/preprints202506.0134.v1

Xu, Y., & Fan, K.-T. 2024. Advancements in Metabolomics: Illuminating Plant-Microbe Interactions for Enhanced Ecosystems and Agricultural Productivity. https://doi.org/10.20944/preprints202406.0670.v1

Zak, D. R., Holmes, W. E., White, D. C., Peacock, A. D., & Tilman, D. 2003. Plant Diversity, Soil Microbial Communities, and Ecosystem Function: Are There Any Links? *Ecology*, 84(8), 2042–2050. https://doi.org/10.1890/02-0433

BAB 2

KONSEP DASAR FITOMIKROBIOLOGI

Oleh Gallyndra Fatkhu Dinata

2.1 Sejarah Perkembangan Fitomikrobiologi

Kajian mengenai hubungan tanaman dan mikroorganisme pada awalnya berkembang dari disiplin mikrobiologi tanah, patologi tumbuhan, dan fisiologi tanaman. Pada fase awal, penelitian lebih banyak berfokus pada mikroorganisme penyebab penyakit tanaman, seperti bakteri, jamur, dan virus yang menyebabkan kerugian hasil panen. Seiring perkembangan ilmu pengetahuan, ditemukan pula kelompok mikroba yang memberikan manfaat bagi tanaman, misalnya bakteri penambat nitrogen, mikoriza, serta mikroba pelarut fosfat. Temuan ini mengubah paradigma bahwa mikroorganisme tidak selalu bersifat merugikan, tetapi juga dapat menjadi mitra biologis tanaman dalam meningkatkan pertumbuhan dan ketahanan lingkungan (Compant *et al*., 2025).

Dalam dekade terakhir, fitomikrobiologi berkembang pesat melalui pendekatan “plant microbiome” dan konsep holobiont, yaitu tanaman dipandang sebagai satu kesatuan dengan komunitas mikroba yang hidup di dalam maupun di sekitarnya. Teknologi sekuensing generasi baru (NGS), metagenomik, metabolomik, dan bioinformatika memperluas pemahaman mengenai struktur komunitas mikroba serta

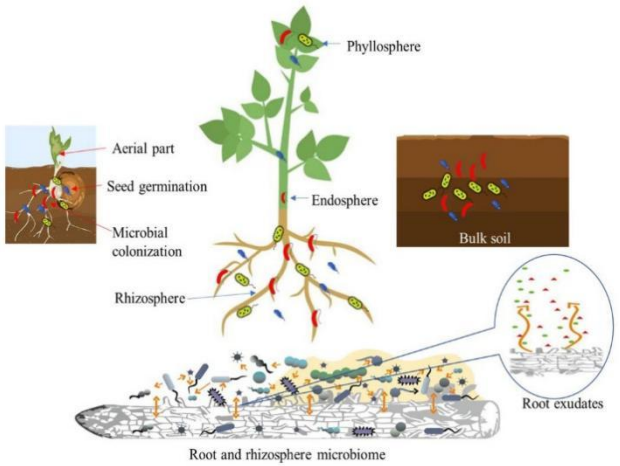
fungsi ekologisnya. Pada tahun 2024–2026, arah riset internasional menekankan pemanfaatan mikrobioma tanaman untuk pertanian cerdas iklim, efisiensi pupuk, serta peningkatan ketahanan tanaman terhadap cekaman abiotik dan biotik.

2.2 Mikroorganisme yang Berasosiasi dengan Tanaman

Tanaman berasosiasi dengan beragam mikroorganisme yang mencakup bakteri, fungi, archaea, virus, aktinomiset, serta protista. Kelompok bakteri yang banyak diteliti antara lain *Rhizobium*, *Azospirillum*, *Bacillus*, dan *Pseudomonas* karena berperan dalam fiksasi nitrogen, produksi hormon tumbuh, serta pengendalian hayati. Fungi seperti mikoriza arbuskular membantu penyerapan fosfor dan air, sedangkan endofit jamur tertentu mampu meningkatkan toleransi tanaman terhadap kekeringan dan patogen (Sharma *et al*., 2024a).

Selain mikroba yang menguntungkan, terdapat pula mikroorganisme oportunistik dan patogen yang dapat hidup bersama tanaman. Virus tumbuhan, bakteri patogen, dan jamur patogen sering menjadi bagian dari komunitas mikroba tanaman, terutama saat terjadi ketidakseimbangan ekosistem. Penelitian modern menunjukkan bahwa keberadaan mikroorganisme tersebut dipengaruhi oleh genotipe tanaman, kondisi tanah, umur tanaman, serta praktik budidaya, sehingga komunitas mikroba tanaman bersifat dinamis sepanjang siklus hidup tanaman (Compant *et al*., 2025).

2.3 Habitat Mikroorganisme pada Tanaman



Gambar 2. 1 Habitat Mikroorganisme pada Tanaman

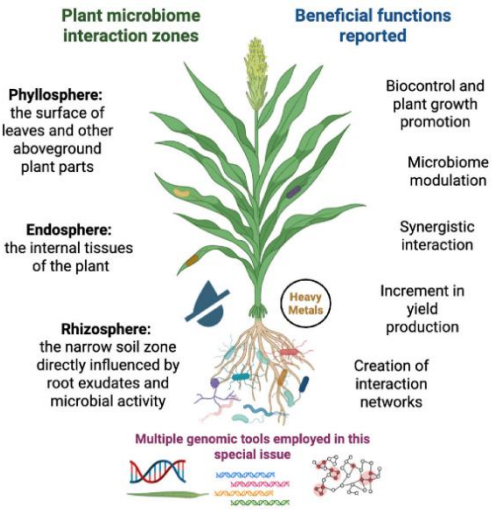
(Sumber: Liu-Xu *et al*., 2024)

Habitat utama mikroorganisme tanaman dibagi menjadi beberapa zona ekologis, yaitu rizosfer, rizoplan, endosfer, filosfer, spermosfer, dan antosfer. Rizosfer merupakan daerah tanah di sekitar akar yang kaya eksudat akar sehingga menjadi pusat aktivitas mikroba paling intensif. Di wilayah ini terjadi interaksi kompleks antara akar tanaman, nutrisi tanah, dan komunitas mikroba yang memengaruhi pertumbuhan tanaman secara langsung (Hanif *et al*., 2024).

Filosfer adalah permukaan daun dan bagian tajuk tanaman yang dihuni bakteri serta fungi toleran terhadap radiasi ultraviolet dan fluktuasi suhu. Endosfer mencakup jaringan internal akar, batang, daun, dan biji yang ditempati mikroba endofit tanpa menimbulkan gejala penyakit. Setiap habitat memiliki komunitas mikroba khas dengan fungsi spesifik, sehingga pemahaman *niche* mikroba sangat penting

dalam pengembangan bioinokulan modern (Sharma *et al*., 2024a).

2.4 Peran Mikroorganisme bagi Tanaman



Gambar 2. 2 Kemajuan dalam Mikroorganisme Tanaman: Rizosfer, Endosfer, dan Filosfer

(Sumber: Compant *et al*., 2025)

Mikroorganisme memiliki kontribusi yang sangat penting dalam mendukung ketersediaan unsur hara bagi tanaman melalui berbagai mekanisme biologis di daerah perakaran maupun di jaringan tanaman. Bakteri penambat nitrogen seperti *Rhizobium*, *Azospirillum*, dan beberapa strain *Bradyrhizobium* mampu mengikat nitrogen bebas dari atmosfer dan mengubahnya menjadi bentuk amonia yang dapat diserap tanaman. Aktivitas ini membantu meningkatkan efisiensi penggunaan nitrogen sekaligus mengurangi ketergantungan terhadap pupuk sintetis. Selain itu, kelompok bakteri pelarut fosfat dan kalium dapat

melepaskan unsur hara yang sebelumnya terikat di dalam tanah sehingga menjadi tersedia untuk mendukung metabolisme dan pertumbuhan tanaman (Hanif *et al*., 2024; Compant *et al*., 2025).

Di samping perannya dalam nutrisi, mikroorganisme juga memengaruhi pertumbuhan tanaman melalui produksi senyawa bioaktif. Banyak bakteri rizosfer dan mikroba endofit diketahui menghasilkan fitohormon seperti auksin, giberelin, dan sitokinin yang berfungsi merangsang pembelahan sel, pemanjangan akar, pembentukan cabang akar, serta perkembangan organ vegetatif tanaman. Mikroba tertentu juga menghasilkan siderofor yang membantu meningkatkan ketersediaan besi di lingkungan perakaran, terutama pada tanah dengan kandungan Fe yang rendah atau kurang tersedia. Dengan adanya interaksi tersebut, tanaman memperoleh dukungan fisiologis yang lebih baik untuk tumbuh optimal di berbagai kondisi lingkungan (Berg *et al*., 2020; Sharma *et al*., 2024a).

Peran penting lainnya adalah meningkatkan ketahanan tanaman terhadap cekaman biotik maupun abiotik. Mikroorganisme tertentu mampu mengaktifkan *induced systemic resistance* (ISR), yaitu respons pertahanan tanaman yang membuat tanaman lebih siap menghadapi serangan patogen. Selain itu, mikroba juga membantu tanaman beradaptasi terhadap kekeringan, salinitas, suhu ekstrem, dan tekanan lingkungan lainnya melalui pengaturan keseimbangan hormon, osmoprotektan, dan peningkatan efisiensi penyerapan air. Oleh karena itu, dalam sistem pertanian modern mikroorganisme tidak lagi dipandang sebagai organisme pendukung semata, melainkan sebagai komponen biologis yang berperan aktif dalam menjaga produktivitas dan stabilitas tanaman (Compant *et al*., 2025; Trivedi *et al*., 2022).

2.5 Mikroorganisme Patogen Tanaman



Gambar 2. 3 Gejala Layu Bakteri Akibat *Ralstonia Solanacearum* yang Menyebabkan Kelayuan Permanen pada Tanaman

(Sumber: Sharma and Kumar, 2024)

Mikroorganisme patogen tanaman merupakan kelompok organisme yang mampu menginfeksi jaringan tanaman dan menimbulkan gangguan fisiologis hingga menyebabkan penyakit. Kelompok ini meliputi bakteri, fungi, virus, oomycetes, dan mikroorganisme lain yang dapat menyerang akar, batang, daun, bunga, maupun buah. Beberapa bakteri patogen penting antara lain *Xanthomonas spp.*, *Ralstonia solanacearum*, dan *Pectobacterium spp.*, sedangkan fungi patogen yang sering ditemukan di lapangan meliputi *Fusarium spp.*, *Colletotrichum spp.*, dan *Magnaporthe oryzae*. Infeksi yang terjadi dapat menyebabkan nekrosis, klorosis, layu, busuk jaringan, hingga penurunan kualitas hasil panen secara signifikan (Sharma *et al*., 2024b; Savary *et al*., 2019).

Perkembangan ilmu fitomikrobiologi menunjukkan bahwa penyakit tanaman tidak selalu dipicu oleh satu patogen tunggal. Penelitian terbaru memperkenalkan konsep *patobiome*, yaitu keterlibatan komunitas mikroorganisme tertentu yang bersama-sama membentuk kondisi mendukung terjadinya penyakit. Dalam kondisi lingkungan yang tidak seimbang, komunitas mikroba yang semula stabil dapat mengalami perubahan komposisi atau *dysbiosis*, sehingga membuka peluang bagi mikroorganisme patogen untuk berkembang lebih dominan. Kondisi tersebut memperlihatkan bahwa kesehatan tanaman juga dipengaruhi oleh keseimbangan mikrobioma secara keseluruhan, bukan hanya keberadaan patogen utama (Compant *et al*., 2025; Trivedi *et al*., 2022).

Pemahaman mengenai patogen tanaman saat ini tidak hanya berfokus pada identifikasi penyebab penyakit, tetapi juga mencakup strategi pengelolaan berbasis ekologi mikroba. Pendekatan tersebut dilakukan melalui pemanfaatan agen hayati, peningkatan keberagaman mikroba menguntungkan, dan manajemen habitat untuk menekan populasi patogen secara alami. Strategi ini dinilai lebih berkelanjutan dibanding pengendalian berbasis pestisida kimia karena menjaga keseimbangan ekosistem mikroba tanaman serta menekan risiko resistensi patogen dalam jangka panjang (Berg *et al*., 2020; Hanif *et al*., 2024).

2.6 Fitomikrobiologi dalam Pertanian Berkelanjutan



Gambar 2. 4 Uji Potensi Bakteri Baru Sebagai Agens Hayati

(Sumber: Dinata *et al*., 2026)

Fitomikrobiologi memiliki peran strategis dalam mendukung sistem pertanian berkelanjutan karena menawarkan pendekatan biologis yang mampu meningkatkan produktivitas sekaligus menjaga keseimbangan lingkungan. Pemanfaatan mikroorganisme sebagai agens pupuk hayati menjadi salah satu aplikasi yang berkembang pesat, terutama melalui penggunaan bakteri penambat nitrogen, mikroba pelarut fosfat, serta fungi mikoriza. Kehadiran mikroba tersebut membantu meningkatkan efisiensi serapan unsur hara dan mengurangi penggunaan pupuk kimia yang berlebihan. Selain itu, agen hayati seperti *Bacillus spp.* dan *Trichoderma spp.* juga dimanfaatkan untuk menekan patogen tanaman secara ramah lingkungan (Compant *et al*., 2025; Hanif *et al*., 2024).

Dalam konteks keberlanjutan ekosistem, mikroorganisme tanaman berkontribusi terhadap perbaikan kualitas tanah melalui peningkatan aktivitas biologis, pembentukan agregat tanah, serta dekomposisi bahan organik. Aktivitas ini mendukung stabilitas struktur tanah dan memperbaiki kapasitas tanah dalam menyimpan air serta

unsur hara. Selain itu, pemanfaatan mikroba juga berkaitan erat dengan pertanian rendah karbon karena dapat menekan emisi gas rumah kaca dari pemupukan kimia dan meningkatkan akumulasi karbon organik di tanah. Peran tersebut menjadi semakin penting di tengah tantangan perubahan iklim global dan kebutuhan peningkatan produksi pangan (Trivedi *et al*., 2022; Sharma *et al*., 2024a).

Perkembangan terbaru menunjukkan bahwa fitomikrobiologi mulai terintegrasi dengan teknologi pertanian presisi (*precision agriculture*). Penggunaan sensor tanah, analisis data digital, kecerdasan buatan, dan pemetaan mikrobioma memungkinkan aplikasi bioinput dilakukan secara lebih tepat sasaran sesuai kondisi lahan dan kebutuhan tanaman. Pendekatan ini menjadi arah baru pertanian modern yang menggabungkan teknologi digital dengan sistem biologis sehingga lebih efisien, adaptif, dan berkelanjutan dalam jangka panjang (Hanif *et al*., 2024; Compant *et al*., 2025).

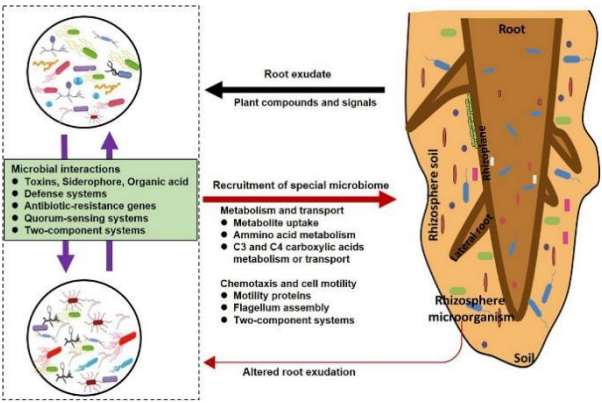
2.7 Tantangan dan Prospek Pengembangan

Walaupun memiliki potensi besar, penerapan fitomikrobiologi di lapangan masih menghadapi berbagai tantangan teknis dan biologis. Salah satu kendala utama adalah ketidakkonsistenan performa mikroba ketika diaplikasikan di lingkungan yang berbeda. Mikroba yang menunjukkan hasil baik pada skala laboratorium atau rumah kaca belum tentu memberikan respons serupa di lahan terbuka. Hal ini dipengaruhi oleh kondisi tanah, iklim, keberadaan mikroba asli, serta perbedaan genotipe tanaman. Faktor-faktor tersebut menyebabkan efektivitas bioinokulan menjadi sangat dinamis dan memerlukan penyesuaian spesifik lokasi (Compant *et al*., 2025; Berg *et al*., 2020).

Tantangan lain berkaitan dengan aspek formulasi dan komersialisasi produk berbasis mikroba. Stabilitas populasi selama penyimpanan, masa simpan, media pembawa, kompatibilitas antar strain, hingga teknik aplikasi menjadi faktor penting yang menentukan keberhasilan penggunaan di tingkat petani. Selain itu, kebijakan regulasi dan standardisasi mutu bioinput di berbagai negara masih berkembang dan belum sepenuhnya seragam. Kondisi ini menjadi perhatian penting dalam memperluas adopsi teknologi mikroba pada sektor pertanian secara luas (Hanif *et al*., 2024; Trivedi *et al*., 2022).

Di sisi lain, prospek pengembangan fitomikrobiologi sangat menjanjikan seiring kemajuan teknologi molekuler dan bioinformatika. Riset internasional terbaru mengarah pada pengembangan *synthetic microbial community* (SynCom), pemuliaan tanaman yang mampu merekrut mikroba unggul, rekayasa eksudat akar, serta integrasi data omics dengan kecerdasan buatan. Pendekatan tersebut membuka peluang terciptanya sistem mikrobioma presisi yang disesuaikan dengan tanaman, lingkungan, dan tujuan produksi tertentu. Dengan arah pengembangan tersebut, fitomikrobiologi diproyeksikan menjadi salah satu pilar utama pertanian berkelanjutan di masa depan (Sharma *et al*., 2024; Compant *et al*., 2025).

2.8 Interaksi Tanaman dan Mikroorganisme



Gambar 2. 5 Interaksi Mikroorganisme Rizosfer dengan Tanaman

(Sumber: Hanif *et al*., 2024)

Interaksi antara tanaman dan mikroorganisme merupakan inti kajian fitomikrobiologi karena menentukan bagaimana hubungan biologis terbentuk dan berkembang di lingkungan tanaman. Hubungan tersebut dapat bersifat menguntungkan, netral, maupun merugikan tergantung jenis mikroorganisme, kondisi tanaman, dan faktor lingkungan. Interaksi mutualisme terjadi ketika tanaman dan mikroorganisme saling memperoleh manfaat, seperti pada asosiasi bakteri penambat nitrogen atau fungi mikoriza. Sebaliknya, interaksi parasitisme terjadi ketika mikroorganisme memperoleh keuntungan dengan merugikan tanaman melalui infeksi dan kerusakan jaringan (Trivedi *et al*., 2022).

Proses interaksi dimulai melalui pertukaran sinyal kimia antara akar dan mikroorganisme. Tanaman melepaskan eksudat akar berupa gula, asam amino, asam organik, dan metabolit sekunder yang berfungsi menarik

mikroorganisme tertentu ke daerah perakaran. Sebagai respons, mikroorganisme menghasilkan molekul sinyal yang memengaruhi aktivitas fisiologis tanaman, seperti pembentukan akar lateral, aktivasi pertahanan, maupun peningkatan toleransi terhadap stres. Mekanisme komunikasi dua arah ini menunjukkan bahwa hubungan tanaman–mikroba bersifat aktif dan dinamis, bukan hubungan pasif semata (Berg *et al*., 2020; Hanif *et al*., 2024).

Selain interaksi langsung dengan tanaman, mikroorganisme juga berinteraksi dengan sesama mikroba dalam satu komunitas. Kompetisi ruang dan nutrisi, produksi senyawa antimikroba, pembentukan biofilm, dan hubungan sinergis antarmikroba sangat memengaruhi keseimbangan komunitas mikrobioma tanaman. Kombinasi interaksi tersebut akhirnya menentukan kesehatan tanaman, efisiensi penyerapan hara, serta kemampuan tanaman beradaptasi terhadap perubahan lingkungan. Oleh karena itu, pemahaman interaksi tanaman–mikroorganisme menjadi dasar penting dalam pengembangan teknologi mikroba untuk pertanian modern (Compant *et al*., 2025).

2.9 Metode Dasar dalam Studi Fitomikrobiologi

Perkembangan ilmu fitomikrobiologi didukung oleh berbagai metode penelitian yang digunakan untuk mengidentifikasi, mengisolasi, dan memahami fungsi mikroorganisme yang berasosiasi dengan tanaman. Metode konvensional masih banyak digunakan, terutama isolasi mikroba pada media kultur, pengamatan morfologi koloni, pewarnaan mikroskopis, serta uji fisiologis dan biokimia. Teknik tersebut berperan penting dalam mengenali karakter dasar mikroorganisme serta mengevaluasi potensi fungsional seperti pelarutan fosfat, fiksasi nitrogen, atau aktivitas antagonisme terhadap patogen (Sharma *et al*., 2024a).

Seiring kemajuan teknologi, metode molekuler menjadi bagian penting dalam studi fitomikrobiologi. Teknik PCR, analisis DNA marker, dan sekuensing gen seperti 16S rRNA pada bakteri maupun ITS pada fungi memungkinkan identifikasi mikroba secara lebih akurat. Pendekatan metagenomik bahkan memungkinkan peneliti mempelajari komunitas mikroba langsung dari sampel tanaman atau tanah tanpa harus mengkultur mikroba terlebih dahulu. Hal ini sangat membantu karena sebagian besar mikroorganisme di alam sulit ditumbuhkan pada media buatan (Trivedi *et al*., 2022; Hanif *et al*., 2024).

Saat ini, metode penelitian fitomikrobiologi berkembang menuju integrasi teknologi omics seperti metatranskriptomik, metabolomik, proteomik, dan bioinformatika. Pendekatan ini memungkinkan analisis yang lebih mendalam terhadap aktivitas gen, metabolit mikroba, dan interaksi kompleks antara tanaman dengan komunitas mikrobanya. Dukungan analisis data digital dan kecerdasan buatan juga mulai dimanfaatkan untuk memprediksi hubungan mikroba dan respons tanaman di lapangan. Dengan demikian, metode penelitian fitomikrobiologi tidak hanya mendukung identifikasi mikroba, tetapi juga membuka peluang pengembangan teknologi mikrobioma yang lebih presisi dan aplikatif (Compant *et al*., 2025).

DAFTAR PUSTAKA

Berg, G., Rybakova, D., Grube, M. and Köberl, M., 2020. The plant microbiome explored: implications for experimental botany. *Journal of Experimental Botany*, 71(6), pp.1621–1630. https://doi.org/10.1093/jxb/erz564

Compant, S., Cassan, F., Kostić, T., Johnson, L., Brader, G., Trognitz, F. and Sessitsch, A., 2025. Harnessing the plant microbiome for sustainable crop production. *Nature Reviews Microbiology*, 23(1), pp.9–23. https://doi.org/10.1038/s41579-024-01079-1

Dinata, G.F., Widura, A.D., Maulana, A.D., Sakti, V.H.P., Wiya, Z.A., Rofiqoh, R.A., Cahyaningrum, D.G. and Nurvitasari, R.D., 2026. Termite symbiont bacteria as biological agents against anthracnose of bird's eye chilli caused by *Colletotrichum* sp. *Jurnal Hama dan Penyakit Tumbuhan Tropika*, 26, pp.304–316. https://doi.org/10.23960/jhptt.226304-316

Hanif, M.S., Tayyab, M., Baillo, E.H., Khan, A., Ullah, S. and Bibi, F., 2024. Plant microbiome technology for sustainable agriculture: recent advances and future prospects. *Frontiers in Microbiology*, 15, 1500260. https://doi.org/10.3389/fmicb.2024.1500260

Liu-Xu, L., González-Hernández, A.I., Camañes, G., García-Agustín, P. and Llorens, E., 2024. Harnessing green helpers: nitrogen-fixing bacteria and beneficial microorganisms in horticultural crops. *Horticulturae*, 10(6), p.621. https://doi.org/10.3390/horticulturae10060621

Savary, S., Willocquet, L., Pethybridge, S.J., Esker, P., McRoberts, N. and Nelson, A., 2019. The global burden of pathogens and pests on major food crops. *Nature*

Ecology & Evolution, 3(3), pp.430–439. https://doi.org/10.1038/s41559-018-0793-y

Sharma, G., Dwibedi, V., Seth, C.S., Singh, S., Ramamurthy, P.C., Bhadrecha, P. and Singh, J., 2024. Direct and indirect technical guide for the early detection and management of fungal plant diseases. *Current Research in Microbial Sciences*, 7, 100276. https://doi.org/10.1016/j.crmicr.2024.100276

Sharma, R., Kumawat, K.C., Karmakar, S., Dutta, S. and Mishra, J., 2024. Plant-associated microorganisms and their role in growth promotion, nutrient acquisition, and stress tolerance in agricultural systems. *Frontiers in Plant Science*, 15, 1378421. https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1378421

Sharma, S. and Kumar, P., 2024. Biochemical and physiological characterization of *Ralstonia solanacearum* causing bacterial wilt of tomato. *Himachal Journal of Agricultural Research*, 50(1), pp.102–107.

Trivedi, P., Leach, J.E., Tringe, S.G., Sa, T. and Singh, B.K., 2022. Plant–microbiome interactions: from community assembly to plant health. *Nature Reviews Microbiology*, 20(10), pp.607–621. https://doi.org/10.1038/s41579-022-00745-1

BAB 3

MIKROORGANISME INDIGENUS (FUNGI, BAKTERI, ACTINOMYCETES) YANG MENGUNTUNGKAN BAGI TANAMAN

Oleh Ni'matuljannah Akhsan

3.1 Pengertian Mikroorganisme Indigenus Perannya di Ekosistem Tanah/ Rizosfer

Mikroorganisme indigenus adalah mikroorganisme yang berasal dari atau telah hidup secara alami di suatu lingkungan tertentu sejak lama, sehingga keberadaannya menjadi bagian dari ekosistem lokal tersebut. Dalam konteks pertanian dan tanaman, istilah "indigenus" biasanya mengacu pada mikroorganisme yang ditemukan di tanah setempat atau di sekitar perakaran tanaman pada lokasi budidaya tertentu. Artinya, mikroba tersebut bukan mikroba pendatang dari tempat lain, melainkan mikroba yang telah beradaptasi dengan kondisi lingkungan lahan tersebut, misalnya kondisi tanah, iklim, serta pola penggunaan lahan. Mikroorganisme indigenus umumnya lebih mampu mempertahankan kehidupannya dan menjalankan fungsinya di dalam lingkungan yang spesifik tersebut dibandingkan

mikroorganisme yang dibawa dari luar tanpa seleksi kecocokan, karena telah beradaptasi(Zhou *et al.*, 2024).

Peran indigenus dalam ekosistem tanah sangat berkaitan dengan bagaimana mikroorganisme berpartisipasi dalam proses-proses biogeokimia. Di dalam tanah, berbagai senyawa organik maupun anorganik berada dalam keadaan dinamis. Bahan organik mengalami pelapukan, senyawa kompleks diuraikan menjadi bentuk yang lebih sederhana, dan unsur hara mengalami perubahan bentuk kimia maupun ketersediaannya(David, 2026). Mikroorganisme indigenus berperan di tahap-tahap perubahan tersebut melalui aktivitas metabolisme dan enzim yang mereka hasilkan. Contohnya, ketika bahan organik dari sisa tanaman masuk ke tanah, mikroorganisme memecahnya menjadi senyawa yang dapat digunakan kembali oleh tanaman melalui siklus hara. Dengan demikian, indigenus berkontribusi pada ketersediaan nutrisi yang akan memengaruhi pertumbuhan tanaman(Chen *et al.*, 2024b).

Sementara itu, lingkungan sekitar perakaran disebut rhizosfer, yaitu zona tanah yang dipengaruhi oleh aktivitas akar. Pada rhizosfer, peran mikroorganisme indigenus menjadi semakin nyata karena akar tidak hanya menyerap air dan unsur hara, tetapi juga mengeluarkan berbagai senyawa ke tanah. Senyawa yang dilepaskan akar sering disebut eksudat akar, yang dapat berupa gula, asam organik, asam amino, senyawa fenolik, serta berbagai metabolit lain. Eksudat akar ini berfungsi sebagai sumber energi dan nutrien bagi mikroorganisme, sehingga mampu membentuk komunitas mikroba yang lebih aktif dibandingkan tanah di luar rhizosfer. Karena mikroorganisme indigenus sudah berada di lahan tersebut dan sudah beradaptasi, komunitas mereka cenderung lebih mampu memanfaatkan eksudat akar dan tetap berfungsi dalam kondisi rhizosfer(Martins *et al.*, 2026).

Indigenus juga berperan dalam menjaga keseimbangan mikroekologi tanah di sekitar perakaran. Dalam rhizosfer terdapat persaingan yang terus berlangsung antara berbagai kelompok mikroorganisme. Mikroorganisme indigenus umumnya terlibat dalam proses persaingan ini melalui pengambilan ruang (kolonisasi), pemanfaatan nutrien, produksi senyawa penghambat mikroba lain, serta kemampuan bertahan terhadap kondisi lingkungan yang berubah (Kiprotich *et al.*, 2025). Pada saat kompetitor dari luar muncul, misalnya mikroba patogen atau mikroorganisme yang tidak cocok dengan kondisi setempat, mikroorganisme indigenus yang sudah mapan dapat menekan populasi mikroba tersebut. Penekanan ini dapat terjadi karena mikroba indigenus memiliki "keunggulan adaptif" di lingkungan lokal, sehingga mereka mampu mempertahankan dominasi atau minimal mempertahankan keseimbangan komunitas. Keseimbangan komunitas ini penting karena tanaman akan lebih terlindungi dari tekanan penyakit bila populasi patogen tidak meningkat secara berlebihan(Liu *et al.*, 2026).

Peran penting lain dari mikroorganisme indigenus adalah kontribusinya terhadap ketahanan tanaman. Ketahanan tanaman tidak hanya berarti tanaman kebal secara langsung, tetapi lebih luas yakni tanaman mampu merespons gangguan dari lingkungan, termasuk serangan patogen dan stres lingkungan. Mikroorganisme yang hidup di rhizosfer dapat memengaruhi cara tanaman merespons ancaman melalui sinyal yang terbentuk antara akar dan mikroba(Feng *et al.*, 2024). Secara konsep, tanaman berinteraksi dengan mikroba menggunakan sinyal kimia, dan saat mikroba tertentu hadir dalam jumlah atau kondisi yang menguntungkan, tanaman dapat dipersiapkan untuk menghadapi serangan. Indigenus menjadi penting dalam konteks ini karena mereka berasal dari ekosistem yang sama, sehingga peluang terjadinya interaksi sinyal yang sesuai dan

efektif biasanya lebih besar. Dengan kata lain, tanaman dan mikroba indigenus sering kali berada dalam hubungan yang telah berlangsung lama secara ekologis(Wankhade *et al.*, 2025).

Selain interaksi langsung dengan tanaman, mikroorganisme indigenus juga berperan dalam meningkatkan kualitas lingkungan akar. Aktivitas mikroba dapat memperbaiki struktur tanah secara tidak langsung melalui pembentukan senyawa hasil metabolisme, perubahan ketersediaan nutrisi, dan pengaruh terhadap proses dekomposisi. Struktur tanah yang lebih baik akan mendukung pertumbuhan akar karena akar membutuhkan ruang pori untuk pertukaran oksigen, pergerakan air, dan penetrasi akar. Bila rhizosfer menjadi lebih kondusif, misalnya karena ketersediaan hara lebih stabil dan tekanan patogen lebih rendah, maka tanaman cenderung tumbuh lebih optimal(Chen *et al.*, 2024a).

Definisi indigenus juga mengandung implikasi praktis dalam pemanfaatannya sebagai bio-inokulan atau agens hayati. Karena indigenus telah cocok dengan kondisi lahan, maka penggunaan mikroorganisme indigenus sebagai pendukung pertumbuhan tanaman sering dipandang lebih realistis dari sisi keberlangsungan hidup mikroba di lapangan. Mikroorganisme yang sesuai dengan kondisi setempat umumnya memiliki kemampuan lebih tinggi untuk bertahan, bersaing, dan melakukan fungsinya di rhizosfer(Pandey and Singh, 2025). Namun, perlu dipahami bahwa indigenus bukan otomatis berarti selalu menguntungkan. Keberuntungan efeknya bergantung pada fungsi mikroba, tingkat populasinya, kecocokan dengan tanaman, serta kondisi manajemen lahan. Tetapi secara umum, mikroba indigenus merupakan pilihan yang paling relevan untuk dikaji karena keterkaitan ekologisnya kuat dengan lingkungan tanaman setempat(Callaghan, Ballard and Wright, 2022).

3.2 Rhizosfer dan Interaksi Tanaman–Mikroba

Rhizosfer adalah istilah yang digunakan untuk menggambarkan bagian tanah yang berada di sekitar akar tanaman dan dipengaruhi oleh aktivitasnya. Yang membuat rhizosfer menjadi konsep yang penting dalam mikrobiologi adalah kenyataan bahwa akar bukan hanya penyerap nutrien dari tanah. Akar juga mengubah lingkungan tempat ia tumbuh. Perubahan tersebut terjadi melalui berbagai proses fisiologis dan kimiawi, sehingga tanah di sekitar akar memiliki karakter yang berbeda dibandingkan tanah yang jauh dari pengaruh akar. Karena pengaruh ini bersifat nyata dan terukur, mulai dari perubahan komposisi kimia hingga perubahan jumlah dan aktivitas mikroorganisme, rhizosfer dipandang sebagai zona ekologis tersendiri. Di sinilah komunitas mikroba berkembang dengan pola yang khas, dan di sinilah berbagai proses biogeokimia tanah berlangsung lebih intens(Jing, Wang and Wang, 2023).

Secara sederhana, zona rhizosfer dapat dipahami sebagai tanah yang letaknya berdekatan dengan akar, tetapi batasannya bukan garis tegas. Rhizosfer bukan area dengan diameter tetap, karena jarak pengaruh akar dipengaruhi oleh banyak faktor, misalnya jenis tanaman, fase pertumbuhan, kedalaman akar, sifat tanah (tekstuporositas, kadar air), komposisi mineral, dan kondisi lingkungan seperti pH dan ketersediaan nutrien. Ada kalanya pengaruh akar lebih dominan pada jarak yang relatif dekat dengan permukaan akar, tetapi efek kimia dan biologis tertentu dapat menyebar lebih jauh mengikuti pola difusi zat terlarut dan pergerakan air pori. Jadi, rhizosfer lebih tepat dipandang sebagai rentang zona pengaruh daripada batas geometris yang presisi(Mueller *et al.*, 2024).

Dalam konteks mikrobiologi, keberadaan rhizosfer dapat dijadikan alasan mengapa sering ditemukan bahwa biomassa mikroba, laju respirasi, dan aktivitas biokimia

umumnya lebih tinggi di sekitar akar dibandingkan tanah non-rizosfer. Ini terutama karena eksudat akar meningkatkan ketersediaan substrat dan merangsang aktivitas mikroba(Zhou *et al.*, 2024). Namun, yang menarik adalah tidak semua bagian rhizosfer memiliki karakter yang sama. Komposisi komunitas mikroba bisa berubah mengikuti heterogenitas tanah, bentuk akar, umur akar, dan kondisi kimia lokal. Maka, rhizosfer adalah contoh nyata dari bagaimana lingkungan mikro dapat berbeda dalam ruang yang relatif sempit, sehingga keragaman mikroba dapat meningkat karena terdapat banyak *niche* kecil(Schultes *et al.*, 2025).

3.3 Eksudat Akar Memengaruhi Pertumbuhan Mikroba

Eksudat akar adalah sumber nutrisi utama bagi mikroba di rizosfer, terdiri dari senyawa organik seperti gula, asam amino, asam organik, dan senyawa sekunder yang dilepaskan oleh akar. Senyawa ini berperan penting dalam menarik, menyeleksi, dan mendukung pertumbuhan komunitas mikroba yang beragam di sekitar akar.

Eksudat akar merupakan hasil metabolisme tanaman yang dikeluarkan ke tanah melalui proses difusi, sekresi aktif, atau lisis sel akar. Kandungan eksudat sangat kompleks dan bervariasi tergantung jenis tanaman, fase pertumbuhan, kondisi tanah, dan interaksi dengan mikroba. Komponen utama eksudat meliputi karbohidrat sederhana (glukosa, fruktosa, sukrosa) yang menjadi sumber energi cepat bagi mikroba; asam amino (glisin, alanin, serin) yang menyediakan nitrogen organik; serta asam organik (malat, sitrat, oksalat) yang berfungsi mengubah ketersediaan unsur hara dengan melarutkan fosfat atau mineral lain. Selain itu, terdapat vitamin, peptida, dan senyawa fenolik yang dapat

berperan sebagai sinyal kimia untuk menarik mikroba tertentu atau menghambat patogen(Wankhade *et al.*, 2025).

Eksudat akar tidak hanya menyediakan nutrisi, tetapi juga membentuk ekologi mikroba di rizosfer. Mikroba yang mampu memanfaatkan eksudat dengan efisien akan mendominasi komunitas, misalnya bakteri rizosfer seperti Rhizobium yang menggunakan eksudat untuk kolonisasi akar dan kemudian membentuk bintil akar guna melakukan fiksasi nitrogen. Senyawa seperti flavonoid dalam eksudat berfungsi sebagai sinyal kimia yang memicu ekspresi gen nodulasi pada Rhizobium. Demikian pula, bakteri penghasil hormon tumbuh seperti Indole-3-acetic acid (IAA) memanfaatkan eksudat sebagai substrat untuk biosintesis, sehingga mendukung pertumbuhan akar dan memperkuat simbiosis(Yang *et al.*, 2025).

Interaksi ini bersifat timbal balik: tanaman menyediakan eksudat sebagai umpan bagi mikroba, sementara mikroba membantu tanaman dengan meningkatkan ketersediaan hara, melindungi dari patogen, atau menghasilkan zat pengatur tumbuh. Misalnya, asam organik dalam eksudat dapat meningkatkan kelarutan fosfat, lalu mikroba fosfat-solubilizing memanfaatkan kondisi tersebut untuk mempercepat siklus hara. Dengan demikian, eksudat akar berfungsi sebagai jembatan metabolik antara tanaman dan mikroba, yang menentukan komposisi komunitas mikroba dan produktivitas ekosistem tanah(Luo, He and Chen, 2025).

3.4 Mekanisme Interaksi Akar Tanaman Dan Mikroba

Interaksi antara akar tanaman dengan mikroba di rizosfer berlangsung melalui mekanisme yang kompleks, yang dapat berupa mutualisme, antagonisme, maupun kompetisi.

Dalam **mutualisme (saling menguntungkan)**, tanaman dan mikroba sama-sama memperoleh keuntungan. Tanaman mengeluarkan eksudat akar berupa gula, asam amino, dan senyawa organik lain yang menjadi sumber energi dan nutrisi bagi mikroba. Sebagai balasannya, mikroba tertentu seperti Rhizobium atau mikoriza membantu tanaman dengan meningkatkan ketersediaan nitrogen dan fosfor, atau menghasilkan hormon pertumbuhan yang memperkuat sistem akar. Hubungan ini bersifat simbiosis karena kedua pihak saling mendukung kelangsungan hidup dan produktivitas masing-masing(Uribe-acosta *et al.*, 2025).

Pada mekanisme **antagonisme (menekan patogen)**, mikroba bermanfaat berperan menekan pertumbuhan mikroba patogen. Hal ini terjadi melalui produksi antibiotik, enzim lisis, atau senyawa volatil yang menghambat perkembangan patogen di sekitar akar. Selain itu, mikroba antagonis dapat memicu sistem pertahanan tanaman sehingga akar lebih tahan terhadap serangan penyakit. Eksudat akar tidak hanya menarik mikroba yang menguntungkan, tetapi juga mendukung terbentuknya komunitas pelindung yang menjaga kesehatan tanaman(Iqbal, 2026).

Kompetisi (memerebutkan ruang dan nutrisi), mikroba di rizosfer saling berebut ruang dan sumber nutrisi yang dilepaskan oleh akar. Karena eksudat akar jumlahnya terbatas, mikroba yang lebih cepat memanfaatkan senyawa tersebut akan mendominasi lingkungan rizosfer. Kompetisi ini bisa terjadi antara mikroba bermanfaat dengan patogen, atau sesama mikroba bermanfaat yang berusaha menempati *niche* tertentu. Faktor seperti kecepatan metabolisme, kemampuan membentuk biofilm, dan efisiensi penggunaan substrat menentukan siapa yang lebih unggul dalam persaingan(Schultes *et al.*, 2025; Liu *et al.*, 2026).

Secara keseluruhan, interaksi mutualisme, antagonisme, dan kompetisi membentuk dinamika komunitas mikroba di sekitar akar. Tanaman melalui eksudatnya berperan sebagai pengatur ekosistem mikroba, sementara mikroba menanggapi dengan strategi yang berbeda, ada yang mendukung, ada yang menekan, dan ada yang bersaing. Kombinasi ketiga mekanisme ini akan menentukan kesehatan tanaman, produktivitas tanah, serta stabilitas ekosistem rizosfer.

3.4.1 Potensi Mikroba Sebagai Pendukung Kesehatan Tanah dan Pertumbuhan Tanaman

Potensi mikroba sebagai pendukung kesehatan tanah dan pertumbuhan tanaman sangat besar karena mereka berperan sebagai penggerak utama dalam menjaga keseimbangan ekosistem tanah. Mikroba mampu menguraikan bahan organik kompleks menjadi senyawa sederhana yang lebih mudah diserap tanaman, sehingga meningkatkan ketersediaan unsur hara penting seperti nitrogen, fosfor, dan kalium. Proses dekomposisi ini juga menghasilkan humus yang memperbaiki struktur tanah, meningkatkan kapasitas menahan air, serta memperbaiki aerasi, sehingga tanah menjadi lebih sehat dan produktif(Andrade *et al.*, 2023).

Selain itu, mikroba berfungsi sebagai agen biologis yang melindungi tanaman dari serangan patogen. Mereka dapat menghasilkan antibiotik, enzim penghambat, atau senyawa volatil yang menekan pertumbuhan mikroba merugikan. Mikroba juga mampu memicu mekanisme pertahanan alami tanaman melalui *induced systemic resistance* (ISR), sehingga tanaman lebih tahan terhadap penyakit dan stres lingkungan. Dengan cara ini, mikroba tidak hanya mendukung pertumbuhan, tetapi juga menjaga kesehatan tanaman secara menyeluruh (Paul *et al.*, 2022).

Mikroba simbiotik seperti Rhizobium dan mikoriza memiliki peran khusus dalam meningkatkan efisiensi penyerapan nutrisi. Rhizobium membantu fiksasi nitrogen dari atmosfer, sementara mikoriza memperluas jaringan akar sehingga penyerapan fosfor dan air lebih optimal. Kehadiran mikroba ini membuat tanaman lebih kuat, lebih produktif, dan lebih tahan terhadap kondisi lingkungan yang kurang ideal(Wu, Chen and Wang, 2024).

Dari perspektif ekologi, mikroba juga menjaga keseimbangan komunitas tanah dengan cara bersaing memperebutkan ruang dan nutrisi, sehingga mencegah dominasi patogen. Mereka berkontribusi pada stabilitas ekosistem tanah dengan membentuk jaringan interaksi yang kompleks, di mana setiap mikroba memiliki peran tertentu dalam siklus biogeokimia.

3.5 Fungi Indigenus yang Menguntungkan bagi Tanaman

3.5.1 Gambaran Umum Fungi Indigenus di Tanah dan Rhizosfer

Fungi indigenus di tanah dan rhizosfer adalah kelompok jamur asli yang secara alami hidup dan beradaptasi dengan kondisi lingkungan setempat. Fungi hadir sebagai bagian integral dari ekosistem tanah, berperan dalam menjaga keseimbangan biogeokimia sekaligus mendukung pertumbuhan tanaman. Karena telah lama berinteraksi dengan kondisi lokal, fungi indigenus memiliki kemampuan adaptasi yang tinggi terhadap variasi pH, kelembaban, dan ketersediaan nutrien, sehingga mampu bertahan dalam berbagai kondisi tanah(Yue *et al.*, 2024).

Di dalam tanah, fungi indigenus berperan sebagai pengurai utama bahan organik. Mereka menghasilkan enzim yang mampu memecah senyawa kompleks seperti selulosa dan lignin menjadi molekul sederhana yang dapat dimanfaatkan oleh tanaman maupun mikroba lain. Proses ini menyediakan nutrisi, tetapi juga menghasilkan humus yang memperbaiki struktur tanah, meningkatkan kapasitas menahan air, dan memperbaiki aerasi.

Di daerah rhizosfer, fungi indigenus berinteraksi erat dengan akar tanaman. Beberapa di antaranya membentuk hubungan simbiotik, seperti mikoriza, yang memperluas jaringan akar sehingga penyerapan air dan mineral lebih efisien. Sebagai imbalannya, tanaman menyediakan karbon hasil fotosintesis bagi jamur. Hubungan ini memperkuat ketahanan tanaman terhadap stres lingkungan dan meningkatkan produktivitas. Selain itu, fungi indigenus juga dapat berperan sebagai agen antagonis terhadap patogen dengan cara menghasilkan senyawa antimikroba atau bersaing memperebutkan ruang dan nutrisi, sehingga membantu melindungi akar dari serangan penyakit(Wang *et al.*, 2024).

3.5.2 Peran Fungi Peran Fungi dalam Penyediaan Unsur Hara

Fungi memiliki peran yang sangat penting dalam penyediaan unsur hara bagi tanaman melalui dua mekanisme utama, yaitu pelarutan atau pengubahan bentuk fosfat yang kurang tersedia dan mineralisasi bahan organik. Fosfat di dalam tanah sering kali berada dalam bentuk yang tidak larut atau terikat pada mineral sehingga sulit diserap oleh akar tanaman. Fungi, khususnya kelompok mikoriza dan fungi pelarut fosfat, mampu menghasilkan asam organik seperti oksalat,

sitrat, dan malat yang berfungsi melarutkan fosfat terikat. Dengan adanya proses ini, fosfat yang semula tidak tersedia berubah menjadi bentuk ion fosfat yang larut dan dapat diserap oleh tanaman, sehingga kebutuhan akan unsur fosfor yang penting bagi pembentukan energi dan metabolisme tanaman dapat terpenuhi. Selain itu, fungi berperan dalam mineralisasi bahan organik, yaitu proses penguraian senyawa organik kompleks menjadi bentuk anorganik yang lebih sederhana. Melalui produksi enzim seperti selulase, ligninase, dan protease, fungi mampu memecah sisa tanaman, serasah, dan bahan organik lain menjadi senyawa sederhana seperti amonia, nitrat, fosfat, dan sulfat. Unsur-unsur ini kemudian dilepaskan ke dalam tanah dan menjadi tersedia bagi tanaman. Proses mineralisasi tidak hanya menyediakan nutrien, tetapi juga memperkaya tanah dengan humus yang meningkatkan struktur, kapasitas menahan air, dan kesuburan jangka panjang(Ma *et al.*, 2025). Beberapa contoh fungi rizosfer yang sering ditemukan: *Trichoderma* sp. *Mucar* sp., *Penicillium* sp., *Aspergillus* sp., *Gonytrichum*, sp. dan *Trichoderma* sp. fungi ini berperan dalam meningkatkan kesuburan tanaman dan dapat digunakan sebagai biofertilizer.

3.5.3 Peran Fungi dalam Kesehatan Tanaman

Fungi memiliki peran penting dalam menjaga kesehatan tanaman melalui dua mekanisme utama, yaitu kemampuan antagonistik terhadap patogen tanah dan produksi senyawa bioaktif. Kemampuan antagonistik muncul karena fungi tertentu dapat menghasilkan enzim atau metabolit yang mampu merusak dinding sel patogen, menghambat pertumbuhan, atau bahkan mematikan mikroba yang merugikan. Selain itu, fungi juga bersaing dengan patogen dalam memperebutkan

ruang dan nutrisi di sekitar akar, sehingga keberadaan patogen menjadi tertekan dan tidak mampu berkembang dengan baik. Dengan cara ini, fungi berfungsi sebagai pelindung alami yang menjaga akar tanaman tetap sehat (Umer *et al.*, 2025).

Di sisi lain, fungi juga dikenal mampu menghasilkan berbagai senyawa bioaktif yang memiliki fungsi luas. Senyawa bioaktif ini bisa berupa hormon pertumbuhan yang merangsang perkembangan akar, asam organik yang meningkatkan ketersediaan hara, atau molekul yang memicu sistem pertahanan tanaman. Konsep umum dari produksi senyawa bioaktif adalah bahwa fungi tidak hanya mendukung pertumbuhan tanaman secara langsung melalui penyediaan nutrisi, tetapi juga memperkuat ketahanan tanaman terhadap stres biotik maupun abiotik. Adanya senyawa bioaktif, tanaman menjadi lebih adaptif terhadap lingkungan, lebih tahan terhadap penyakit, dan lebih produktif. Beberapa contoh fungi dapat meningkatkan kesehatan tanaman yaitu *Trichoderma* sp., *Aspergillus* sp., *Penicillium* sp. dan *Lactarius* sp. (pelindung akar dari patogen)(Bao *et al.*, 2025).

3.5.4 Fungi Pembentuk Simbiosis dengan Akar

Fungi pembentuk simbiosis dengan akar, khususnya mikoriza, memiliki peran yang sangat penting dalam mendukung pertumbuhan tanaman dan menjaga kesehatan tanah. Mikoriza adalah asosiasi mutualistik antara jamur dengan akar tanaman, di mana jamur memperoleh karbon hasil fotosintesis dari tanaman, sementara tanaman mendapatkan keuntungan berupa peningkatan serapan hara dan air. Jenis yang paling umum adalah endomikoriza atau arbuscular mycorrhiza (AM), yang hifanya masuk ke dalam jaringan akar dan membentuk struktur khusus seperti arbuskula dan

vesikel. Struktur ini berfungsi sebagai titik pertukaran nutrisi antara jamur dan tanaman(Sugiarto, 2013).

Melalui hifa yang memanjang jauh ke dalam tanah, mikoriza mampu memperluas daerah penyerapan akar secara signifikan. Hal ini memungkinkan tanaman mengakses fosfor, nitrogen, dan unsur mikro yang biasanya sulit dijangkau oleh akar biasa. Fosfor, misalnya, sering terikat dalam bentuk yang tidak larut, tetapi mikoriza dapat melarutkannya dan mengantarkannya langsung ke akar. Selain itu, hifa mikoriza juga meningkatkan kemampuan tanaman menyerap air, sehingga tanaman lebih tahan terhadap kondisi kekeringan.

Manfaat lain dari simbiosis ini adalah peningkatan ketahanan tanaman terhadap stres biotik maupun abiotik. Mikoriza dapat membantu tanaman menghadapi serangan patogen dengan cara memperkuat sistem pertahanan atau bersaing memperebutkan ruang di sekitar akar. Hubungan ini juga berkontribusi pada stabilitas ekosistem tanah karena mikoriza membantu membentuk agregat tanah melalui jaringan hifa, sehingga struktur tanah menjadi lebih baik.

Secara keseluruhan, fungi mikoriza, terutama endomikoriza atau AM, adalah mitra alami yang sangat berharga bagi tanaman. Fungi-fungi ini tidak hanya meningkatkan efisiensi penyerapan hara dan air, tetapi juga memperkuat ketahanan tanaman serta menjaga kualitas tanah, menjadikan simbiosis ini sebagai salah satu fondasi penting dalam pertanian berkelanjutan. Beberapa contoh ektomikoriza umum: *Amanita muscaria, Boletus elegans* dan *Tricholoma* sp. Beberapa yang sering ditemukan berasosiasi dengan tanaman berkayu *Scleroderma citrinum, Suillus* sp., ektomikoriza (*Russula* sp. dan *Hysterangium* sp.). Beberapa

Endomikoriza yang bersimbiosis dengan tanaman legum dan hortikultura seperti; *Glomus fasciculatum, Glomus mosseae, Gigaspora nigras, Acaulospora scraobuculata* dan *Scutellospora.*

3.5.6 Dampak Terhadap Pertumbuhan Tanaman

Fungi memiliki dampak besar terhadap pertumbuhan tanaman, terutama melalui peningkatan vigor dan pertumbuhan akar serta peningkatan toleransi terhadap berbagai bentuk cekaman. Kehadiran fungi yang bersimbiosis dengan akar, seperti mikoriza, membuat sistem akar tanaman berkembang lebih luas dan lebih bercabang. Hifa jamur yang menjalar ke dalam tanah bertindak sebagai perpanjangan akar, sehingga tanaman mampu menyerap air dan unsur hara lebih efisien. Akibatnya, akar menjadi lebih kuat, lebih panjang, dan lebih banyak rambut akar terbentuk, yang secara keseluruhan meningkatkan vigor tanaman. Vigor yang lebih baik berarti tanaman tumbuh lebih cepat, lebih sehat, dan memiliki kemampuan lebih tinggi untuk beradaptasi dengan lingkungan.

Selain memperkuat sistem akar, fungi juga berperan dalam meningkatkan toleransi tanaman terhadap cekaman, baik biotik maupun abiotik. Dalam kondisi kekeringan, hifa jamur membantu tanaman memperoleh air dari pori-pori tanah yang tidak dapat dijangkau akar biasa, sehingga tanaman lebih tahan terhadap stres akibat kekurangan air. Fungi juga dapat memicu mekanisme pertahanan tanaman melalui produksi senyawa bioaktif yang mengaktifkan sistem imun alami, membuat tanaman lebih siap menghadapi serangan penyakit. Dengan adanya simbiosis ini, tanaman tidak hanya lebih tahan terhadap patogen, tetapi juga lebih mampu bertahan dalam kondisi lingkungan yang kurang ideal.

3.6 Bakteri Indigenus yang Menguntungkan bagi Tanaman

3.6.1 Gambaran Umum Bakteri di Rhizosfer

Bakteri di rhizosfer merupakan kelompok mikroorganisme yang hidup di sekitar akar tanaman dan memiliki peran penting dalam menjaga keseimbangan ekosistem tanah serta mendukung pertumbuhan tanaman. Rhizosfer adalah zona tanah yang dipengaruhi langsung oleh eksudat akar, sehingga menjadi lingkungan yang kaya nutrisi dan sangat mendukung kolonisasi bakteri. Keberadaan eksudat berupa gula, asam amino, dan asam organik membuat bakteri di rhizosfer mampu berkembang dengan cepat dan membentuk komunitas yang beragam(Ma *et al.*, 2025).

Secara umum, bakteri di rhizosfer berfungsi sebagai pengurai bahan organik, penyedia nutrisi, dan pelindung tanaman. Bakteri-bakteri ini dapat melarutkan fosfat, memfiksasi nitrogen, serta menghasilkan hormon pertumbuhan seperti indole-3-acetic acid (IAA) yang merangsang perkembangan akar. Selain itu, banyak bakteri di rhizosfer yang bersifat antagonis terhadap patogen dengan cara menghasilkan antibiotik atau bersaing memperebutkan ruang dan nutrisi, sehingga membantu menjaga kesehatan akar (Thepbandit & Athinuwat, 2024).

Bakteri di rhizosfer juga berperan dalam membentuk hubungan simbiotik dengan tanaman. Contohnya adalah bakteri *Rhizobium* sp. yang membentuk bintil akar untuk fiksasi nitrogen, atau bakteri penghasil siderofor yang meningkatkan ketersediaan besi bagi tanaman. Hubungan ini bersifat mutualistik karena tanaman menyediakan karbon hasil

fotosintesis, sementara bakteri memberikan nutrisi dan perlindungan.

Secara keseluruhan, gambaran umum bakteri di rhizosfer menunjukkan bahwa mereka adalah komponen penting dalam ekosistem tanah. Kehadiran mereka tidak hanya meningkatkan ketersediaan hara dan memperkuat sistem akar, tetapi juga menjaga kesehatan tanaman melalui mekanisme perlindungan alami. Dengan peran multifungsi tersebut, bakteri di rhizosfer menjadi salah satu fondasi utama dalam pertanian berkelanjutan dan pengelolaan tanah yang sehat.

3.6.2 Bakteri Penambah Ketersediaan Hara

Bakteri penambah ketersediaan hara di tanah memiliki peran yang sangat penting dalam mendukung pertumbuhan tanaman melalui dua mekanisme utama, yaitu pelarutan fosfat dan mineralisasi bahan organik. Fosfat di dalam tanah sering kali berada dalam bentuk yang tidak larut atau terikat pada mineral sehingga sulit diserap oleh akar tanaman. Bakteri pelarut fosfat mampu menghasilkan asam organik seperti sitrat, malat, dan glukonat yang dapat melarutkan fosfat terikat tersebut. Dengan adanya proses ini, fosfat yang semula tidak tersedia berubah menjadi bentuk ion fosfat yang larut dan dapat dimanfaatkan langsung oleh tanaman. Peran ini sangat krusial karena fosfor merupakan unsur hara esensial yang terlibat dalam pembentukan energi, metabolisme, dan perkembangan akar.

Selain melarutkan fosfat, bakteri juga berperan dalam mineralisasi bahan organik. Proses ini melibatkan penguraian senyawa organik kompleks seperti protein, selulosa, dan lignin menjadi senyawa sederhana yang kemudian dilepaskan ke dalam tanah dalam bentuk

unsur hara anorganik. Bakteri pengurai menghasilkan enzim seperti protease, selulase, dan lipase yang memecah bahan organik menjadi amonia, nitrat, fosfat, dan sulfat. Unsur-unsur ini kemudian tersedia bagi tanaman untuk mendukung pertumbuhan dan produktivitas. Mineralisasi juga memperkaya tanah dengan humus, yang berperan dalam memperbaiki struktur tanah, meningkatkan kapasitas menahan air, dan menjaga kesuburan jangka panjang.

Bakteri penambah ketersediaan hara berfungsi sebagai penghubung antara siklus biogeokimia tanah dan kebutuhan nutrisi tanaman. Melalui pelarutan fosfat dan mineralisasi bahan organik, mereka memastikan bahwa unsur hara penting tetap tersedia dalam bentuk yang dapat diserap akar, sehingga tanaman tumbuh lebih sehat, lebih produktif, dan lebih tahan terhadap kondisi lingkungan yang menantang. Beberapa contoh bakteri rizosfer yang biasa ditemukan yaitu; *Pseudomonas fluorescens* group., *Bacillus subtilis*, *B. amyloliquefaciens, Azospirillium* sp., *Rhizobium/ Bradyrhizobium* sp., *Acinetobacter* sp., dan *Entrobacter* sp.

3.6.3 Bakteri Pengatur Pertumbuhan Tanaman (PGPR—Plant Growth Promoting Rhizobacteria)

Bakteri pengatur pertumbuhan tanaman atau *Plant Growth Promoting Rhizobacteria* (PGPR) adalah kelompok bakteri yang hidup di sekitar akar dan memiliki kemampuan khusus dalam mendukung pertumbuhan tanaman melalui produksi maupun aktivasi zat pengatur tumbuh. Kehadiran mereka di rizosfer sangat dipengaruhi oleh eksudat akar yang menyediakan sumber energi dan nutrisi, sehingga PGPR dapat berkolonisasi dengan baik dan berinteraksi langsung dengan sistem akar (Andrade *et al.*, 2023)

Secara umum, PGPR mampu menghasilkan hormon pertumbuhan seperti auksin, giberelin, dan sitokinin. Auksin berperan dalam merangsang pembentukan akar lateral dan rambut akar, yang meningkatkan kapasitas tanaman dalam menyerap air dan hara. Giberelin berfungsi mempercepat pemanjangan batang dan perkecambahan biji, sedangkan sitokinin berperan dalam pembelahan sel dan memperlambat penuaan daun. Selain memproduksi hormon, PGPR juga dapat mengaktifkan jalur metabolisme tanaman sehingga tanaman lebih responsif terhadap zat pengatur tumbuh yang sudah ada.

Interaksi ini memberikan dampak nyata pada vigor tanaman, karena akar menjadi lebih berkembang, sistem fotosintesis lebih efisien, dan tanaman lebih tahan terhadap cekaman lingkungan. PGPR juga sering dikaitkan dengan peningkatan ketahanan terhadap patogen melalui mekanisme *induced systemic resistance* (ISR), di mana bakteri memicu sistem pertahanan tanaman sehingga lebih siap menghadapi serangan penyakit.

PGPR tidak hanya berfungsi sebagai penyedia nutrisi tambahan, tetapi juga sebagai regulator biologis yang mengoptimalkan pertumbuhan tanaman melalui produksi dan aktivasi zat pengatur tumbuh. Peran ini menjadikan PGPR sebagai komponen penting dalam pertanian berkelanjutan, karena mampu meningkatkan produktivitas tanaman secara alami tanpa bergantung penuh pada input kimia sintetis.

Bakteri pengatur pertumbuhan tanaman atau *Plant Growth Promoting Rhizobacteria* (PGPR) memiliki kemampuan khusus dalam meningkatkan pembentukan akar lateral sekaligus mendukung pertumbuhan tajuk tanaman. Kehadiran mereka di sekitar akar

memungkinkan interaksi langsung dengan sistem perakaran melalui eksudat akar yang menjadi sumber energi. PGPR menghasilkan hormon pertumbuhan seperti auksin yang merangsang pembentukan akar lateral dan rambut akar, sehingga sistem akar menjadi lebih luas dan lebih efisien dalam menyerap air serta unsur hara. Dengan akar yang lebih bercabang dan kuat, tanaman memiliki fondasi yang lebih baik untuk mendukung pertumbuhan bagian atas.

PGPR juga dapat menghasilkan giberelin dan sitokinin yang berperan dalam pemanjangan batang, pembelahan sel, serta perkembangan daun. Kombinasi hormon ini membuat tajuk tanaman tumbuh lebih subur, dengan daun yang lebih lebar dan hijau, sehingga proses fotosintesis berlangsung lebih optimal. Pertumbuhan tajuk yang sehat pada akhirnya meningkatkan vigor tanaman secara keseluruhan, menjadikannya lebih produktif dan lebih tahan terhadap kondisi lingkungan yang menantang.

Secara menyeluruh, PGPR berfungsi sebagai regulator biologis yang menghubungkan perkembangan akar dengan pertumbuhan tajuk. Dengan memperkuat sistem akar melalui pembentukan akar lateral dan mendukung perkembangan tajuk melalui produksi hormon pertumbuhan, PGPR memberikan kontribusi nyata terhadap kesehatan dan produktivitas tanaman dalam sistem pertanian berkelanjutan(Iqbal, Singh and Chandra, 2024).

3.6.4 Peran Bakteri Sebagai Agen Biokontrol

Bakteri berperan sebagai agen biokontrol dengan cara memanfaatkan berbagai mekanisme alami untuk menekan pertumbuhan patogen dan menjaga kesehatan tanaman(Villavicencio-Vásquez *et al.*, 2025). Salah satu

mekanisme utama adalah kompetisi nutrisi dan ruang di daerah rizosfer. Bakteri bermanfaat mampu berkolonisasi lebih cepat dan efisien pada permukaan akar, sehingga patogen kehilangan kesempatan untuk mendapatkan sumber energi dari eksudat akar maupun ruang untuk berkembang. Dengan dominasi ini, bakteri bermanfaat menciptakan kondisi yang tidak mendukung bagi patogen(Lahlali *et al.*, 2022).

Selain itu, banyak bakteri menghasilkan siderofor, yaitu molekul pengikat besi dengan afinitas tinggi. Besi merupakan unsur penting bagi pertumbuhan mikroba, termasuk patogen. Ketika bakteri bermanfaat mengikat besi melalui siderofor, ketersediaan unsur tersebut bagi patogen menjadi sangat terbatas. Akibatnya, patogen mengalami hambatan pertumbuhan dan tidak mampu berkembang optimal. Efek ini sekaligus memberikan keuntungan bagi tanaman karena besi yang terikat dapat dimobilisasi untuk mendukung metabolisme tanaman(Yadav and Sharma, 2025).

Bakteri juga mampu menghasilkan senyawa antimikroba atau bersifat antagonistik, seperti antibiotik, enzim penghambat, dan senyawa volatil. Senyawa-senyawa ini dapat merusak dinding sel patogen, mengganggu metabolisme, atau bahkan mematikan mikroba perusak. Contoh nyata adalah *Pseudomonas fluorescens* yang menghasilkan antibiotik dan siderofor untuk menekan patogen akar, serta *Bacillus subtilis* yang menghasilkan enzim kitinase dan senyawa antimikroba yang efektif melawan jamur patogen.

3.7 Actinomycetes Indigenus yang Menguntungkan bagi Tanaman

3.7.1 Gambaran Umum Actinomycetes Indegenus Rizosfere

Actinomycetes indigenus yang menguntungkan bagi tanaman umumnya adalah isolat-isolat lokal actinomycetes yang ditemukan dan diadaptasi pada kondisi agroekosistem setempat, lalu menunjukkan efek positif melalui beberapa mekanisme. Di rizosfer, actinomycetes ini dapat membantu meningkatkan kesehatan tanaman dengan menekan patogen penyebab penyakit melalui produksi senyawa antimikroba (misalnya antibiotik atau metabolit sekunder), menghasilkan enzim litik yang melemahkan dinding sel patogen, serta berkompetisi secara ruang dan nutrisi sehingga patogen sulit untuk kolonisasi. Selain penghambatan langsung, banyak actinomycetes juga mampu memicu pertahanan tanaman (*induced resistance*), sehingga tanaman menjadi lebih cepat merespons saat patogen masuk. Dampak lainnya yang sering terlihat dari actinomycetes menguntungkan adalah perannya dalam mempercepat penguraian bahan organik sehingga unsur hara menjadi lebih tersedia, termasuk dukungan terhadap ketersediaan nitrogen dan fosfor melalui proses mineralisasi atau pelepasan hara dari bentuk yang terikat(Kraivuttinun *et al.*, 2024).

Actinomycetes indigenus yang menguntungkan biasanya dicirikan dari kemampuan mereka menghasilkan senyawa/enzim tertentu di bawah kondisi rizosfer, misalnya kemampuan menghambat pertumbuhan jamur atau bakteri patogen pada uji antagonisme, kemampuan menghasilkan aktivitas enzim seperti protease, kitinase, atau fosfatase (tergantung

jenis target dan kondisi), serta potensi menghasilkan siderofor atau senyawa pengikat besi yang mengurangi peluang patogen untuk memperoleh unsur Fe. Karena bersifat indigenus, isolat tersebut juga sering lebih toleran terhadap kondisi lokal tanah, misalnya tingkat pH, kelembapan, suhu, dan tipe bahan organik, sehingga lebih efektif bertahan dan berkoloni di rizosfer dibanding isolat dari luar. Hasil akhirnya adalah pertumbuhan tanaman yang lebih baik (lebih tinggi, akar lebih berkembang, atau bobot meningkat) sekaligus penurunan intensitas penyakit yang relevan dengan patogen di lahan setempat. Beberapa contoh Actinomicetes di rizosfer yaitu; *Streptomyces griseus, S. lydicus, S. albus, S. globisporus, S. pratensis, S. violaceusniger, S. xiamenensis, S. scabiei, S. ansochromogenes, Micromonospora* sp., *Thermobifida fusca*., *Nocardia* sp(HazemS. Elshafie, 2022).

3.7.2 Peran Actinomycetes dalam Menyediakan Hara Bagi Tanaman

Actinomycetes berperan penting dalam menyediakan unsur hara bagi tanaman melalui proses dekomposisi bahan organik, pelarutan fosfat, fiksasi nitrogen, serta produksi metabolit yang mendukung pertumbuhan tanaman. Dengan aktivitas ini, actinomycetes meningkatkan ketersediaan N, P, K, dan unsur mikro di dalam tanah.

Kemampuan actinomycetes mendekomposisi bahan organic dengan cara memecah senyawa kompleks, seperti selulosa, kitin, dan lignin. Prosues ini menghasilkan unsur hara makro (N,P, K) yang lebih mudah diserap tanaman. Dekomposisi juga mampu memperbaiki struktur tanah dan meningkatkan kapasitas retensi air.

Actinomycetes mampu untuk pelarutan fosfat. Banyak fosfat di tanah terikat dalam bentuk tidak larut. Actinomycetes menghasilkan asam organik yang melarutkan fosfat sehingga tersedia bagi tanaman. Hal ini sangat penting di tanah tropis yang umumnya miskin fosfor. Selain itu actinomycetes dapat memfiksasi nitrogen. Beberapa spesies actinomycetes bersimbiosis dengan tanaman (misalnya *Frankia* pada tanaman legum non-kedelai). Mikroba ini mengikat nitrogen atmosfer menjadi bentuk amonia yang dapat digunakan tanaman. Proses ini mengurangi ketergantungan pada pupuk nitrogen sintetis. Actinomycetes juga bisa berfungsi sebagai Plant Growth Promoting Rhizobacteria (PGPR). Dan juga dapat menghasilkan hormon seperti auksin dan sitokinin yang merangsang pertumbuhan akar(Navitasari *et al.*, 2022).

3.7.3 Peran Actinomycetes Sebagai Agen Biokontrol

Actinomycetes meningkatkan kesehatan tanaman dengan cara melindungi akar dari patogen, menghasilkan antibiotik alami, serta memicu ketahanan sistemik tanaman. Mikrobia ini berfungsi sebagai agen biokontrol yang ramah lingkungan sekaligus mendukung pertumbuhan tanaman melalui mekanisme biologis yang kompleks (HazemS. Elshafie, 2022)

Mekanisme actinomycetes dalam meningkatkan kesehatan tanaman dengan cara :

1. Produksi Metabolit Sekunder Bioaktif.

   Actinomycetes, khususnya genus *Streptomyces*, menghasilkan antibiotik alami (misalnya streptomycin, tetracycline) yang menekan pertumbuhan jamur dan bakteri patogen(Selim *et al.*, 2021). Senyawa ini bekerja langsung menghambat perkembangan penyakit tanaman.

2. Antagonisme terhadap Patogen.

   Mereka menghasilkan enzim litik (misalnya kitinase, selulase) yang merusak dinding sel jamur patogen. Actinomycetes juga memproduksi siderofor, molekul pengikat besi yang membuat patogen kekurangan nutrisi penting sehingga pertumbuhannya terhambat(Silva and Kitano, 2022).

3. Induksi Ketahanan Sistemik Tanaman

   Kehadiran actinomycetes di rizosfer dapat memicu resistensi sistemik terinduksi (ISR) pada tanaman.

   ISR meningkatkan kemampuan tanaman melawan serangan penyakit dengan memperkuat sistem pertahanan internal(Yiyang Yu, Ying Gui, Zijie Li , Chunhao Jiang, Jianhua Guo, 2022).

4. Aktivitas Antibakteri

   Isolat actinomycetes dari rizosfer tanaman Solanaceae terbukti mampu menghambat pertumbuhan bakteri patogen seperti *Ralstonia solanacearum* (penyebab layu bakteri), *Staphylococcus aureus*, dan *Escherichia coli*. Hal ini menunjukkan potensi mereka sebagai agen pengendali hayati terhadap berbagai penyakit tanaman (Singh and Devappa, 2022).

5. Perbaikan Kualitas Tanah

   Selain melawan patogen, actinomycetes berperan dalam dekomposisi bahan organik sehingga meningkatkan ketersediaan nutrisi. Tanah yang lebih sehat mendukung pertumbuhan akar yang kuat dan meningkatkan toleransi tanaman terhadap stres lingkungan (Hashim *et al.*, 2026)

DAFTAR PUSTAKA

Andrade, L.A. De *et al.* (2023) 'Plant Growth-Promoting Rhizobacteria for Sustainable Agricultural Production', *Microorganisms*, 11(1088), pp. 1–16. Available at: https://doi.org/https://doi.org/10.3390/microorganisms11 041088.

Bao, M. *et al.* (2025) 'New bioactive secondary metabolites from fungi : 2024', *Mycology*, 16(3), pp. 961–987. Available at: https://doi.org/10.1080/21501203.2025.2526772.

Callaghan, M.O., Ballard, R.A. and Wright, D. (2022) 'Soil microbial inoculants for sustainable agriculture : Limitations and opportunities', (April), pp. 1340–1369. Available at: https://doi.org/10.1111/sum.12811.

Chen, Q. *et al.* (2024a) 'Mechanisms and Impact of Rhizosphere Microbial Metabolites on Crop Health , Traits , Functional Components : A Comprehensive Review', pp. 1–33.

Chen, Q. *et al.* (2024b) 'Soil Microorganisms : Their Role in Enhancing Crop Nutrition and Health', pp. 1–26.

David, E.M. (2026) 'Soil microbial processes shaping seed performance : linking soil microbiomes to sustainable agriculture', (March). Available at: https://doi.org/10.3389/fmicb.2026.1797362.

Feng, Z. *et al.* (2024) 'The role of the rhizobiome recruited by root exudates in plant disease resistance : current status and future directions', *Environmental Microbiome* [Preprint]. Available at: https://doi.org/10.1186/s40793-024-00638-6.

Hashim, H.S. *et al.* (2026) 'Actinomycetes in the spotlight : biodiversity and their role in bioremediation', 42(44), pp. 1–27. Available at: https://doi.org/10.1007/s11274-025-04610-5.

HazemS. Elshafie, I.C. (2022) 'Rhizospheric Actinomycetes Revealed Antifungal and Plant-Growth-Promoting Activities under Controlled Environment', *Plants*, 11(1872), pp. 1–11. Available at: https://doi.org/https://doi.org/10.3390/plants11141872.

Iqbal, M. (2026) 'Microbial biocontrol agents and the rhizosphere microbiome : integrating ecological function and climate resilience in sustainable agriculture', (February). Available at: https://doi.org/10.3389/fmicb.2026.1771649.

Iqbal, M.Z., Singh, K. and Chandra, R. (2024) 'Recent advances of plant growth promoting rhizobacteria (PGPR) for eco-restoration of polluted soil', *Cleaner Engineering and Technology*, 23(November), p. 100845. Available at: https://doi.org/10.1016/j.clet.2024.100845.

Jing, H., Wang, H. and Wang, G. (2023) 'The mechanism effects of root exudate on microbial community of rhizosphere soil of tree , shrub , and grass in forest ecosystem under N deposition', (May), pp. 1–13. Available at: https://doi.org/10.1038/s43705-023-00322-9.

Kiprotich, K. *et al.* (2025) 'Unveiling the roles , mechanisms and prospects of soil microbial communities in sustainable agriculture', *Discover Soil* [Preprint]. Available at: https://doi.org/10.1007/s44378-025-00037-4.

Kraivuttinun, P. *et al.* (2024) 'Exploring the biocontrol and plant growth-promoting potential of Streptomyces

kronopolitis isolate SA18 against durian foliar blight and dieback disease', 25(6), pp. 2661–2669. Available at: https://doi.org/10.13057/biodiv/d250636.

Lahlali, R. *et al.* (2022) *Biological Control of Plant Pathogens: A Global Perspective*, *Microorganisms*. Available at: https://doi.org/10.3390/microorganisms10030596.

Liu, Y. *et al.* (2026) 'Research Progress on Rhizosphere Microbiota for Controlling Soil-Borne Diseases : Mechanisms , Applications , and Challenges', pp. 1–19.

Luo, C., He, Y. and Chen, Y. (2025) 'Current Research in Microbial Sciences Rhizosphere microbiome regulation : Unlocking the potential for plant growth', *Current Research in Microbial Sciences*, 8(November 2024), p. 100322. Available at: https://doi.org/10.1016/j.crmicr.2024.100322.

Ma, Y. *et al.* (2025) 'Phosphate solubilizing fungi enhance insoluble phosphate dissolution via organic acid production: mechanisms and applications', *Frontiers in Microbiology*, 16(Figure 1). Available at: https://doi.org/10.3389/fmicb.2025.1600231.

Martins, S. *et al.* (2026) 'Exploring the Role of Root Exudates in Shaping Plant – Soil – Microbe Interactions to Support Agroecosystem Resilience', pp. 1–31.

Mueller, C.W. *et al.* (2024) 'From rhizosphere to detritusphere – Soil structure formation driven by plant roots and the interactions with soil biota', 193(May 2023). Available at: https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2024.109396.

Navitasari, L. *et al.* (2022) 'Aplikasi Actinomycetes dan Bakteriofag pada Tomat Sambung untuk Mengendalikan Penyakit Layu Bakteri Ralstonia solanacearum dan Meningkatkan Hasil Buah (Application of Actinomycetes and Bacteriophages in

Tomato Grafted Plants to Decrease Bacterial Wilt Disease Ralstonia solanacearum and Increase Fruit Yield)', 27(4), pp. 521–527. Available at: https://doi.org/10.18343/jipi.27.4.514.

Pandey, K. and Singh, B. (2025) 'Soil microbiomes : a promising strategy for boosting crop yield and advancing sustainable agriculture', *Discover Agriculture* [Preprint]. Available at: https://doi.org/10.1007/s44279-025-00208-5.

Paul, G.K. *et al.* (2022) 'Volatile compounds of Bacillus pseudomycoides induce growth and drought tolerance in wheat (Triticum aestivum L .)', *Scientific Reports*, pp. 1–18. Available at: https://doi.org/10.1038/s41598-022-22354-2.

Schultes, S.R. *et al.* (2025) 'Photosynthate distribution determines spatial patterns in the rhizosphere microbiota of the maize root system', pp. 1–16.

Selim, Manal *et al.* (2021) 'Secondary metabolites and biodiversity of actinomycetes', *Journal of Genetic Engineering and Biotechnology*, 19(1), p. 72. Available at: https://doi.org/10.1186/s43141-021-00156-9.

Silva, C. and Kitano, I.T. (2022) 'The Potential Use of Actinomycetes as Microbial Inoculants and Biopesticides in Agriculture', 2(February), pp. 1–20. Available at: https://doi.org/10.3389/fsoil.2022.833181.

Singh, D. and Devappa, V. (2022) 'Suppression of Tomato Bacterial Wilt Incited by Ralstonia pseudosolanacearum Using Polyketide Antibiotic-Producing Bacillus spp . Isolated from Rhizospheric Soil', 12(12). Available at: https://doi.org/https://doi.org/10.3390/agriculture12122009.

Thepbandit, W. (2024) 'Rhizosphere Microorganisms Supply Availability of Soil Nutrients and Induce Plant Defense', pp. 1–23.

Umer, M. *et al.* (2025) 'Roles of arbuscular mycorrhizal fungi in plant growth and disease management for sustainable agriculture', *Frontiers in Microbiology*, 16. Available at: https://doi.org/10.3389/fmicb.2025.1616273.

Uribe-acosta, M. *et al.* (2025) 'Roots : metabolic architects of beneficial microbiome assembly', *Plant Physiology*, 199(1), pp. 1–11. Available at: https://doi.org/10.1093/plphys/kiaf349.

Villavicencio-Vásquez, M. *et al.* (2025) 'Biological control agents: mechanisms of action, selection, formulation and challenges in agriculture', *Frontiers in Agronomy*, 7(May), pp. 1–17. Available at: https://doi.org/10.3389/fagro.2025.1578915.

Wang, Q. *et al.* (2024) 'The role of arbuscular mycorrhizal symbiosis in plant abiotic stress', (January), pp. 1–14. Available at: https://doi.org/10.3389/fmicb.2023.1323881.

Wankhade, A. *et al.* (2025) 'A Review of Plant–Microbe Interactions in the Rhizosphere and the Role of Root Exudates in Microbiome Engineering', *Applied Sciences (Switzerland)*, 15(13), pp. 1–26. Available at: https://doi.org/10.3390/app15137127.

Wu, Y., Chen, C. and Wang, G. (2024) 'Inoculation with arbuscular mycorrhizal fungi improves plant biomass and nitrogen and phosphorus nutrients : a meta-analysis'.

Yadav, S.P. and Sharma, C. (2025) 'Advances Environmental Science bacteria and fungi and their consortia as biocontrol', pp. 335–354. Available at:

https://doi.org/10.1039/d4va00216d.

Yang, C. *et al.* (2025) 'Plant exudates-dri v en microbiome recruitment and assembl y facilita tes plant health management', (March). Available at: https://doi.org/10.1093/femsre/fuaf008.

Yiyang Yu, Ying Gui, Zijie Li , Chunhao Jiang, Jianhua Guo, D.N. (2022) 'Induced Systemic Resistance for Improving Plant Immunity by Beneficial Microbes', 11(3), pp. 1–19. Available at: https://doi.org/https://doi.org/10.3390/plants11030386.

Yue, H. *et al.* (2024) 'Host genotype - specific rhizosphere fungus enhances drought resistance in wheat', *Microbiome*, pp. 1–19. Available at: https://doi.org/10.1186/s40168-024-01770-8.

Zhou, Y. *et al.* (2024) 'Superiority of native soil core microbiomes in supporting plant growth', *Nature Communications* [Preprint], (December 2023). Available at: https://doi.org/10.1038/s41467-024-50685-3.

BAB 4

MIKROORGANISME YANG BERPOTENSI MENGHASILKAN METABOLIT PRIMER DAN METABOLIT SEKUNDER YANG BERMANFAAT BAGI TANAMAN

Oleh Zurrahmi Wirda

Pertanian modern menghadapi tantangan besar seperti degradasi tanah, perubahan iklim, dan menurunnya efisiensi input kimia. Bioteknologi mikrobial, khususnya pemanfaatan mikroorganisme yang hidup di rizosfer tanaman, menjadi alternatif untuk meningkatkan kesehatan tanaman dan produktivitas pertanian secara berkelanjutan. Mikroba rizosfer dapat meningkatkan ketersediaan nutrien, menghasilkan fitohormon, dan berperan dalam tanggap terhadap stres biotik dan abiotik tanaman.

Mikroorganisme tanah, termasuk bakteri penambat nitrogen, bakteri pelarut fosfat, serta fungi mikoriza, memiliki peran signifikan dalam meningkatkan efisiensi pemanfaatan unsur hara, mengoptimalkan pertumbuhan tanaman, dan memperbaiki kesuburan tanah (Basoka *et al*., 2025). .

4.1 Konsep Dasar Metabolit Primer dan Sekunder

4.1.1 Metabolit Primer

Mikroorganisme tanah, terutama bakteri, fungi, dan aktinomiset, menghasilkan berbagai metabolit yang berperan penting bagi kehidupannya sendiri sekaligus bagi ekosistem tanah. Secara umum, metabolit primer adalah senyawa yang dibutuhkan langsung untuk pertumbuhan dan metabolisme sel, seperti asam amino, nukleotida, vitamin, enzim, asam organik, dan alkohol. Sebaliknya, metabolit sekunder tidak secara langsung diperlukan untuk pertumbuhan, tetapi sangat penting dalam adaptasi, komunikasi, kompetisi, dan pertahanan mikroba di lingkungan tanah. Dalam konteks ekologi tanah, metabolit sekunder membantu mikroba bertahan di rhizosfer, bersaing dengan mikroba lain, dan memengaruhi kesehatan tanah serta tanaman (Minhas *et al*., 2024; Singh *et al*., 2017; Tyc *et al*., 2017; Mark *et al*., 2025).

Pada kelompok metabolit primer, mikroorganisme tanah berperan besar dalam siklus hara, terutama melalui produksi asam organik dan enzim yang membantu pelarutan serta mineralisasi unsur hara. Beberapa mikroba pelarut fosfat mampu mengubah fosfor yang tidak larut di tanah menjadi bentuk yang tersedia bagi tanaman, baik melalui mineralisasi fosfor organik maupun pelarutan mineral fosfat anorganik. Mekanisme ini sangat penting untuk meningkatkan efisiensi serapan hara, terutama pada tanah dengan ketersediaan fosfor rendah. Selain itu, berbagai bakteri rizosfer juga diketahui menghasilkan asam-asam organik yang mendukung ketersediaan unsur hara di sekitar akar (Marpaung *et al*., 2024; Qin *et al*., 2024).

Beberapa jenis senyawa metabolit primer dari mikroorganisme tanah seperti hormon pertumbuhan *indole-3-acetic acid* (IAA), sitokinin, dan giberelin, asam amino dan vitamin enzim yang membantu fiksasi nitrogen dan pelarutan fosfat. Senyawa metabolit primer berperan penting dalam fiksasi nitrogen oleh bakteri penambat N, pelarutan fosfat oleh bakteri pelarut fosfat dan produksi hara yang tersedia bagi tanaman.

4.1.2 Metabolit Sekunder

Selain metabolit primer, mikroorganisme tanah juga menghasilkan metabolit fungsional yang sering dikaitkan dengan stimulasi pertumbuhan dan perlindungan tanaman, seperti siderofor, HCN, dan senyawa pengatur tumbuh tertentu. Studi pada rhizobakteri menunjukkan bahwa isolat yang mampu mensintesis IAA dan menghasilkan siderofor memberikan respons positif terhadap tinggi tanaman, panjang akar, dan perkecambahan padi. Produksi siderofor penting karena senyawa ini mengkelat besi di tanah dan dapat membantu ketersediaan hara bagi tanaman, sekaligus menghambat patogen tertentu. Dengan demikian, metabolit yang dihasilkan mikroba tanah tidak hanya mendukung pertumbuhan mikroba itu sendiri, tetapi juga memperkuat fungsi mikroba sebagai biofertilizer dan agen hayati (Harahap *et al*., 2022; Permatasari *et al.*, 2016;). .

Metabolit sekunder yang dihasilkan oleh mikroorganisme tanah memiliki keragaman yang sangat luas, mulai dari antibiotik, senyawa volatil, siderofor, biosurfaktan, pigmen, hingga senyawa bioaktif lain yang bersifat antibakteri, antijamur, dan biokontrol. Kajian internasional menunjukkan bahwa senyawa-senyawa volatil dan larut yang dihasilkan bakteri tanah berperan dalam interaksi ekologis, termasuk kompetisi antar

mikroba dan kemungkinan efek sinergis dalam komunitas tanah. Review terbaru juga menegaskan bahwa senyawa volatil dari mikroorganisme tanah dapat menyebar melalui pori-pori tanah dan rizosfer, sehingga menjadi komponen penting dalam interaksi antagonistik maupun regulasi komunitas mikroba (Tyc *et al*., 2017; Marks *et al*.., 2025; Sharrar *et al*., 2020).

Aktinomiset dan bakteri tanah Indonesia merupakan sumber metabolit sekunder yang sangat potensial. Isolat Streptomyces sp. Ank181 dari tanah berhasil menghasilkan reduktiomisin, asam 2,3-dihidroksibenzoat, dan asam indole-3-karboksilat; reduktiomisin dilaporkan bioaktif terhadap bakteri, jamur, dan larva Artemia salina. Penelitian lain pada bakteri tanah T1.16 menemukan senyawa dominan seperti cyclo(L-prolyl-L-valine), pyrrolo[1,2-a]pyrazine-1,4-dione, dan butyl citrate yang menunjukkan aktivitas antibakteri dan antioksidan. Pada bakteri endofit asal akar kelapa sawit, metabolit sekunder juga terbukti menghambat pertumbuhan Ganoderma boninense hingga 22,89%, menegaskan peran mikroba tanah dan mikroba terkait akar sebagai sumber agen biokontrol alami (Atwita *et al*., 2025).

Berdasarkan berbagai hasil penelitian tersebut, dapat disimpulkan bahwa metabolit primer dan metabolit sekunder mikroorganisme tanah sama-sama penting, tetapi dengan fungsi yang berbeda. Metabolit primer lebih terkait dengan pertumbuhan mikroba dan peningkatan ketersediaan hara, sedangkan metabolit sekunder lebih berperan dalam pertahanan, kompetisi, sinyal ekologis, dan pengendalian patogen. Karena itu, eksplorasi mikroorganisme tanah perlu terus dikembangkan, terutama untuk mendapatkan isolat unggul penghasil metabolit yang bermanfaat bagi pertanian berkelanjutan, biopestisida, biofertilizer, dan

sumber senyawa bioaktif baru (Minhas *et al*., 2024; Selim *et al*., 2021; Tyc *et al*., 2017; Atwita *et al*., 2025).

4.2 Mikroorganisme Tanah dan Rizosfer

Mikroorganisme tanah merupakan komponen sangat penting dalam menjaga fungsi ekosistem tanah karena berperan dalam dekomposisi bahan organik, daur hara, pembentukan struktur tanah, serta hubungan simbiotik dan antagonistik dengan tanaman. Makhluk hidup tersebut meliputi bakteri tanah, fungi tanah, aktinomicetes, alga tanah, protozoa, dan virus tanah. Dalam konteks rizosfer, yaitu zona tanah yang langsung dipengaruhi oleh akar dan eksudat akar, aktivitas mikroba biasanya jauh lebih tinggi dibandingkan tanah di luar zona tersebut karena akar menyediakan sumber karbon, sinyal kimia, dan substrat yang memengaruhi kolonisasi mikroba. Akar melepaskan eksudat berupa glukosa, asam amino, asam organik, vitamin dan senyawa fenolik yang menjadi sumber energi bagi mikroorganisme. Karena itu, rizosfer sering dipandang sebagai "pusat interaksi" antara tanaman, mikroba, dan lingkungan tanah (Fallo *et al*., 2023; Pantigoso *et al*., 2022; Huang *et al*., 2014)

Komunitas mikroba tanah dan rizosfer tidak hanya beragam, tetapi juga sangat dinamis dan responsif terhadap lingkungan. Studi pada 30 padang rumput di Eropa menunjukkan bahwa mikrobioma tanah merespons kejadian ekstrem seperti kekeringan, banjir, pembekuan, dan panas secara relatif konsisten, meskipun besarnya respons tetap dipengaruhi kondisi lokal tanah dan iklim. Hasil penelitian menunjukkan PGPR (*Plant Growth Promoting Rhizobacteria*) yang mengandung genus *Basillus*, *Pseudomonas*, *Azospirilum*, *Rhizobium* dan *Enterobacter* mampu meningkatkan efisiensi penggunaan pupuk serta membantu tanaman menghadapi cekaman kekeringan dan salinitas. Temuan ini menegaskan bahwa mikroba tanah bukan sekadar "penghuni pasif",

melainkan penentu penting stabilitas fungsi tanah saat terjadi tekanan lingkungan. Interaksi tanaman–mikroba di rizosfer berperan dalam akuisisi sumber daya, terutama hara, melalui hubungan dua arah antara akar, eksudat akar, dan komunitas mikroba (Knight *et al.*, 2024; Pantigoso *et al*., 2022).

Secara fungsional, mikroorganisme rizosfer mencakup kelompok yang mendukung pertumbuhan tanaman, seperti Plant Growth Promoting Rhizobacteria (PGPR), bakteri penambat nitrogen, bakteri pelarut fosfat, bakteri pelarut kalium, penghasil hormon tumbuh seperti IAA, mikroba penghasil antibiotik, serta cendawan antagonis. Berbagai penelitian menunjukkan bahwa kelompok-kelompok ini dapat meningkatkan ketersediaan unsur hara, memperbaiki efisiensi pemupukan, membantu toleransi terhadap cekaman abiotik, dan menekan patogen melalui kompetisi, produksi senyawa antimikroba, dan induksi ketahanan tanaman. Dengan demikian, mikroba rizosfer menjadi fondasi penting dalam pertanian berkelanjutan dan pengurangan ketergantungan pada input kimia (Fallo *et al*., 2023; Ariyani *et al*., 2021; Khosa *et al*., 2024; Hanif *et al*., 2024).

Komposisi dan kelimpahan mikroba rizosfer sangat dipengaruhi oleh fase pertumbuhan tanaman dan tingkat produktivitas lahan. Pada rizosfer nanas, kelimpahan bakteri pelarut kalium, bakteri kitinolitik, dan bakteri penghasil IAA lebih tinggi pada fase generatif, sedangkan Azotobacter, bakteri pelarut fosfat, dan bakteri penghasil antibiotik lebih tinggi pada fase vegetatif. Studi yang sama juga menunjukkan bahwa lahan berproduktivitas tinggi cenderung memiliki bakteri penghasil IAA dan antibiotik lebih tinggi, dan beberapa kelompok mikroba berkorelasi dengan insidensi penyakit tertentu pada tanaman nanas. Hasil ini menunjukkan bahwa komunitas mikroba rizosfer dapat berubah mengikuti perkembangan tanaman sekaligus mempengaruhi kesehatan tanaman (Utami *et al.*, 2020)

Kegiatan eksplorasi PGPR pada perakaran kelapa sawit di lahan gambut. Dari 100 isolat PGPR yang diperoleh, 17 isolat terseleksi karena memiliki kemampuan multi-aktivitas, yang memperlihatkan besarnya potensi mikroba indigenous sebagai sumber inokulan hayati. Pada ekosistem mangrove Teluk Awur, rhizobakteri pelarut fosfat yang potensial berhasil diidentifikasi sebagai genus *Enterobacter*, menunjukkan bahwa mikroba rizosfer juga sangat relevan untuk rehabilitasi dan konservasi ekosistem pesisir. Selain itu, penelitian pada Fungi Mikoriza Arbuskula (FMA) di berbagai lokasi di Indonesia memperlihatkan bahwa mikoriza meningkatkan penyerapan fosfor, dipengaruhi kondisi lingkungan dan tanaman inang, serta dapat menurunkan kebutuhan pupuk standar pada bawang merah sambil tetap meningkatkan infeksi akar dan P-tersedia tanah (Ariyani *et al*., 2021; Oktaviani *et al*., 2020; Budi *et al*., 2024; Hazra *et al*., 2021).

Secara umum, hasil-hasil penelitian tersebut memperlihatkan bahwa mikroorganisme tanah dan rizosfer bekerja melalui dua jalur utama: pertama, mempercepat siklus hara dan penyediaan nutrisi; kedua, membangun ketahanan tanaman melalui pengaturan komunitas mikroba dan perlindungan terhadap patogen. Eksudat akar berperan sebagai substrat sekaligus sinyal yang “memilih” mikroba tertentu di rizosfer, bahkan dalam beberapa sistem budidaya berkelanjutan hubungan antara akar, eksudat, dan mikrobioma dapat mengarah pada terbentuknya tanah yang lebih menekan penyakit. Karena itu, pengelolaan tanah ke depan sebaiknya tidak hanya fokus pada pemupukan, tetapi juga pada konservasi dan rekayasa mikrobioma tanah melalui bahan organik, inokulan hayati, rotasi tanaman, dan pengurangan gangguan tanah yang berlebihan (Huang *et al*., 2014; Li *et al*., 2024; Xun *et al*., 2024; Hanif *et al*., 2024).

Beberapa bakteri penting yang hidup pada daerah rizosfer yaitu berberapa bakteri PGPR seperti *Bacillus subtilis* (bakteri yang menghasilkan antibakteri, dan hormon pertumbuhan), *Pseudomonas fluorescens* (bakteri yang memproduksi siderofor, antibiotik, dan menghambat pathogen) dan *Azotobacter chroococcum* (bakteri yang melakukan fiksasi nitrogen dan produksi vitamin). Selain bakteri, juga ada sejumlah spesies jamur di daerah rizosfer yang memiliki peran penting seperti *Trichoderma harzianum* yang dikenal sebagai antagonisme terhadap jamur patogen melalui enzim hidrolitik, dan antibiotik dan fungi mikoriza jenis *Glomus* spp. Yang berperan meningkatkan serapan fosfat dan toleransi terhadap cekaman abiotic dan memperbaiki struktur akar.

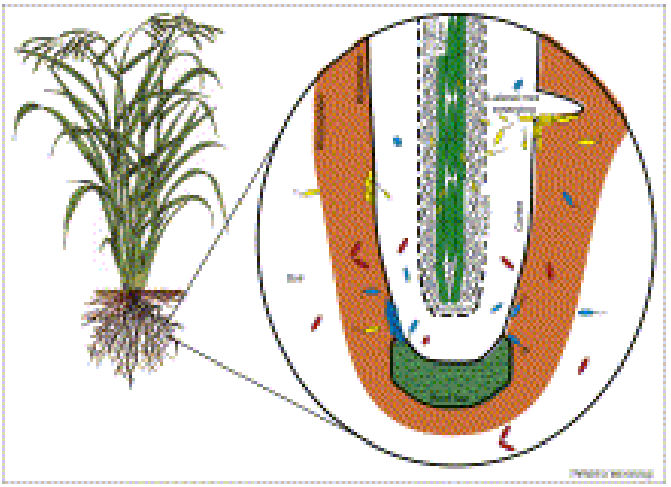
4.3 Bakteri Endofit dan Rizosfer Penghasil Metabolit Bermanfaat

Mikroorganisme tanah memiliki peranan penting dalam menjaga keseimbangan ekosistem dan mendukung pertumbuhan tanaman. Di antara berbagai kelompok mikroorganisme tersebut, bakteri endofit dan bakteri rizosfer menjadi kelompok yang banyak diteliti karena kemampuannya menghasilkan metabolit bermanfaat bagi tanaman maupun lingkungan. Bakteri endofit dan bakteri rizosfer merupakan kelompok mikroorganisme yang banyak dimanfaatkan dalam bidang pertanian, kesehatan, dan bioteknologi. Bakteri endofit hidup di dalam jaringan tanaman tanpa menimbulkan gejala penyakit, sedangkan bakteri rizosfer hidup di sekitar perakaran tanaman (rhizosfer) dan berinteraksi langsung dengan akar. Kedua kelompok bakteri ini mampu menghasilkan berbagai metabolit bermanfaat seperti hormon pertumbuhan, antibiotik, enzim, siderofor, serta senyawa antijamur dan antibakteri (Arifiani dan Lisdiani, 2021; Widiantini *et al*.,

2021). Kedua kelompok bakteri ini mampu membentuk hubungan mutualistik dengan tanaman inang sehingga berkontribusi terhadap peningkatan pertumbuhan dan ketahanan tanaman terhadap cekaman biotik maupun abiotik.

4.3.1 Bakteri Endofit

Bakteri endofit merupakan mikroorganisme yang hidup di dalam jaringan tanaman seperti akar, batang, daun, maupun biji tanpa menimbulkan kerusakan pada tanaman.. Hubungan antara bakteri endofit dan tanaman umumnya bersifat mutualisme. Tanaman menyediakan nutrisi bagi bakteri, sedangkan bakteri membantu meningkatkan pertumbuhan dan ketahanan tanaman. Bakteri ini memasuki jaringan tanaman melalui akar, stomata, atau luka alami pada jaringan tanaman.



Gambar 4. 1 Proses Kolonisasi Akar oleh Bakteri Endofit. Sel Berwarna Merah: Bakteri Penghuni Tanah; Sel Berwarna Biru: Endofit Oportunistik; Sel Berwarna Kuning: Endofit Kompetitif

(Sumber: Hardoim *et al*., 2008)

Bakteri endofit banyak ditemukan pada tanaman pangan, tanaman obat, dan tanaman perkebunan. Beberapa genus bakteri endofit yang sering ditemukan seperti *Bacillus*, *Pseudomonas*, *Enterobacter*, *Azospirillum*, *Burkholderia*.

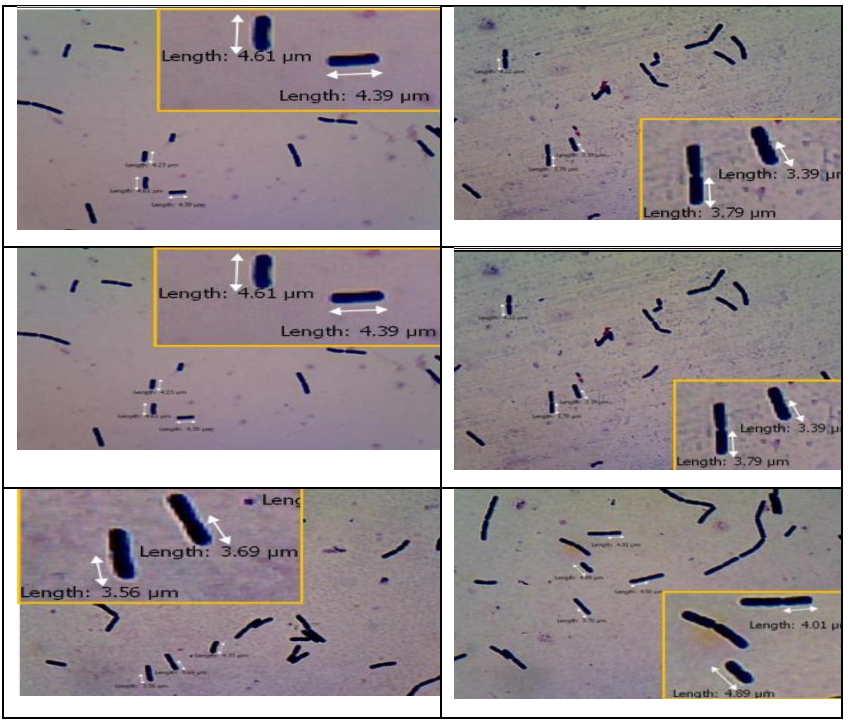
Beberapa metabolit penting yang dihasilkan bakteri endofit antara lain *indole acetic acid,* antibiotik dan senyawa anti bakteri, enzim hidrolitik, siderofor, metabolit antidiabetes dan antioksidan. *Indole acetic acid* (IAA) merupakan hormon pertumbuhan yang membantu pemanjangan akar dan meningkatkan pertumbuhan tanaman. Arifiani dan Lisdiana (2021) melaporkan bahwa telah ditemukan 7 (tujuh) isolat bakteri yang berasal dari akar jagung varietas Motoro berumur 7-8 minggu. Isolat bakteri dari akar jagung tersebut mampu menghasilkan hormon IAA yang berperan dalam meningkatkan pertumbuhan tanaman.

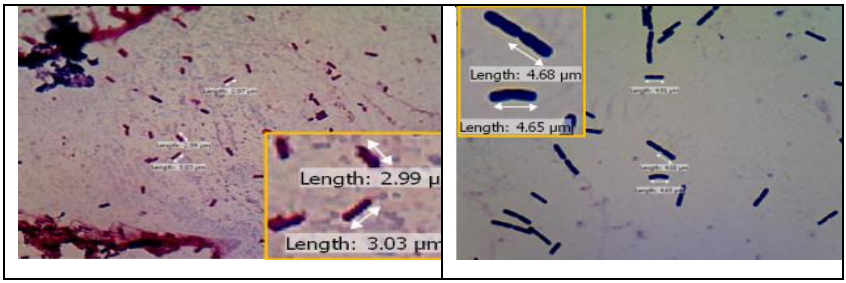
Tabel 4. 1 Karakteristik Isolat Bakteri Endofit pada Akar Tanaman Jagung Varietas Motoro

Isolat	Bentuk	Elevasi	Tepi	Warna	Gram	Bentuk sel
A	circular	undulate	undulate	putih	negatif	kokus
B	irregular	undulate	lobate	putih transparan	negatif	kokus
C	circular	flat	entire	putih kekuningan	negatif	kokus
D	circular	flat	entire	putih	negatif	kokus
E	irregular	undulate	undulate	putih	negatif	kokus
F	irregular	undulate	undulate	putih transparan	negatif	kokus
G	circular	flat	entire	putih transparan	negatif	kokus

Sumber: Arifiani dan Lisdiana (2021)

Selain IAA, bakteri endofit juga menghasilkan antibiotik dan senyawa antibakteri. Bakteri endofit yang berasal dari tumbuhan *Colacasia esculenta* dan daun alang-alang menghasilkan senyawa yang dapat berperan sebagai antibakteri. Senyawa yang dihasilkan bakteri endofit pada tangkai daun *C. esculenta* memiliki kemampuan menghambat pertumbuhan *Eicherichia coli*, *Staphylococcus aerus dan Staphylococcus epdermis*. Bakteri endofit dari *C. esculenta* dan daun alang-alang menghasilkan metabolit sekunder berupa alkaloid, flavonoid, saponin, dan tanin yang memiliki aktivitas antibakteri (Wati, 2018; Aryani *et al*., 2020).





Tabel 4. 2 Identifikasi Morfologi Sel Beberapa Isolat Bakteri Endofit Dari Colacasia Esculenta Menggunakan Pewarnaan Gram. (a) Isolat Bakteri Endofit TD1A, (b) Isolat Bakteri Endofit TD1C1, (c) Isolat Bakteri Endofit TD2D, (d) Isolat Bakteri Endofit TD2E, (e) Isolat Bakteri Endofit TD1C2, (f) Isolat Bakteri Endofit TD1C3, (g) Isolat Bakteri Endofit TD2C, (h) Isolat Bakteri Endofit TD2B .

(Sumber: Wati, 2018)

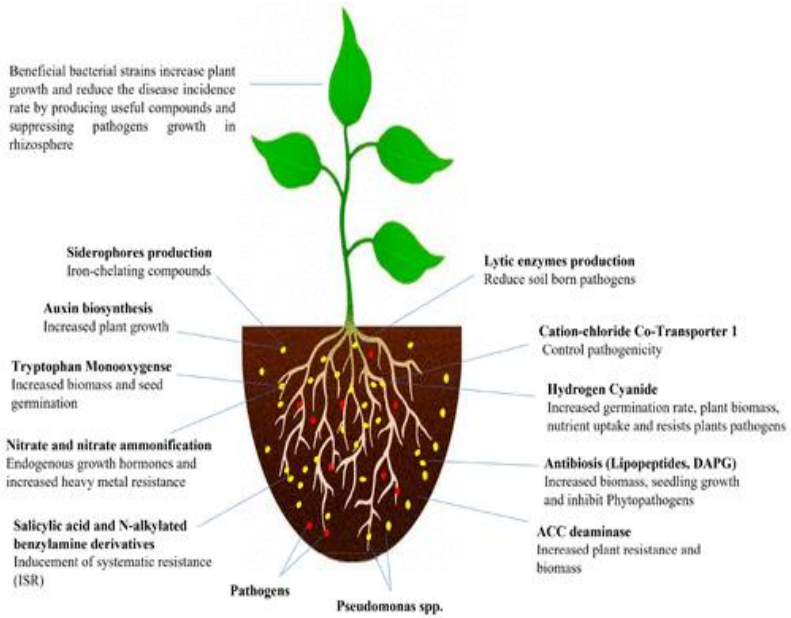
Metabolit sekunder bakteri endofit dari kulit kayu manis dilaporkan memiliki aktivitas penghambatan terhadap enzim α-glukosidase sehingga berpotensi sebagai antidiabetes alami. Kemampuan inhibisi α-glukosidase tertinggi dihasilkan oleh metabolit sekunder isolat C5 yakni sebesar 45,634% pada konsentrasi 100 ppm. Penapisan fitokimia pada penelitian ini menunjukkan bahwa metabolit sekunder isolat C5 yang memiliki daya inhibisi tertinggi mengandung senyawa flavonoid, tanin, kuinon dan saponin (Sarjono *et al*., 2020).

4.4.2 Bakteri Rizosfer

Bakteri rizosfer merupakan bakteri yang hidup di daerah sekitar akar tanaman dan dikenal sebagai PGPR (*Plant Growth Promoting Rhizobacteria*). Bakteri rizosfer memperoleh nutrisi dari eksudat akar dan membantu tanaman melalui berbagai mekanisme biologis.

Beberapa senyawa yang dihasilkan oleh bakteri rizosfer antara lain hormon pertumbuhan (IAA, giberelin, sitokinin), antibiotik alami, siderofor, asam organik pelarut fosfat, enzim pengendali patogen, senyawa volatil pemacu pertumbuhan tanaman. Senyawa tersebut dihasilkan oleh beberapa genus bakteri rizosfer seperti *Rhizobium, Azotobacter, Pseudomonas fluorescens, Bacillus subtilis*, dan *Serratia marcescens.*

Spesies *Pseudomonas* terkenal sebagai bakteri rizosfer yang efektif dalam pelarutan fosfat, produksi siderofor, dan antibiosis. dan meningkatkan ketahanan tanaman terhadap cekaman lingkungan (Mehmood *et al*., 2023). Selain itu Pseudomonas juga dapat menghasilkan zat siderofor. Siderofor merupakan senyawa pengikat besi yang diproduksi bakteri untuk membantu penyerapan Fe di lingkungan yang miskin unsur besi. Senyawa ini juga berfungsi menghambat pertumbuhan patogen dengan cara mengurangi ketersediaan besi bagi mikroorganisme patogen. Genus *Pseudomonas* dikenal sebagai penghasil siderofor yang sangat efektif dan banyak dimanfaatkan sebagai agen biokontrol (Mishra *et al.*, 2025;.



Gambar 4. 2 Mekanisme Kerja *Pseudomonas* spp. di Rizoxfer

(Sumber: Mehmood *et al*., 2023)

Hasil penelitian menunjukkan bahwa genus *Bacillus*, *Pseudomonas*, dan *Paenibacillus* sangat sering muncul sebagai bakteri menguntungkan pada dua niche tersebut. Pada endofit kedelai, misalnya, isolat yang dipilih dilaporkan mampu menghasilkan HCN, siderofor, enzim hidrolitik, antibiotik, IAA, pelarutan fosfat, dan fiksasi nitrogen; sebagian besar isolat unggulan berada pada kelompok Bacillus dan Paenibacillus. Pada rizosfer kacang arab, penelitian terbaru juga menemukan isolat Pseudomonas dan Bacillus sebagai penghasil IAA tinggi yang berasosiasi dengan peningkatan pertumbuhan tanaman (Senthilkumar *et al*, 2009; Lata *et al.*, 2024)

Bakteri endofit asal tanaman famili Arecaceae dilaporkan memiliki kemampuan melarutkan fosfat, memproduksi IAA, menghasilkan kitinase, dan mengikat nitrogen, sehingga berpotensi sebagai agens pengendali hayati. Pada tanaman nilam, beberapa bakteri endofit dan rizosfer seperti *Bacillus* dan *Pseudomonas* dilaporkan mampu menekan nematoda peluka akar *Pratylenchus brachyurus*. Penelitian lain pada bakteri rizosfer menunjukkan bahwa *Bacillus cereus* 11UJ menghasilkan metabolit sekunder yang bersifat antijamur terhadap *Rhizoctonia solani* dan *Pyricularia oryzae*, sedangkan isolat rizobakteri lain mampu menghasilkan IAA hingga 21,6 µg/mL, fosfatase, protease, dan aktivitas antifungal terhadap *Fusarium oxysporum* (Eris *et al*, 2017; .Harni *et al*., 2027; Suryadi *et al*., 2015).

Secara keseluruhan, bakteri endofit dan rizosfer merupakan sumber hayati yang sangat menjanjikan untuk pengembangan pupuk hayati, biostimulan, dan agen biokontrol yang lebih ramah lingkungan.

4.5 Fungi Endofit dan Rizosfer Penghasil Metabolit Bermanfaat

Mikroba yang berasosiasi dengan tanaman, khususnya fungi, semakin banyak diteliti karena kemampuannya menghasilkan metabolit yang bermanfaat bagi tanaman maupun manusia. Jamur endofit adalah fungi yang hidup di dalam jaringan tanaman secara laten atau tanpa menimbulkan gejala penyakit, sedangkan jamur rizosfer hidup pada zona tanah di sekitar akar yang sangat dipengaruhi oleh eksudat akar dan aktivitas mikroba. Kedua habitat ini merupakan “sumber daya biologis” penting karena menyediakan kondisi

yang mendorong interaksi simbiotik, kompetisi, dan biosintesis senyawa aktif (Jha *et al.*, 2023; Dlamini *et al*., 2022;

Jamur endofit digambarkan sebagai komunitas fungal yang menghasilkan beragam metabolit sekunder dengan aktivitas biologis, sedangkan fungi rizosfer/PGPF berperan dalam peningkatan pertumbuhan tanaman melalui produksi siderofor, pelarutan fosfat, IAA, serta aktivitas biokontrol. Karena itu, eksplorasi kedua kelompok fungi ini relevan untuk pertanian berkelanjutan, kesehatan tanaman, dan pengembangan senyawa bioaktif (Jha *et al*., 2023; Tatung *et al.*,, 2024; Win *et al.*, 2026)

4.5.1 Jamur Endofit dan Potensi Metabolitnya

Jamur endofit dapat menghasilkan senyawa bioaktif yang mirip dengan metabolit inangnya, diduga karena hubungan koevolusi dan kemungkinan transfer genetik. Hasil penelitian pada jamur endofit akar karet menunjukkan bahwa jamur endofit dapat menghasilkan senyawa bioaktif dan metabolit sekunder yang sama seperti tanaman inang, serta berpotensi dikembangkan melalui fermentasi karena mudah ditumbuhkan dan mampu menghasilkan senyawa dalam jumlah besar (Lestari dan Manurung, 2018).

Jamur endofit diketahui menghasilkan senyawa seperti fenol, poliketida, saponin, alkaloid, dan terpenoid. Senyawa-senyawa ini berkaitan dengan aktivitas antimikroba, antioksidan, antikanker, serta peningkatan ketahanan tanaman terhadap cekaman biotik dan abiotik. Tinjauan lain juga menegaskan bahwa endofit dari tanaman obat menyimpan potensi terapeutik, termasuk sebagai sumber antiinflamasi, antimikroba, dan

antikanker (Jha *et al*., 2023; Chandra *et al*., 2024; Varghese *et al*., 2024)

Jamur endofit daun pacar air/lawsonia, purwoceng, mangrove, dan kunyit telah diteliti karena memiliki aktivitas aktivitas antioksidan dan antimikroba. Studi pada daun purwoceng, misalnya, melaporkan skrining aktivitas antioksidan dan antimikroba dari metabolit jamur endofit, sedangkan jamur endofit dari akar mangrove juga menunjukkan potensi antibakteri (Hasiani *et al.*, Aminin *et al*., 2020.; Fitriana & Nurshitya; 2017)

Jamur endofit yang sering dilaporkan sebagai penghasil metabolit bermanfaat antara lain *Xylaria* sp., *Diaporthe* sp., *Fusarium* sp., *Penicillium* sp., dan *Aspergillus* sp. Pada level internasional, endofit dari Taxus spp. telah membuka jalan untuk produksi taksol secara industri, sedangkan *Diaporthe terebinthifolli* dilaporkan menghasilkan IAA yang berperan dalam pertumbuhan tanaman (El Sayed *et al*., 2020; Arora *et al*., 2024). Agu *et al*. (2016), melaporkan bahwa telah ditemukan 5 jamur endofit yang terdapat pada *Colacasia esculenta* yaitu *Mucor circinelloides, Fusarium oxysporum and Rhizopus stolonifer Penicillum cyclopium dan Aspergillus niger.*

Tabel 4. 3 Hasil Metabolit Sekunder Ekstrak Isolat Jamur Endofit Daun Pacar Air

Uji	Pereaksi	Hasil		
		Putih	Kuning	Hitam
Flavonoid	Sitro boret	+	+	+
As. aromatis	H2O2	-	+	+
Triterpen	Asam fosfat	+	+	+
Alkaloid	Dragendrof	-	-	-
Steroid	Lieberman	+	+	+
Flavonoid	Timbal asetat	+	+	+
Antioksidan	DPPH	+	+	+

Keterangan: (+) = mengandung

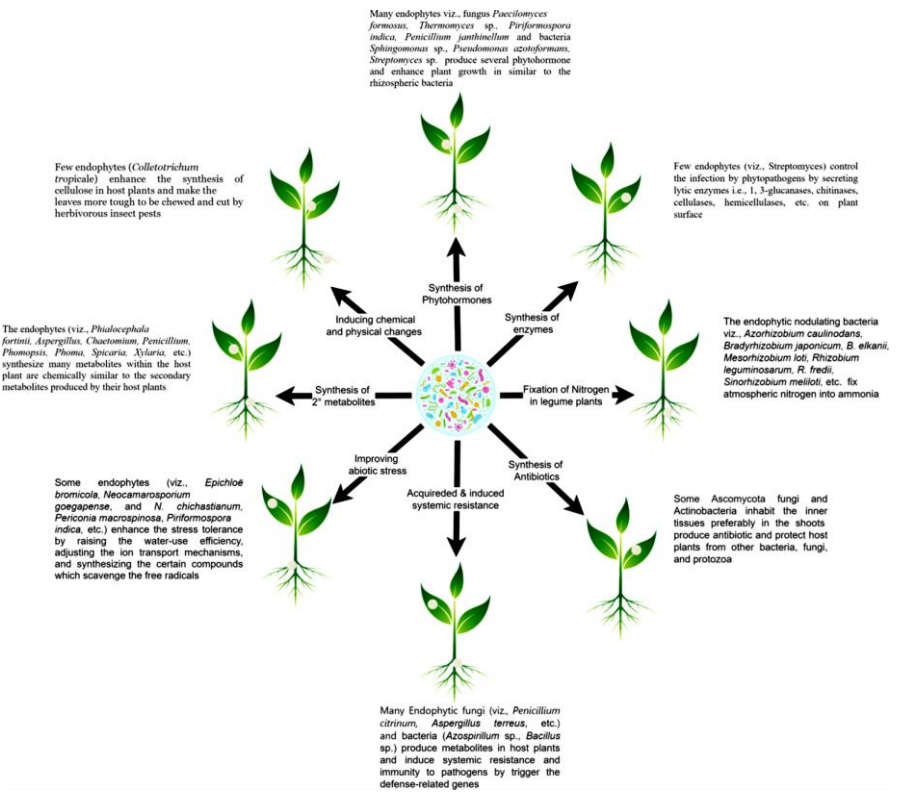
(-) = tidak mengandung

Sumber: Hasiani *et al*. (2015)

4.5.2 Jamur Rizosfer dan Potensi Metabolitnya

Jamur rizosfer adalah fungi yang hidup di sekitar perakaran dan memanfaatkan eksudat akar sebagai sumber nutrisi. Kelompok ini penting karena dapat mendukung pertumbuhan tanaman melalui produksi metabolit pemacu tumbuh dan aktivitas antagonistik terhadap patogen tanah. Hasil penelitian menunjukkan jamur rizosfer pada tegakan suren ditemukan terdiri atas *Aspergillus, Trichoderma, Rhizopus, Penicillium, dan Fusarium*, dengan *Fusarium* menunjukkan produksi IAA tertinggi sebesar 38,611 ppm. Hasil ini menunjukkan bahwa jamur rizosfer lokal memiliki potensi sebagai agen biofertilizer (Gusmiaty *et al.*, 2019).

Penelitian lain pada rizosfer bawang merah menunjukkan bahwa Aspergillus niger mampu menghasilkan IAA, dan beberapa isolat Penicillium serta Aspergillus berpengaruh terhadap perkecambahan benih. Pada riset rizosfer wortel, jamur juga diteliti sebagai produsen IAA dan biostimulan untuk mendukung pertanian ramah lingkungan. Dengan demikian, jamur rizosfer tidak hanya penting untuk biokontrol, tetapi juga sebagai sumber fitohormon alami (Ramadhan *et al.*, 2025)



Gambar 4. 3 Perbedaan Fungsi Asosiasi Endofit Pada Tanaman

(Sumber: Chandra *et al*., 2024)

Pada umumnya, fungi pemacu pertumbuhan tanaman (PGPF) dijelaskan mampu meningkatkan pertumbuhan melalui tiga mekanisme utama, yaitu produksi siderofor, pelarutan fosfat, dan pembentukan IAA. Trichoderma spp. menonjol sebagai salah satu fungi rizosfer paling penting karena mampu menghasilkan terpenoid, peptaibol, poliketida, enzim pelisis dinding sel, siderofor, dan IAA, sekaligus menekan penyakit tular tanah (Tatung *et al*., 2024; .Win *et al*, 2026)

Jamur rizosfer yang paling sering muncul dalam studi PGPF adalah *Trichoderma* spp., *Aspergillus niger*, *Penicillium* spp., *Fusarium* spp., dan Paecilomyces formosus. Metabolit penting yang dihasilkan meliputi IAA, giberelin, siderofor, enzim pelarut fosfat, serta senyawa antifungi seperti peptaibol dan poliketida. Dalam konteks ini, *Trichoderma* sangat menonjol karena berperan ganda sebagai pemacu pertumbuhan dan agen biokontrol.

Berdasarkan hasil-hasil penelitian, dapat disimpulkan bahwa jamur endofit lebih banyak dikaitkan dengan metabolit sekunder berdaya bioaktif tinggi, sedangkan jamur rizosfer lebih sering terkait dengan metabolit pemacu pertumbuhan tanaman dan antagonisme terhadap patogen. Namun, batas ini tidak mutlak karena banyak genus jamur, seperti *Aspergillus, Penicillium, Fusarium*, dan *Trichoderma*, dapat ditemukan baik sebagai endofit maupun sebagai penghuni rizosfer (Jha *et al.*, 2023).

4.6 Aktinomiset Sebagai Sumber Metabolit Bioaktif

Actinomiset merupakan mikroorganisme prokariotik berbentuk filamen yang memiliki karakteristik menyerupai jamur, tetapi secara taksonomi termasuk kelompok bakteri. Mikroorganisme ini banyak ditemukan di tanah dan berperan penting dalam dekomposisi bahan organik, siklus unsur hara, serta produksi berbagai senyawa metabolit bernilai farmasi. Genus yang paling dominan adalah *Streptomyces*, namun genus lain seperti *Micromonospora*, *Amycolatopsis*, *Nocardia*, dan *Actinomadura* juga diketahui menghasilkan metabolit penting

Penelitian global menunjukkan bahwa actinomiset merupakan salah satu sumber metabolit sekunder paling penting dalam penemuan obat modern. Sekitar dua pertiga antibiotik alami diketahui berasal dari actinomiset, terutama dari genus *Streptomyces*. Senyawa seperti streptomisin, eritromisin, tetrasiklin, rifamisin, dan vankomisin merupakan hasil metabolisme kelompok ini. Keberadaan resistensi antibiotik yang semakin meningkat mendorong eksplorasi actinomiset dari habitat baru, termasuk lingkungan laut, rizosfer, dan endofit tanaman.

Actinomiset memiliki struktur miselium vegetatif dan aerial yang memungkinkan pembentukan spora. Mikroorganisme ini tumbuh baik pada tanah kaya bahan organik dan sering menghasilkan aroma khas tanah akibat produksi geosmin. Habitat actinomiset meliputi tanah pertanian, rizosfer tanaman, jaringan internal tanaman (endofit), sedimen laut, mangrove, gurun, hingga lingkungan ekstrem seperti gua dan wilayah dingin. Eksplorasi habitat unik menjadi strategi penting dalam menemukan metabolit baru.

Penelitian internasional menunjukkan bahwa actinomiset endofit pada akar tanaman merupakan sumber metabolit bioaktif yang belum banyak dieksplorasi. Studi oleh Matsumoto dan Takahashi berhasil mengisolasi lebih dari seribu strain actinomiset endofit dari akar tanaman dan menemukan beragam metabolit sekunder dengan aktivitas biologis tinggi.

Metabolit bioaktif yang dihasilkan Actinomiset meliputi:

1. Antibiotik

   Kelompok metabolit paling terkenal dari actinomiset adalah antibiotik. Beberapa jenis metabolit yang berperan sebagai antibakteri yaitu steptomisin yang dihasilkan oleh *Streptomyces griseus*, oksitetrasiklin yang dihasilkan oleh *Streptomyces rimosus*, eritromisin yang dihasilkan oleh *Saccharopolyspora erythraea* dan vankomisin yang dihasilkan oleh *Amycolatopsis orientalis*.

2. Metabolit antijamur dan antivirus

   Selain antibiotik, actinomiset menghasilkan senyawa antijamur seperti nystatin dan amphotericin serta metabolit antivirus yang mampu menghambat replikasi virus tertentu. Berbagai studi melaporkan adanya senyawa baru dengan potensi tinggi terhadap patogen resisten obat.

3. Metabolit antikanker

   Beberapa metabolit actinomiset digunakan dalam terapi kanker, misalnya doxorubicin, bleomycin, dan mitomycin. Senyawa ini bekerja dengan menghambat sintesis DNA, merusak membran sel, atau mengganggu pembelahan sel kanker.

4. Senyawa bioaktif pertanian

Actinomiset rizosfer diketahui menghasilkan hormon tumbuh tanaman, siderofor, antibiotik hayati, serta senyawa antagonistik terhadap patogen tanaman. Oleh sebab itu, actinomiset banyak dikembangkan sebagai biofertilizer dan agen biokontrol dalam sistem pertanian berkelanjutan.

DAFTAR PUSTAKA

Agu, K.C., Awah, N.S., Nnadozie, A.C., Okeke, B.C., Orji, M.U., Iloanusi, C.A., Anaukwu, C.G., Eneite, H.C., Ifediegwu, M.C., Umeoduagu, N.D., Udoh, E.E. 2016. Isolation, Identification and Pathogenicity of Fungi Associated with Cocoyam (*Colocasia esculenta*) Spoilage. Universal Journal of Food and Nutrition Science 4(1), 1-4.

Aminin, A.L.N., Cahyanti, N., Sari, A., Mulyani, N.S. & Cahyono, B. 2020. Antioxidant and Antimicrobial Screening of Endophytic Fungi Culture Filtrate from Purwoceng (*Pimpinella alpina* Molk) Leaf. *Jurnal Kimia Sains dan Aplikasi*. Volume 23(9), 310-324.

https://doi.org/10.14710/jksa.23.9.319-324

Arifiani, R.N. & Lisdiana, L. 2021. Potensi Isolat Bakteri Endofit pada Akar Tanaman Jagung (*Zea mays*) sebagai Penghasil Hormon *Indole Acetic Acid*. *Lentera Bio* Volume 10(3), pp. 285-291

Ariyani, M.D., Dewi, T.K., Pujiyanto, S. & Suprihadi, A. 2021. Isolasi dan Karakterisasi *Plant Growth Promoting Rhizobacteria* dari Perakaran Kelapa Sawit pada Lahan Gambut. *Bioma*, Volume 23(2), pp. 159-171

Arora, P., Tabssum, R., Gupta, A.P., Kumar, S. & Gupta, S. 2024. Optimization of indole acetic acid produced by plant growth promoting fungus, aided by response surface methodology. *Heliyon* (Online) Volume 10(14), e34356

https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e34356

Aryani, P., Kusdiyantini, E., and Suprihadi, A., 2020. Isolasi Bakteri Endofit Daun Alang-Alang (*Imperata cylindrica)* dan Metabolit Sekundernya yang

Berpotensi sebagai Antibakteri. *Jurnal Akademika Biologi*, [Online] Volume 9(2), pp. 20-28. https://ejournal3.undip.ac.id/index.php/biologi/article/view/29309

Atwita, S.Y., Malau, J., Permatasari, V., Primahana, G., Dewijanti, I.D., Yuswan A. & Prastya, M.E. 2025. Potensi Aktivitas Antibakteri dan Anoksidan dari Senyawa Bioaktif Bakteri Tanah Asal Samarinda, Kalimantan Timur. *Jurnal Sumber Daya Hayati* Volume 11(2), pp. 63-73

Basoka, S.W.' Johan, E.A., Rustan, N. & Baihaqi. 2025. Review Artikel: Mikroba, Tanaman dan Teknologi sebagai Integrasi Teknologi Mikrobial dalam Pertanian Modern. *Jurnal Minfo Polgan*, 14(1), 1520-1526. https://doi.org/10.33395/jmp.v14i1.15137

Budi, S.W., Arifandi, C.P. & Winata, B. 2024. Keragaman Fungi *Mikoriza arbuskula* di Zona Inti dan Zona Rehabilitasi Taman Nasional Gunung Halimun Salak. *Jurnal Silvikultur Tropika* (Online). Volume 15(3), pp. 262-270.

Chandra, H., Yadav, A., Prasad, R., Kalra, S.J.S. Singh, A., Bhardwaj, N. & Gupta, K.K. 2024. Fungal endophytes from medicinal plants acting as natural therapeutic reservoir. *The Microbe*. Volume 3, 100073.

https://doi.org/10.1016/j.microb.2024.100073

Dewi, R. 2018. Isolasi dan Karakterisasi Mikroba Indofitpada Tangkai Daun Tanaman Tojang (*Colacasia esculenta*) dan Aktivitas Antibakterinya terhadap Pertumbuhan *Escherichia coli* dan *Staphylococus epidermis. Skripsi*. Program Studi Pendidikan Biologi Jurusan Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Jurusan Keguruan dan Ilmu Pendidikan Universitas Mataram

Dlamini, S.P., Akanmu, A.O & Babalola, O.O. 2022. Rhizospheric Microorganisms: The Gateway To A Sustainable Plant Health. *Frontiers in Sustainale Food System* (Online) Volume 6, pp. 1-17. https://doi.org/10.3389/fsufs.2022.925802

Eris, D.D., Munif, A., Soekarno, B.P.W. & Purwantara, A. 2017. Penapisan dan Potensi Bakteri Endofit Asal Tanaman Arecaceae Sebagai Agens Pengendali Hayati Cendawan Pestalotiopsis sp. Penyebab Penyakit Bercak Daun pada Kelapa Kopyor (*Cocos nucifera*). *Menara Perkebunan*, Volume 85(1), pp: 19-27.

El-Sayed, A.S.A., El-Sayed, M.T., Rady, A.M., Zein, N., Enan, G., Shindia, A., El-Hefnawy, S., Sitohy, M. & Sitohy, B. 2020. Exploiting the Biosynthetic Potency of Taxol from Fungal Endophytes of Conifers Plants; Genome Mining and Metabolic Manipulation. *Molecules* (Online) Volume 25(13).

https://doi.org/10.3390/molecules25133000

Fallo, G., Banusu, M.S., Pardosi, L. & Tefa, A. 2023. Isolasi dan Identifikasi Bakteri Rhizosfer dari Tanaman Kacang Gude (*Cajanus cajan* L.) sebagai Penghasil Hormon IAA (*Indole Acetic Acid*) dan Aplikasinya pada Benih Padi (*Oriza sativa* L.). *Berita Biologi: Jurnal Ilmu-ilmu Hayati* Volume 22(1), pp. 129-138

Gusmiaty, Restu, A.M. & Payangan, R.Y. 2019. Production of IAA (*Indole Acetic Acid*) of the Rhizosphere Fungus in the Suren Community Forest Stand. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Volume 343, The 1st International Conference of Interdisciplinary Research on Green Environmental Approach for Sustainable Development (ICROEST) 2019 3–4 August 2019, Universitas Muhammadiyah Buton, Indonesia.

Hanif, M.S., Tayyab, M. Baillo, E.H., Islam, M.M., Islam, W. & Li, X. 2024, Plant Microbiome Technology for Sustainanle Agriculture. *Frontiers Microbiology*, 15. 1-10.

https://doi.org/10.3389/fmicb.2024.1500260

Harahap, R., Herdiyanto, D., Setiawati, M.R., Azizah, I.R. Simarmata, T. 2022. Potential use of PGPR Based Biofertilizer for Improving the Nutrien Availability in Soil and Agronomic Efficiency of upland Rice. *Jurnal Kultivasi* (Online) Voume 21(3), pp. 293-304.

http://dx.doi.org/10.24198/kultivasi.v21i3.40061

Hardoim, P.R., Van Overbeek, L.S. & Van Elsas, J.D. 2008. Properties of Bacterial Endophytes and Their Proposad Role in Plant Growth. *Trends in Microbiology* (Online) Volume 16(10), pp. 463-471.

https://doi.org/ 10.1016/j.tim.2008.07.008

Harni, R., Munif, A., Supramana & Mustika, I. 2007. Potensi Bakteri Endofit Pengendali Nematoda Peluka Akar (*Pratylenchus brachyurus*) pada Nilam. *Hayati, Journal of Sciences* (Online) Volume 14(1), pp 7-12.

https://doi.org/10.4308/hjb.14.1.7

Hasiani, V.V., Ahmad, I. & Rijai, L. 2015. Isolasi Jamur Endofit dan Produksi Metabolit Sekunder Antiokksidan dari Daun Pacar (Lawsonia inermis L). *Jurnal Sains dan Kesehatan* Volume 1(4), pp. 146-153

https://doi.org/10.30872/jsk.v1i4.41

Hazra, F., Istiqomah, F.N. & Adriani, L. 2021. Aplikasi Pupuk Hayati Mikoriza pada Tanaman Bawang Merah (*Allium cepa* var. *agregatum*) Di Tanah Latosol Dramaga. *J. Il. Tan. Link.* (online), volume 23(2), pp. 59-65

Huang, X.F., Chaparro, J.M., Reardon, K.F. Zhang, R. & Shen, Q. 2014. Rhizosfer Interaction: Root Exudates, microbes,

and Microbial communities. *Botany*, volume 92, pp. 267-275. https://dx.doi.org/10.1139/cjb-2013-0225

Jha, P., Kaur, T., Chhabra, I., Panja, A. Paul, S., Kumar, V. &Malik, T. 2023. Endophytic Fungi: Hidden Treasure Chest Of Antimicrobial Metabolites Interrelationship Of Endophytes And Metabolites. *Frontiers in Microbiology* (Online) Volume 14, pp 1-16. https://doi.org/10.3389/fmicb.2023.1227830

Khoso, M.A., Wagan, S., Alam, I., Hussain, A., Ali, Q., Saha, S., Poudel, T.R., Manghwar, H. & Liu, F. 2024.. Impact of Plant Growth-Promoting Rhizobacteria (PGPR) on Plant Nutrition and root Characteristics: Current Perspektive. *Plant Stress,* 11, 100341.

Knight, C.G., Nicolitch, O., Griffiths, R.I., Goodall, T., Jones, B., Weser, C., Langridge, H. Davison, J., Dellavalle, A., Eisenhauer, N., Gongalsky, K.B., Hector, A., Jardine, E., Kardol, P., Maestre, F.T., Schädler, M., Semchenko, M., Stevens, C., Tsiafoulli, M.A., Vilhelmsson, O., Wanek, W. & de Vries, F.T. 2024. Soil Microbiomes Show Consistent and Predictable Responses to Extreme Events. *Nature*, Volume 636, 691-698. https://doi.org/10.1038/s41586-024-08185-3

Lata, D.L., Abdi, O. & Rezene, Y. 2024. IAA-Producing Bacteria From The Rhizosphere Of Chickpea (*Cicer Arietinum* L.): Isolation, Characterization, And Their Effects On Plant Growth Performance. *Heliyon* (Online) Volume 10(21), pp 1-16. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e39702

Lestari, W. & Manurung, A.Q. 2018. Deteksi Jamur Endofit dari Akar Tanaman Karet (*Hevea brasiliensis*). *Jurnal Agroplasma*, Volume 5(2), pp. 8-12. https://doi.org/10.36987/agr.v5i2.164

Li, A., Jin, K., Zhang, Y.Z., Deng, X., Chen, Y., Wei, X., Hu, B., & Jiang, Y. 2024. Root Exudates and Rhizosphere Microbiota in Responding to Long-Term Continous Cropping of Tobacco. *Nature Portfolio* (Online) Volume 24, 11274. https://doi.org/10.1038/s41598-024-61291-0

Marks, B.B. , Nogueira, M.A. & Hungria, M. 2025. Microbial Secondary Metabolites and Their Use in Achieving Sustainable Agriculture: Present Achievements and Future Challenges. *Agronomy*, Volume 15, 1350.

https://doi.org/10.3390/agronomy15061350

Marpaung, A.E., Sabrina, T., Rauf, A. Susilawati, D.N. & Siregar, L.A.M. 2024. Microbial phosphate solubilization Mechanism in P solubilizing in Andisol- A Review. *Jurnal Kultivasi* (Online) Volume 23(2), pp. 227-238.

https://doi.org/10.24198/kultivasi.v23i2.52749

Mehmood, N., Saeed,M., Zafarullah, S., Hyder, S., Rizvi, Z.F., Gondal, A.S., Jamil, N., Iqbal, R., Ali, B., Ercisli, S. & Kupe, M. 2023. Multifaceted Impacts of Plant-Beneficial Pseudomonas spp. in Managing Various Plant Diseases and Crop Yield Improvement. *ACS Omega* (Online) Volume 8, pp 22296-22315

Minhas, B., Katoch, P., Singha, A., Minhas, N. & Kaushik, N. 2024. Microbial Metabolites and Their Role to Improve Soil Health. *in* R. K. Bhatia, A. Walia (eds.), *Advancements in Microbial Biotechnology for Soil Health*, Microorganisms for Sustainability 50, https://doi.org/10.1007/978-981-99-9482-3_5

Mishra, S., Jha, C.K., Goswami, D. & Saraf, M. 2025. *Pseudomonas fluorescens:* An Influencer for Food Crop Biofortification by Siderophore-Mediated Iron Acquisition. *In*: Pandey, P., Dheeman, S., Maheshwari, D.K. (eds) Microorganisms Resilience to Climate

Change. Microorganisms for Sustainability, vol 56. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-96-3748-5_10

Oktaviani, E., Lunggani, A. T., and Ferniah, R. S., 2020. Karakter Rhizobakteri Pelarut Fosfat Potensial dari Rhizosfer Tumbuhan Mangrove Teluk Awur Kabupaten Jepara secara Mikrobiologi. *Jurnal Ilmu Lingkungan*, [Online] Volume 18(1), pp. 58-66. https://doi.org/10.14710/jil.18.1.58-66

Pantigoso, H.A., Newberger, D. & Vivanco, J.M. 2022. The Rizhosphere Mikrobiome: Plant-microbial Interaction for Resource Acquisition. *Journal of Applied Microbiology*, Volume 133(5), 2864-2876

Permatasari, O.S.I., Widajati, E., Syukur, M. & Giyanto. 2016. Aplikasi Bakteri Probiotik *Pseudomonas fluorescents* untuk Meningkatkan Produksi dan Mtu Benih Cabai. *Jurnal Agronomi Indonesia*, Volume 44(3), pp. 292-298

Qin, H., Wang, Z., Sha, W., Song, S., Qin, F. & Zhang, W. 2024. Role of Plant-Growth Promoting Rhizobacteria in Plant Machinery for Soil Heavy Metal Detoxification. *Microorganism* (Online) Volume 12, 700. https://doi.org/10.3390/microorganisms12040700

Ramadhan, A.A., Purwantisari, S. & Rasyid, R.B. 2025. Exploration of Indole Acetic Acid (IAA) Producing Fungi from Non-organic Carrot Rhizosphere as Biostimulant. *Bioscientist.* Volume 13(2), pp. 846-861.

https://doi.org/10.33394/bioscientist.v13i2.15620

Sarjono, P.R., Mahardika, H.D.R., Mulyani, N.S., Ngadiwiyana, Prasetyawibowo, N.B.A. & Ismiyarto. 2020. Aktivitas Antidiabetes Metabolit Sekunder Bakteri Endofit Asal Kulit Kayu Manis. *Jurnal Penelitian Saintek*. Volume 25(2), 143-156

Selim, M.S.M., Abdelhamid, S.A. & Mohamed, S.S., 2021. Secondary Metabolites and Biodeversity of Actinomycetes. *Journal of Genetic Engineering and Biotecnologi.* 19:72.

https://doi.org/10.1186/s43141-021-00156-9

Senthilkumar M, Swarnalakshmi, K, Govindasamy, V, Lee, Y.K, & Annapurna, K. 2009. Biocontrol potential of soybean bacterial endophytes against charcoal rot fungus, Rhizoctonia bataticola. *Current Microbiology*. 58(4), pp. 288-93. https://doi.org/doi: 10.1007/s00284-008-9329-z.

Sharrar, A.M., Christoph, A.C., Měheust, R., Diamond, S., Starr, E.P. & Banfield, J.F. 2020. Bacterial Secondary Metabolite Biosynthetic Potential in Soil Varies With Phylum, Depth, and Vegetation Type. *mBio* 11:e00416-20. https://doi.org/10.1128/mBio .00416-20.

Singh, R., Kumar, M., Mittal, A. & Mehta, P.K. 2017. Microbial Metabolites in nutrition, Healthcare and Agriculture. *3 Biotech* (Online) Volume 7;15, pp. 1-14.

https://doi.org/10.1007/s13205-016-0586-4

Suryadi, Y, Samudra, I.M., Priyatno, T.P., Susilawati, D.N., Lestari, P. & Sutoro. 2015. Aktivitas Anticendawan Bacillus cereus 11UJ terhadap Rhizoctonia solani dan Pyricularia oryzae. *Jurnal Fitopatologi Indonesia*. Volume 11(2), pp. 35–42. https://doi.org/ 10.14692/jfi.11.2.35

Tyc, O., Song, C., Dickschat, J,S., Vos, M. & Garbeva, P.2017. The Ecological Role of Volatil and Soluble Secondary Metabolites Produced by Soil Bacteria. *Trends in Microbiology* (Online) Volume 25(4), pp. 280-292. https://doi.org/10.1016/j.tim.2016.12.002

Tatung, M., Chaupoo, A.S. & Deb, C.R. 2024. Plant Growth Promoting Fungi (PGPF) for Ecologically Sound Agriculture and its Market Trend Evolution. *Current Agriculture Reasearch Joirnal* (Online) Volume 12(3), pp. 1047-1061. http://dx.doi.org/10.12944/CARJ.12.3.02

Utami, A.D., Wiyono, S., Widyastuti, R. & Cahyono, P. 2020. Keanekaragaman Mikrob Fungsional Rizosfer Nanas dengan berbagai Tingkat Produktivitas. *Jurnal Ilmu Pertanian Indonesia* Volume 25(4), pp. 584-591

Varghese, S., Jisha, M.S., Rajeshkumar, K.C., gajbhije, V., Alrefaei, A.F. & Jeewon, R. 2024. Endophytic fungi: A future prospect for breast cancer therapeutics and drug development. *Heliyon* Volume 10(13), e33995

https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e33995

Widiantini, F., Nasahi, C., Yulia, E. & Noviyawati, S. 2018. Potensi Metabolit Sekunder Asal bakteri Endofit dalam Menekan Pertumbuhan Miselium *Ganoderma boninense*. *Jurnal Fitopatologi Indonesia* Volume 14(1), pp. 104-109. https://doi.org/10.14692/jfi.14.3.104

Win, T.T., Bo, B. Khan, S. & Fu, P. 2026. Ecological Dominance, Functional Roles, And Biosafety Of *Trichoderma* Spp. As A Biofertilizer Fungus. *Frontiers in Fungal Biology* (Online) Volume 6, pp. 1-10. https://doi.org/10.3389/ffunb.2025.1641004

Xun, W., Lin, Y., Ma, A., Yan, H., Miao, Y., Shao, J., Zhang, N., Xu, Z., Shen, Q. & Zhang, R. 2024. Dissection of Rhizosphere Microbiome and Exploiting Strategies for Suistainable Agriculture. *New Phytologist* (Online) Volume 242, pp. 2401-2410

BAB 5

MIKROORGANISME YANG BERPERAN SEBAGAI AGEN HAYATI

Oleh Resti Fajarfika

Perkembangan pertanian modern selama beberapa dekade terakhir bergantung pada penggunaan pupuk sintetis dan pestisida kimia untuk meningkatkan produktivitas tanaman. Penggunaan bahan kimia tersebut secara nyata meningkatkan hasil panen dalam waktu relatif singkat, tetapi pemakaian yang terus-menerus dapat menyebabkan degradasi tanah, resistensi patogen, pencemaran lingkungan, serta gangguan terhadap keseimbangan mikroorganisme tanah. Kondisi ini mendorong berkembangnya pendekatan pertanian berkelanjutan yang lebih ramah lingkungan melalui pemanfaatan mikroorganisme sebagai agen hayati (Boro *et al*., 2022).

Di dalam agroekosistem, keberadaan mikroorganisme menjadi penting karena tanah merupakan habitat utama berbagai komunitas mikroba yang berperan dalam dekomposisi bahan organik, siklus unsur hara, dan pembentukan struktur tanah. Mikroorganisme di daerah perakaran tanaman atau rizosfer memiliki interaksi yang sangat erat dengan tanaman. Interaksi tersebut dapat bersifat menguntungkan karena mikroba tertentu mampu menghasilkan hormon pertumbuhan, meningkatkan

penyerapan nutrisi, serta melindungi akar dari infeksi patogen (Elnahal *et al*., 2022).

Konsep penggunaan agen hayati semakin penting dalam sistem pertanian modern karena mampu menjadi alternatif pengendalian yang lebih aman dibandingkan dengan pestisida sintetis. Selain mendukung keberlanjutan lingkungan, penggunaan agen hayati juga membantu menjaga keseimbangan biologi tanah dan mengurangi residu kimia pada hasil pertanian. Oleh sebab itu, pemanfaatan mikroorganisme sebagai agen hayati menjadi salah satu komponen utama dalam sistem Pengendalian Hama Terpadu (PHT) (Bonaterra *et al.*, 2022).

5.1 Konsep Umum Mikroorganisme Agen Hayati

Agen hayati adalah organisme hidup yang digunakan untuk memberikan manfaat biologis dalam sistem pertanian. Istilah ini memiliki ruang lingkup yang luas karena mencakup seluruh mikroorganisme yang berperan sebagai biofertilizer dan biopestisida untuk meningkatkan produktivitas tanaman dan pertanian berkelanjutan.

Dalam konteks mikrobiologi pertanian, agen hayati mencakup mikroorganisme yang mampu meningkatkan kesehatan tanaman secara langsung maupun tidak langsung. Fungsi tersebut meliputi pengendalian hama dan penyakit, peningkatan pertumbuhan tanaman, perbaikan kualitas tanah, serta peningkatan efisiensi penyerapan unsur hara (Elnahal *et al*., 2022).

Secara konsep, agen biokontrol atau agen pengendali hayati merupakan bagian dari agen hayati. Semua agen biokontrol dapat disebut agen hayati karena memberikan manfaat biologis bagi tanaman. Namun, tidak semua agen hayati termasuk agen biokontrol. Contohnya *Azospirillum* sp. membantu pertumbuhan tanaman melalui produksi hormon

dan peningkatan penyerapan unsur hara, tetapi tidak secara langsung menekan patogen. Oleh karena itu, mikroba tersebut termasuk agen hayati namun bukan agen biokontrol utama. Sebaliknya *Bacillus thuringiensis* menghasilkan toksin yang dapat membunuh larva serangga sehingga termasuk agen biokontrol sekaligus agen hayati (Mafazah & Zulaika, 2017).

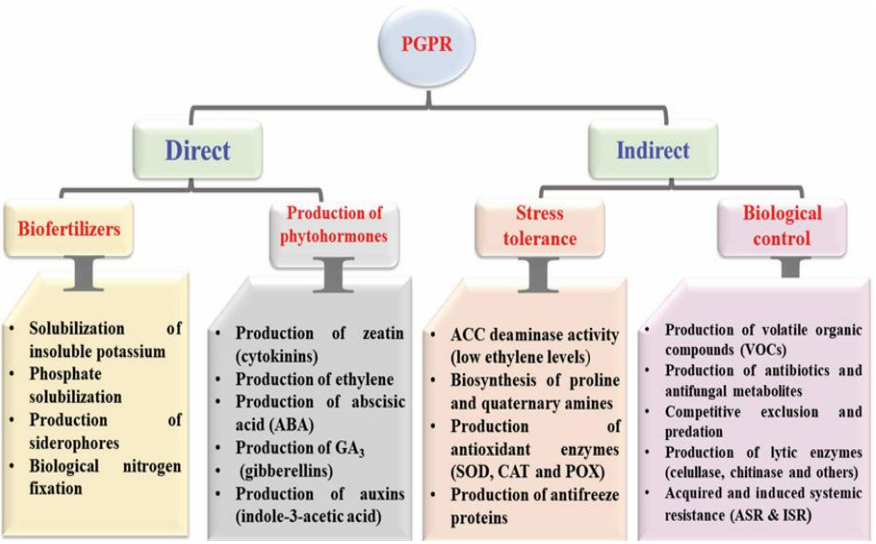
5.2 Pemanfaatan Mikroorganisme Agen Hayati

Mikroorganisme sudah banyak dimanfaatkan dalam pertanian, untuk pertumbuhan tanaman atau dikenal sebagai *plant growth-promoting michoorganisms* (PGMPs), kesehatan tanah, mengendalikan hama dan penyakit tanaman yang mengarah pada pertanian berkelanjutan. Bakteri tertentu memiliki kemampuan hidup di sekitar akar tanaman dan membentuk hubungan yang saling menguntungkan dengan tanaman inang, kelompok bakteri ini dikenal dengan PGPR (Plant Growth Promoting Rhizobacteria) (Elnahal *et al.*, 2022). Berbagai spesies mikroba bakteri yang digunakan termasuk Azospirillum, Azotobacter, Bacillus, Rhizobium, Serratia, Stenotrophomonas, Streptomyces Acinetobacter, Agrobacterium, Alcaligenes, Arthrobacter, Bradyrhizobium, Frankia, Pantoea, Pseudomonas, dan Thiobacillus (Whipps, 2001).

PGPR dapat meningkatkan ketersediaan nutrisi tertentu [pelarutan fosfat dan fiksasi nitrogen (N_2), atau mensintesis fitohormon [indole-3 acetic acid (IAA), ethylene (ET), jasmonic acid (JA), gibberellic acid (GA), dan sitokinin (CK) (Mengiste *et al*., 2010). PGPR yang mengkolonisasi tanaman inang dapat merangsang pertumbuhannya melalui mekanisme langsung dan tidak langsung (Gambar 5.1). Mekanisme langsungnya meliputi produksi hormon tumbuhan, pelarutan fosfat, dan peningkatan penyerapan zat besi. Efek tidak langsungnya meliputi produksi antibiotik,

persaingan nutrisi, parasitisme, penghambatan toksin patogen, dan resistensi yang diinduksi (Elnahal *et al.*, 2022). PGPR dalam membuat fitohormon, molekul metabolit pemberi sinyal, dan zat terkait menggambarkan bagaimana tanaman melindungi diri dari kekeringan sebagai suatu proses seperti stres abiotik dan salinitas ((Jochum *et al*., 2019).

Menurut (Abbas *et al.*, 2019), PGPR juga dapat mengubah bentuk akar, sehingga meningkatkan luas permukaan akar dan meningkatkan kinerja akar. Selain itu, PGPR dapat bersaing dengan bakteri lain dengan melakukan kolonisasi secara cepat dan mengakumulasi pasokan nutrisi yang lebih besar, sehingga mencegah organisme lain untuk tumbuh (Salomon *et al.*, 2017). Berbeda untuk melakukan kolonisasi, yang masing-masing terkait dengan inang tertentu (Choudhary, Sharma and Gaur, 2011a). Secara umum, infeksi patogen dapat ditekan dengan menggunakan antibiotik dan metabolit antijamur; sehingga dianggap sebagai strategi pengendalian hayati langsung yang terkenal (Raaijmakers, Vlami and de Souza, 2002). Bakteriosin, protein antibakteri, dan enzim adalah contoh peptida antimikroba (Compant *et al.*, 2005). Antibiotik adalah molekul antimikroba kecil yang diproduksi oleh PGPR yang dapat menghambat proses aktivitas metabolisme atau pertumbuhan patogen mikroba (Duffy *et al*., 2003). Antibiotik ini, yang sebagian besar spesifik strain, dapat menargetkan RNA ribosom (rRNA), mengubah struktur membran, dan merusak dinding sel patogen bakteri (Nazari & Smith, 2020).



Gambar 5. 1 Mekanisme Langsung dan Tidak Langsung yang Dimediasi oleh Plant Growth-Promoting Rhizobacteria (PGPR) dengan efek Menguntungkan pada Tanaman Inang. ACC, 1-Aminocyclopropane-1-Carboxylic Acid; SOD, Superoxide Dismutase; CAT, Catalase; danPOX, Peroxidase. (Sumber: El-Saadony *et al.*, 2022)

Banyak bakteri menghasilkan bakteriosin, di mana beberapa di antaranya memiliki variasi aktivitas penghambat yang lebih besar daripada yang lain (Abriouel *et al.*, 2011). Siderofor adalah agen pengkelat khusus dari besi feri yang menghambat fitopatogen untuk mengakses besi; sehingga menjaga kesehatan tanaman, khususnya di lingkungan yang kekurangan besi (Shen *et al.*, 2013). PGPR dapat mengelola berbagai penyakit tanaman dengan menghilangkan besi dari patogen, sehingga mengurangi perkembangan penyakit dan menghasilkan siderofor ekstraseluler (Radzki *et al.*, 2013). Dengan demikian, bakteriosin, siderofor, dan antibiotik telah diidentifikasi sebagai tiga pendekatan operatif utama untuk potensi pengendalian hayati sebelum aplikasi *in vivo*

(Kloepper *et al.*, 1980). Beberapa penelitian telah menyelidiki PGPR sebagai alat manajemen penyakit tanaman potensial untuk mensintesis metabolit yang bermanfaat bagi tanaman seperti siderofor (Subramanian & Smith, 2015).

PGPR secara tidak langsung dapat meningkatkan toleransi stres tanaman. Sinyal kimia, seperti fitohormon dan molekul sinyal khusus, memungkinkan komunikasi tanaman-ke-mikroba dan mikroba-ke-tanaman (Lyu *et al.*, 2020). Pengendalian dan pengaturan aktivitas dalam holobiont meliputi tanaman inang dan fitomikrobioma "spesifik" (interaksi tanaman-fitomikrobioma). Dua sinyal mikroba-ke-tanaman, lipochitooligosakarida (LCO) dan thuricin17 (TH17), meningkatkan toleransi stres pada berbagai spesies tanaman (Lyu *et al.*, 2020). PGPR yang menginduksi resistensi dan antagonis mungkin berguna sebagai inokulan baru dengan kombinasi mekanisme kerja yang berbeda, sehingga menghasilkan penggunaan yang lebih efisien untuk strategi biokontrol dan peningkatan pertumbuhan tanaman (Glick, 1995).

PGPR juga dapat menghasilkan senyawa organik volatil (VOCs: volatil organic compounds) yang memainkan peran penting dalam pertumbuhan tanaman dan menginduksi resistensi sistemik (ISR) terhadap patogen (Raza *et al.*, 2016). (Beneduzi, Ambrosini and Passaglia, 2012)menemukan bahwa PGPR dapat memicu ISR sebagai strategi untuk meningkatkan resistensi penyakit pada tanaman. Kolonisasi akar oleh jamur mikoriza arbuskular (AMF) dan strain bakteri non-patogen tertentu dapat meningkatkan resistensi tanaman terhadap stres biotik (Mauch-Mani *et al.*, 2017).

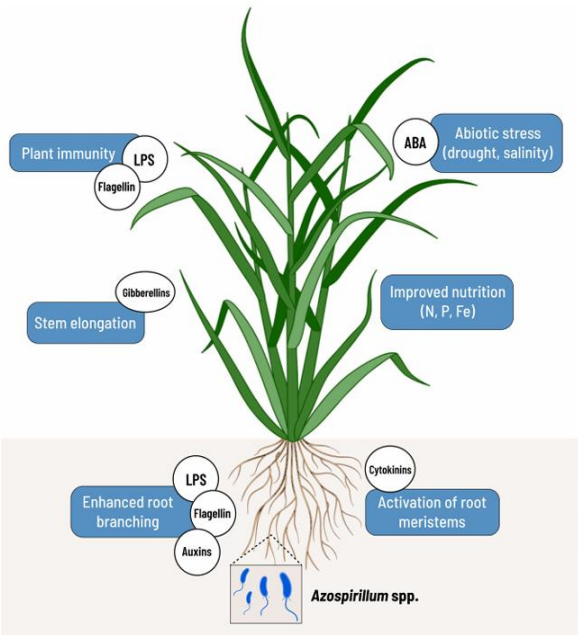
ISR yang dipicu oleh PGPR dan jamur pendorong pertumbuhan tanaman (PGPF) dapat ditemukan dalam berbagai takson tanaman (Bhattacharyya & Jha, 2012). Resistensi yang diperoleh secara sistemik (SAR); bagaimanapun, dapat diaktifkan oleh infeksi patogen (Gao *et*

al., 2015). Pensinyalan asam salisilat (SA: salicylic acid) dikaitkan dengan produksi gen terkait patogenesis (PR: pathogenesis-related). Tidak seperti SAR, ISR berfungsi secara independen dari SA, tetapi membutuhkan respons terhadap ET dan JA (jasmonic acid). Hal ini dapat dicapai dengan induksi ekspresi gen terkait pertahanan; meskipun tidak selalu dikaitkan dengan protein PR yang diinduksi (Mathys *et al.*, 2012).

Kinerja PGPR umumnya dinilai berdasarkan wilayah geografis, jenis tanah, spesies tanaman inang, dan berbagai kondisi lingkungan (Choudhary *et al*., 2011) Pertumbuhan BCA seringkali lebih mudah dipantau dalam kondisi terkontrol, misalnya, rumah kaca. Stabilitas PGPR juga dipengaruhi oleh metode, formulasi, transportasi, dan kondisi penyimpanan. Untuk mencapai tingkat kelangsungan hidup BCA yang tinggi (McIntyre & Press, 1991), seseorang harus meningkatkan teknologi formulasi (Lobo *et al.*, 2019), meningkatkan umur simpan produk BCA (Carrasco-Espinosa *et al.*, 2015), mengoptimalkan produksi jenis mikroba yang ditargetkan (Zhang, Liu and Wang, 2019) dan mencapai produksi berbiaya rendah dalam skala besar (Kang *et al.*, 2017).

Stabilitas PGPR juga dipengaruhi oleh metode, formulasi, transportasi, dan kondisi penyimpanan. Untuk mencapai tingkat kelangsungan hidup BCA yang tinggi (McIntyre dan Press, 1991), seseorang harus meningkatkan teknologi formulasi (Lobo dkk., 2019), meningkatkan umur simpan produk biological control agents (BCA) (Carrasco-Espinosa *et al*., 2015), mengoptimalkan produksi jenis mikroba yang ditargetkan (Zhang *et al*., 2019) dan mencapai produksi berbiaya rendah dalam skala besar (Kang *et al.*, 2017).

Relevansi agronomis Azospirillum semakin meningkat, karena banyak digunakan untuk meningkatkan pertumbuhan tanaman mengingat tidak adanya efek merugikan dan karena banyak sifat bermanfaatnya (Cassán *et al.*, 2020). Hal ini disebabkan oleh kolonisasi sejumlah besar spesies tumbuhan, komponen seluler struktural seperti flagelin dan lipopolisakarida (LPS) yang bertindak sebagai elisitor tumbuhan, produksi hormon yang memodifikasi fisiologi tumbuhan, kapasitasnya untuk memfiksasi nitrogen dan mengkonfigurasi arsitektur akar, yang memungkinkan perolehan mikro dan makronutrien yang lebih efisien, dan kemungkinan untuk diterapkan pada akar atau dedaunan dengan hasil yang konsisten (Gambar 5.2) (Pelagio-Flores *et al.*, 2025).



Gambar 5. 2 Mekanisme Peningkatan Pertumbuhan Tanaman Oleh Azospirillum. Inokulasi Bakteri Pada Tanaman Meningkatkan Toleransi Terhadap Stres Abiotik Melalui Penyesuaian Osmotik Yang Dimediasi Asam Absisat,

Dan Peningkatan Pertumbuhan Akar Serta Percabangan Melibatkan Sekresi Auksin Dan Sitokinin, Serta Komponen Sel Struktural Seperti Flagelin Dan Lipopolisakarida (LPS) Yang Bertindak Sebagai Elisitor Juga Memengaruhi Imunitas Inang. Pemanjangan Batang Dapat Melibatkan Deteksi Gibberellin Bakteri. Peningkatan Biomassa Secara Keseluruhan Terjadi Melalui Fiksasi Nitrogen Biologis Serta Mekanisme Untuk Peningkatan Perolehan Fosfor Dan Besi. (Sumber: Pelagio-Flores *et al*., 2025)

Azospirillum spp. adalah bakteri gram-negatif yang bergerak melalui flagela tunggal atau ganda. Flagelin adalah protein utama yang membentuk flagela dan merupakan pemicu utama imunitas tanaman. Contoh spesiesnya *A. brasilense* Sp245 adalah tipe strain dari Azospirillum baldaniorum sp. nov. dan *A. brasilense* Az39 sebagai tipe strain dari *Azospirillum argentinense* sp. nov. Bakteri ini juga mengaktifkan mekanisme perolehan fosfor dan besi, dua nutrisi penting untuk memenuhi siklus hidup tanaman. Dibeberapa negara seperti Argentina dan Brasil, aplikasi Azospirillum menunjukkan hasil yang relevan dan menjanjikan dalam hal penghematan pupuk, optimalisasi pengelolaan, dan pada akhirnya, menjadikan pertanian lebih berkelanjutan (Pelagio-Flores *et al.*, 2025).

Bakteri lain yang banyak digunakan adalah *Pseudomonas fluorescens*. Bakteri ini mampu menghasilkan antibiotik, siderofor, dan senyawa volatil yang dapat menghambat perkembangan patogen di daerah perakaran. Selain itu, bakteri tersebut juga dapat merangsang ketahanan sistemik tanaman sehingga tanaman menjadi lebih tahan terhadap serangan penyakit. *Bacillus subtilis* menghasilkan berbagai metabolit antimikroba dan mampu membentuk endospora sehingga lebih tahan terhadap kondisi lingkungan yang kurang menguntungkan. Kemampuan tersebut

menjadikan Bacillus banyak dikembangkan sebagai biofungisida komersial (Bonaterra *et al.*, 2022).

Bakteri penyedia unsur hara seperti Rhizobium mampu membentuk bintil akar pada tanaman leguminosa dan mengikat nitrogen dari udara. Nitrogen tersebut kemudian dimanfaatkan tanaman untuk pertumbuhan vegetatif. Rhizobium menghasilkan vitamin, asam amino, siderofor, dan auksin (Boiero *et al.*, 2007). Selain itu, Rhizobium mampu menghasilkan asam indol asetat (IAA) dan asam gibberellin (GA), yang merupakan hormon pertumbuhan untuk perkecambahan dan pertumbuhan tanaman (Egamberdieva *et al.*, 2017) serta meningkatkan pertumbuhan rambut akar dan cabang akar yang memperluas jangkauan akar. Rhizobium dapat meningkatkan penyerapan fosfat (Purwaningsih *et al*., 2021).

Jamur *Trichoderma harzianum* memiliki kemampuan mikoparasitisme, yaitu menyerang dan merusak hifa jamur patogen. Trichoderma juga menghasilkan antibiotik dan enzim pelisis yang membantu menghambat pertumbuhan patogen tular tanah seperti Fusarium dan Rhizoctonia (Boro *et al*., 2022).

Beauveria bassiana dan *Metarhizium anisopliae* adalah jamur agen hayati yang dapat memproduksi enzim dan metabolit sekunder yang berperan penting dalam proses infeksi pada serangga. Enzim hidrolitik seperti protease dan kitinase digunakan untuk mendegradasi kutikula, memfasilitasi penetrasi jamur kedalam hemolimpa (Figueroa *et al*., 2024).

Jamur mikoriza juga termasuk mikroorganisme bermanfaat yang memiliki hubungan simbiosis dengan akar tanaman. Mikoriza membantu memperluas daerah serapan akar sehingga tanaman lebih efisien dalam menyerap air dan unsur hara, terutama fosfor. Selain itu, mikoriza juga

membantu tanaman bertahan terhadap cekaman kekeringan dan serangan patogen akar (Figueroa *et al.*, 2024b).

Tanah yang sehat ditandai oleh tingginya aktivitas biologis dan keseimbangan komunitas mikroorganisme di dalamnya. Mikroorganisme berperan penting dalam menjaga kesuburan tanah melalui proses dekomposisi bahan organik dan siklus unsur hara (Boro *et al.*, 2022c). Bahan organik yang berasal dari sisa tanaman dan hewan akan diuraikan oleh mikroorganisme menjadi senyawa sederhana yang dapat dimanfaatkan tanaman. Proses tersebut menghasilkan humus yang berfungsi memperbaiki struktur tanah, meningkatkan kapasitas menahan air, dan meningkatkan aerasi tanah (Avis *et al.*, 2008). Komunitas mikroorganisme yang seimbang juga membantu menekan perkembangan patogen tanah secara alami. Kompetisi antar mikroorganisme menyebabkan patogen sulit mendominasi lingkungan rizosfer. Keberadaan mikroba antagonis mampu menciptakan kondisi biologis yang mendukung kesehatan tanaman (Bonaterra *et al.*, 2022)

Mikroorganisme tanah turut berperan dalam meningkatkan stabilitas agregat tanah melalui produksi polisakarida ekstraseluler. Senyawa tersebut membantu partikel tanah saling mengikat sehingga struktur tanah menjadi lebih stabil dan tahan terhadap erosi (Avis *et al.*, 2008). Penggunaan pupuk organik yang dikombinasikan dengan mikroorganisme hayati mampu meningkatkan keanekaragaman mikroba tanah. Diversitas mikroba yang tinggi berhubungan erat dengan meningkatnya fungsi biologis tanah dan produktivitas tanaman dalam jangka panjang (Elnahal *et al.*, 2022).

5.3 Aplikasi Mikroorganisme Agen Hayati di Lapangan

Mikroorganisme agen hayati dapat diaplikasikan melalui berbagai metode tergantung jenis tanaman dan tujuan penggunaannya. Salah satu metode yang umum dilakukan adalah perlakuan benih sebelum tanam. Benih yang dilapisi mikroorganisme bermanfaat memiliki peluang lebih besar untuk tumbuh sehat dan tahan terhadap patogen awal (Elnahal *et al.*, 2022). Aplikasi mikroorganisme juga dapat dilakukan melalui pencampuran dengan pupuk organik atau kompos. Teknik tersebut membantu meningkatkan populasi mikroba di tanah sekaligus memperbaiki kualitas bahan organik (Boro *et al.*, 2022c).

Pada tanaman hortikultura dan perkebunan, agen hayati sering diaplikasikan melalui penyiraman ke daerah perakaran atau penyemprotan pada bagian tanaman. Aplikasi yang tepat dapat membantu menekan penyakit tular tanah maupun penyakit pada tajuk tanaman. Keberhasilan aplikasi agen hayati dipengaruhi oleh beberapa faktor lingkungan seperti suhu, kelembapan, pH tanah, serta kandungan bahan organik. Oleh karena itu, penggunaan agen hayati perlu disesuaikan dengan kondisi agroekosistem setempat agar efektivitasnya optimal (Bonaterra *et al.*, 2022).

DAFTAR PUSTAKA

Abbas, R. *et al.* (2019) "Halotolerant PGPR: A hope for cultivation of saline soils," *Journal of King Saud University - Science*, 31(4), pp. 1195–1201. Available at: https://doi.org/10.1016/j.jksus.2019.02.019.

Abriouel, H. *et al.* (2011) "Diversity and applications of *Bacillus* bacteriocins," *FEMS Microbiology Reviews*, 35(1), pp. 201–232. Available at: https://doi.org/10.1111/j.1574-6976.2010.00244.x.

Avis, T.J. *et al.* (2008) "Multifaceted beneficial effects of rhizosphere microorganisms on plant health and productivity," *Soil Biology and Biochemistry*, 40(7), pp. 1733–1740. Available at: https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2008.02.013.

Beneduzi, A., Ambrosini, A. and Passaglia, L.M.P. (2012) "Plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR): their potential as antagonists and biocontrol agents," *Genetics and Molecular Biology*, 35(4 suppl 1), pp. 1044–1051. Available at: https://doi.org/10.1590/S1415-47572012000600020.

Bhattacharyya, P.N. and Jha, D.K. (2012) "Plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR): emergence in agriculture," *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 28(4), pp. 1327–1350. Available at: https://doi.org/10.1007/s11274-011-0979-9.

Boiero, L. *et al.* (2007) "Phytohormone production by three strains of Bradyrhizobium japonicum and possible physiological and technological implications," *Applied Microbiology and Biotechnology*, 74(4), pp. 874–880. Available at: https://doi.org/10.1007/s00253-006-0731-9.

Bonaterra, A. *et al.* (2022) "Bacteria as Biological Control Agents of Plant Diseases," *Microorganisms*. MDPI. Available at: https://doi.org/10.3390/microorganisms10091759.

Boro, M. *et al.* (2022a) "Microorganisms in biological control strategies to manage microbial plant pathogens: a review," *Archives of Microbiology*, 204(11), p. 666. Available at: https://doi.org/10.1007/s00203-022-03279-w.

Boro, M. *et al.* (2022b) "Microorganisms in biological control strategies to manage microbial plant pathogens: a review," *Archives of Microbiology*, 204(11), p. 666. Available at: https://doi.org/10.1007/s00203-022-03279-w.

Boro, M. *et al.* (2022c) "Microorganisms in biological control strategies to manage microbial plant pathogens: a review," *Archives of Microbiology*, 204(11), p. 666. Available at: https://doi.org/10.1007/s00203-022-03279-w.

Carrasco-Espinosa, K. *et al.* (2015) "Positive effect of reduced aeration rate on growth and stereospecificity of dl-malic acid consumption by Azospirillum brasilense: Improving the shelf life of a liquid inoculant formulation," *Journal of Biotechnology*, 195, pp. 74–81. Available at: https://doi.org/10.1016/j.jbiotec.2014.12.020.

Cassán, F. *et al.* (2020) "Everything you must know about Azospirillum and its impact on agriculture and beyond," *Biology and Fertility of Soils*, 56(4), pp. 461–479. Available at: https://doi.org/10.1007/s00374-020-01463-y.

Choudhary, D.K., Sharma, K.P. and Gaur, R.K. (2011a) "Biotechnological perspectives of microbes in agro-

ecosystems," *Biotechnology Letters*, 33(10), pp. 1905–1910. Available at: https://doi.org/10.1007/s10529-011-0662-0.

Choudhary, D.K., Sharma, K.P. and Gaur, R.K. (2011b) "Biotechnological perspectives of microbes in agro-ecosystems," *Biotechnology Letters*, 33(10), pp. 1905–1910. Available at: https://doi.org/10.1007/s10529-011-0662-0.

Compant, S. *et al.* (2005) "Use of Plant Growth-Promoting Bacteria for Biocontrol of Plant Diseases: Principles, Mechanisms of Action, and Future Prospects," *Applied and Environmental Microbiology*, 71(9), pp. 4951–4959. Available at: https://doi.org/10.1128/AEM.71.9.4951-4959.2005.

Duffy, B., Schouten, A. and Raaijmakers, J.M. (2003) "P <scp>ATHOGEN</scp> S <scp>ELF</scp> -D <scp>EFENSE</scp> : Mechanisms to Counteract Microbial Antagonism," *Annual Review of Phytopathology*, 41(1), pp. 501–538. Available at: https://doi.org/10.1146/annurev.phyto.41.052002.095606.

Egamberdieva, D. *et al.* (2017) "Phytohormones and beneficial microbes: Essential components for plants to balance stress and fitness," *Frontiers in Microbiology*. Frontiers Media S.A. Available at: https://doi.org/10.3389/fmicb.2017.02104.

Elnahal, A.S.M. *et al.* (2022) "The use of microbial inoculants for biological control, plant growth promotion, and sustainable agriculture: A review," *European Journal of Plant Pathology*, 162(4), pp. 759–792. Available at: https://doi.org/10.1007/s10658-021-02393-7.

El-Saadony, M.T. *et al.* (2022) "Plant growth-promoting microorganisms as biocontrol agents of plant diseases:

Mechanisms, challenges and future perspectives," *Frontiers in Plant Science*. Frontiers Media S.A. Available at: https://doi.org/10.3389/fpls.2022.923880.

Figueroa, L.B.P. *et al.* (2024a) "Enzyme production by the entomopathogenic fungi Beauveria bassiana and Metarhizium anisopliae and their application in the control of nematodes (Haemonchus spp. and Meloidogyne incognita) in vitro," *Journal of Natural Pesticide Research*, 8. Available at: https://doi.org/10.1016/j.napere.2024.100077.

Figueroa, L.B.P. *et al.* (2024b) "Enzyme production by the entomopathogenic fungi Beauveria bassiana and Metarhizium anisopliae and their application in the control of nematodes (Haemonchus spp. and Meloidogyne incognita) in vitro," *Journal of Natural Pesticide Research*, 8. Available at: https://doi.org/10.1016/j.napere.2024.100077.

Gao, Q.-M. *et al.* (2015) "Signal regulators of systemic acquired resistance," *Frontiers in Plant Science*, 06. Available at: https://doi.org/10.3389/fpls.2015.00228.

Glick, B.R. (1995) "The enhancement of plant growth by free-living bacteria," *Canadian Journal of Microbiology*, 41(2), pp. 109–117. Available at: https://doi.org/10.1139/m95-015.

Jochum, M.D. *et al.* (2019) "Bioprospecting Plant Growth-Promoting Rhizobacteria That Mitigate Drought Stress in Grasses," *Frontiers in Microbiology*, 10. Available at: https://doi.org/10.3389/fmicb.2019.02106.

Kang, S.-W. *et al.* (2017) "Comparative study of the quality characteristics of defatted soy flour treated by supercritical carbon dioxide and organic solvent,"

Journal of Food Science and Technology, 54(8), pp. 2485–2493. Available at: https://doi.org/10.1007/s13197-017-2691-8.

Kloepper, J.W. *et al.* (1980) "Enhanced plant growth by siderophores produced by plant growth-promoting rhizobacteria," *Nature*, 286(5776), pp. 885–886. Available at: https://doi.org/10.1038/286885a0.

Lobo, C.B. *et al.* (2019) "Development of low-cost formulations of plant growth-promoting bacteria to be used as inoculants in beneficial agricultural technologies," *Microbiological Research*, 219, pp. 12–25. Available at: https://doi.org/10.1016/j.micres.2018.10.012.

Lyu, D. *et al.* (2020) "Phytomicrobiome Coordination Signals Hold Potential for Climate Change-Resilient Agriculture," *Frontiers in Plant Science*, 11. Available at: https://doi.org/10.3389/fpls.2020.00634.

Mathys, J. *et al.* (2012) "Genome-Wide Characterization of ISR Induced in Arabidopsis thaliana by Trichoderma hamatum T382 Against Botrytis cinerea Infection," *Frontiers in Plant Science*, 3. Available at: https://doi.org/10.3389/fpls.2012.00108.

Mauch-Mani, B. *et al.* (2017) "Defense Priming: An Adaptive Part of Induced Resistance," *Annual Review of Plant Biology*, 68(1), pp. 485–512. Available at: https://doi.org/10.1146/annurev-arplant-042916-041132.

Nazari, M. and Smith, D.L. (2020) "A PGPR-Produced Bacteriocin for Sustainable Agriculture: A Review of Thuricin 17 Characteristics and Applications," *Frontiers in Plant Science*, 11. Available at: https://doi.org/10.3389/fpls.2020.00916.

Pelagio-Flores, R. *et al.* (2025) "A century of Azospirillum: plant growth promotion and agricultural promise," *Plant Signaling and Behavior*. Taylor and Francis Ltd. Available at: https://doi.org/10.1080/15592324.2025.2551609.

Purwaningsih, S., Agustiyani, D. and Antonius, S. (2021) *Diversity, activity, and effectiveness of Rhizobium bacteria as plant growth promoting rhizobacteria (PGPR) isolated from Dieng, central Java*. Available at: http://ijm.tums.ac.ir.

Raaijmakers, J.M., Vlami, M. and de Souza, J.T. (2002) "Antibiotic production by bacterial biocontrol agents," *Antonie van Leeuwenhoek*, 81(1–4), pp. 537–547. Available at: https://doi.org/10.1023/A:1020501420831.

Radzki, W. *et al.* (2013) "Bacterial siderophores efficiently provide iron to iron-starved tomato plants in hydroponics culture," *Antonie van Leeuwenhoek*, 104(3), pp. 321–330. Available at: https://doi.org/10.1007/s10482-013-9954-9.

Raza, W. *et al.* (2016) "Response of tomato wilt pathogen Ralstonia solanacearum to the volatile organic compounds produced by a biocontrol strain Bacillus amyloliquefaciens SQR-9," *Scientific Reports*, 6(1), p. 24856. Available at: https://doi.org/10.1038/srep24856.

Salomon, M.V. *et al.* (2017) "Use of Plant Growth-Promoting Rhizobacteria as Biocontrol Agents: Induced Systemic Resistance Against Biotic Stress in Plants," *Microbial Applications Vol.2*. Cham: Springer International Publishing, pp. 133–152. Available at: https://doi.org/10.1007/978-3-319-52669-0_7.

Shen, X. *et al.* (2013) "Comparative genomic analysis of four representative plant growth-promoting rhizobacteria in Pseudomonas," *BMC Genomics*, 14(1), p. 271. Available at: https://doi.org/10.1186/1471-2164-14-271.

Subramanian, S. and Smith, D.L. (2015) "Bacteriocins from the rhizosphere microbiome – from an agriculture perspective," *Frontiers in Plant Science*, 6. Available at: https://doi.org/10.3389/fpls.2015.00909.

Whipps, J.M. (2001) "Microbial interactions and biocontrol in the rhizosphere," *Journal of Experimental Botany*, 52(suppl 1), pp. 487–511. Available at: https://doi.org/10.1093/jexbot/52.suppl_1.487.

Zhang, H., Liu, Y. and Wang, G. (2019) "Integrated Use of Maize Bran Residue for One-Step Phosphate Bio-Fertilizer Production," *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 187(4), pp. 1475–1487. Available at: https://doi.org/10.1007/s12010-018-2874-4.

BAB 6

MIKROORGANISME YANG BERPERAN SEBAGAI AGEN BIOKONTROL

Oleh Anwar

Biokontrol merupakan strategi pengendalian organisme pengganggu tanaman (OPT) dengan memanfaatkan musuh alami, khususnya mikroorganisme seperti bakteri, jamur, dan aktinomisetes. Pendekatan ini berbeda dari penggunaan pestisida sintetis yang umumnya memberikan efek cepat namun berpotensi menimbulkan residu dan resistensi. Biokontrol bekerja melalui proses biologis yang lebih stabil dan berkelanjutan, sehingga tidak hanya menekan patogen, tetapi juga mendukung keseimbangan ekosistem serta kesehatan tanaman.

Agen hayati umumnya ditemukan pada tiga habitat utama, yaitu rizosfer (zona sekitar akar), filosfer (permukaan daun), dan sebagai endofit di dalam jaringan tanaman (Amaria *et al*., 2019). Keberadaan mikroorganisme pada berbagai habitat tersebut memungkinkan terjadinya interaksi kompleks dengan patogen, baik secara langsung maupun tidak langsung. Kinerja agen biokontrol sangat dipengaruhi oleh kondisi lingkungan, terutama suhu, kelembapan, pH tanah, serta ketersediaan bahan organik (Zakiah, 2025).

Pengendalian berbasis mikroorganisme melibatkan berbagai proses biologis seperti penghambatan pertumbuhan patogen, perebutan sumber daya, produksi senyawa bioaktif, peningkatan sistem pertahanan tanaman, serta serangan langsung terhadap patogen. Interaksi yang terjadi bersifat dinamis dan sering berlangsung secara bersamaan, sehingga memberikan efek pengendalian yang lebih adaptif.

6.1 Kelompok Mikroorganisme Agen Biokontrol

Mikroorganisme yang dimanfaatkan dalam pengendalian hayati memiliki keragaman yang sangat luas, baik dari segi morfologi, fisiologi, maupun fungsi ekologisnya. Pengelompokan mikroorganisme sebagai agen biokontrol umumnya didasarkan pada karakteristik biologis serta perannya dalam menekan organisme pengganggu tanaman (OPT), baik berupa patogen maupun hama. Setiap kelompok memiliki keunggulan dan mekanisme spesifik yang dapat dimanfaatkan dalam sistem pertanian berkelanjutan (Agrios, 2005).

Keberadaan mikroorganisme tersebut di lingkungan, khususnya di daerah rizosfer, filosfer, maupun jaringan internal tanaman, memungkinkan terjadinya interaksi kompleks yang berkontribusi terhadap kesehatan tanaman. Secara umum, kelompok utama agen biokontrol meliputi bakteri, jamur, aktinomisetes, virus, dan protozoa (Setiaji *et al*., 2023).

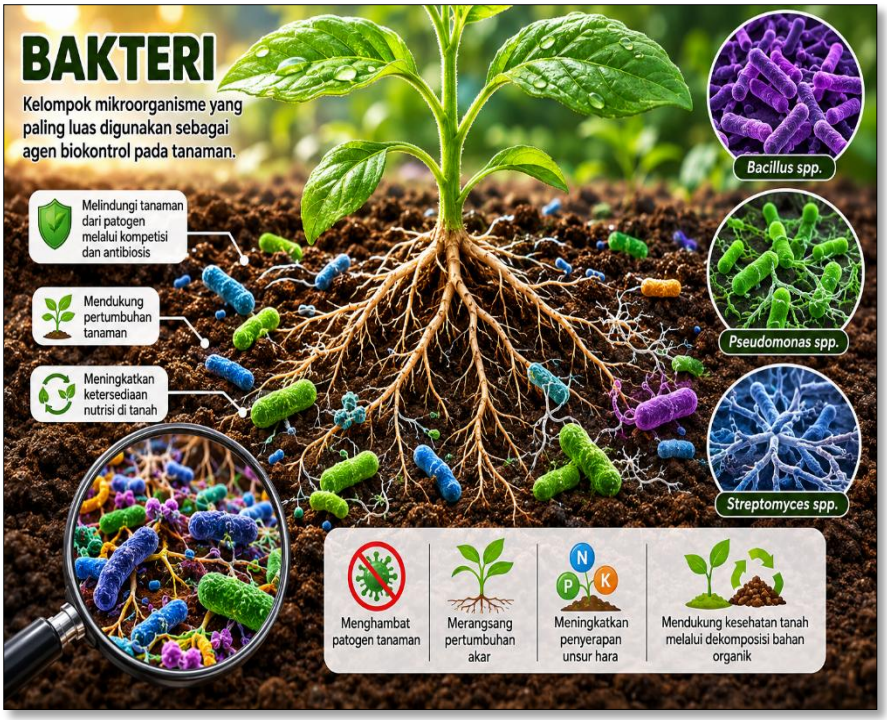
6.1.1 Bakteri

Bakteri merupakan kelompok mikroorganisme yang paling luas digunakan sebagai agen biokontrol. Hal ini disebabkan oleh kemampuannya berkembang dengan cepat, mudah beradaptasi terhadap berbagai

kondisi lingkungan, serta memiliki keragaman metabolit sekunder yang tinggi. Bakteri biokontrol umumnya banyak ditemukan di daerah rizosfer, yaitu zona tanah yang kaya akan eksudat akar sehingga mendukung pertumbuhan mikroba (Compant *et al*., 2005).

Salah satu genus yang paling banyak dimanfaatkan adalah *Bacillus spp*. Bakteri ini memiliki kemampuan membentuk endospora yang sangat tahan terhadap kondisi lingkungan ekstrem seperti suhu tinggi, kekeringan, dan tekanan osmotik. Selain itu, *Bacillus* menghasilkan berbagai senyawa antimikroba, seperti iturin, surfaktin, dan fengisin, yang bersifat antifungi dan mampu merusak membran sel patogen. Keunggulan lain dari *Bacillus* adalah kemampuannya menghasilkan enzim hidrolitik yang dapat mendegradasi dinding sel mikroorganisme patogen (Elfina *et al*., 2024).

Kelompok *Pseudomonas spp*. juga memiliki peran penting dalam pengendalian hayati. Bakteri ini dikenal sebagai penghuni aktif rizosfer yang mampu menghasilkan siderofor, yaitu senyawa dengan afinitas tinggi terhadap besi (Fe). Dengan mengikat unsur tersebut, Pseudomonas mengurangi ketersediaan besi bagi patogen, sehingga pertumbuhannya terhambat. Selain itu, bakteri ini menghasilkan berbagai senyawa bioaktif serta hormon pertumbuhan seperti auksin yang berkontribusi terhadap peningkatan pertumbuhan tanaman (Compant *et al*., 2005).



Gambar 6. 1 Bakteri Sebagai Agen Biokontrol Pada Tanaman

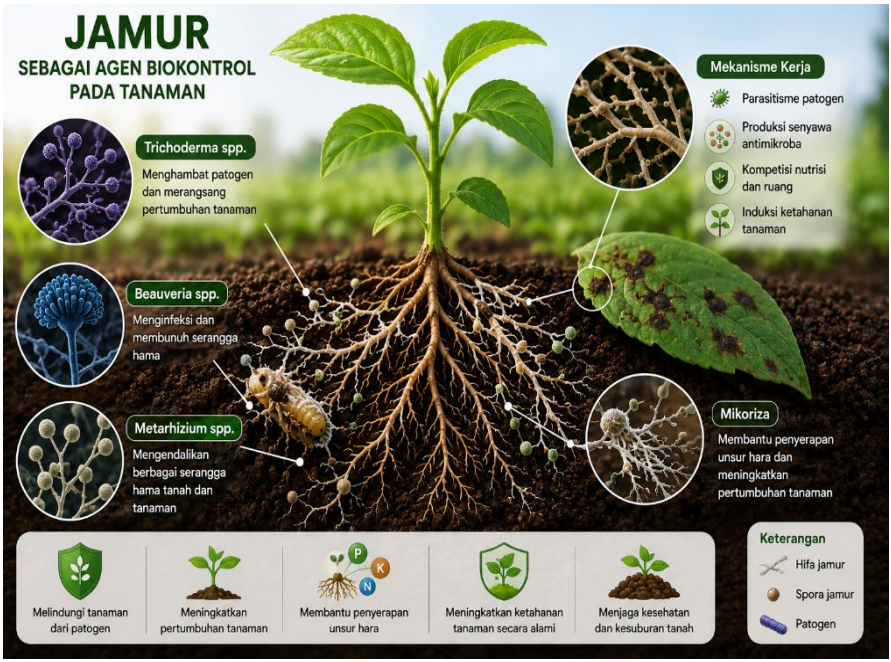
(Sumber : Gambar pribadi yang di desain dengan bantuan Ai)

Sementara itu, *Streptomyces spp*. merupakan kelompok bakteri filamen yang termasuk dalam aktinomisetes, namun sering dikaji bersama bakteri karena sifat fisiologinya yang serupa. Mikroorganisme ini dikenal sebagai produsen utama antibiotik alami di tanah. Senyawa yang dihasilkan memiliki spektrum luas dalam menghambat bakteri maupun jamur patogen. Selain itu, *Streptomyces* berperan dalam proses dekomposisi bahan organik yang berkontribusi

terhadap peningkatan kesuburan tanah (Agrios, 2005; Zai & Lase, 2025).

6.1.2 Jamur

Jamur merupakan kelompok agen biokontrol yang sangat efektif, terutama dalam mengendalikan penyakit tanaman yang bersifat tular tanah. Keunggulan jamur terletak pada kemampuannya berinteraksi langsung dengan patogen melalui berbagai mekanisme biologis (Nouriza, 2024).



Gambar 6. 2 Jamur/Cendawan Sebagai Agen Biokontrol Pada Tanaman

(Sumber : Gambar pribadi yang di desain dengan bantuan Ai)

Salah satu genus yang paling banyak digunakan adalah *Trichoderma spp.* Jamur ini dikenal memiliki kemampuan tumbuh cepat dan mampu mendominasi ruang di sekitar akar tanaman. *Trichoderma* bekerja melalui beberapa mekanisme, antara lain kompetisi ruang dan nutrisi, produksi senyawa antibiosis, serta mikoparasitisme. Dalam proses mikoparasitisme, *Trichoderma* dapat melilit hifa patogen, menembus dinding sel, dan menghancurkannya dengan bantuan enzim seperti kitinase dan glukanase (Jumadi & Caronge, 2021; Sriwati, 2017).

Selain itu, terdapat jamur entomopatogen seperti *Beauveria bassiana* yang berfungsi sebagai pengendali hama serangga. Jamur ini menginfeksi inang melalui permukaan tubuh (kutikula), kemudian berkembang di dalam tubuh serangga hingga menyebabkan kematian. Proses infeksi melibatkan tahap penempelan spora, penetrasi, dan kolonisasi jaringan internal (Shah & Pell, 2003).

Jamur entomopatogen lainnya adalah *Metarhizium anisopliae*, yang memiliki mekanisme serupa dalam menginfeksi serangga. Mikroorganisme ini efektif dalam mengendalikan berbagai jenis hama di lahan pertanian. Keunggulan kelompok ini adalah kemampuannya menekan populasi hama secara alami tanpa menimbulkan dampak negatif terhadap lingkungan maupun organisme non-target (Sopialena, 2022).

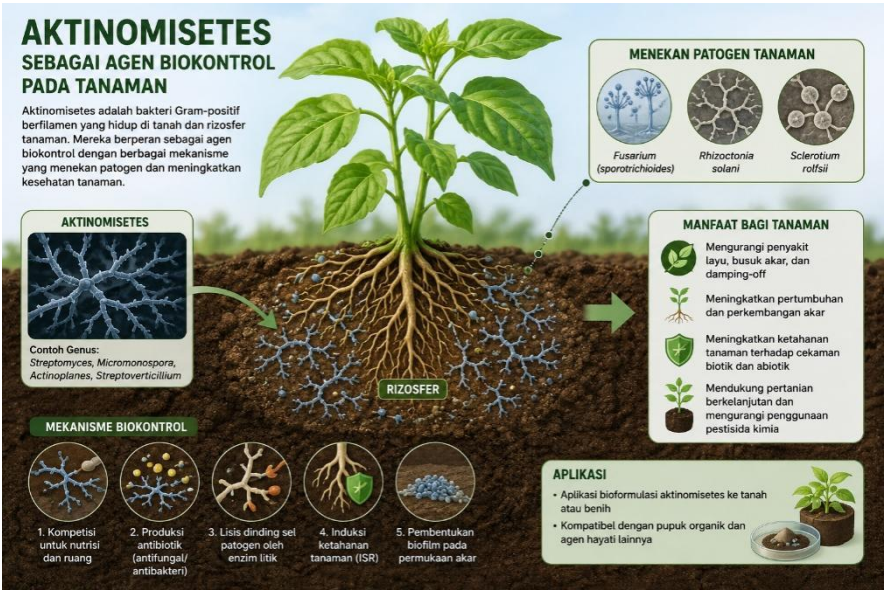
6.1.3 Aktinomisetes

Aktinomisetes merupakan kelompok mikroorganisme yang memiliki karakteristik antara bakteri dan jamur, baik dari segi struktur maupun fungsi. Mikroorganisme ini banyak ditemukan di dalam tanah

dan berperan penting dalam siklus bahan organik (Setiawan, 2022).

Salah satu peran utama aktinomisetes adalah sebagai produsen antibiotik alami. Kelompok ini, khususnya genus *Streptomyces*, menghasilkan berbagai senyawa bioaktif yang mampu menghambat pertumbuhan patogen tanaman. Selain itu, aktinomisetes berkontribusi dalam dekomposisi bahan organik kompleks seperti selulosa dan lignin, sehingga meningkatkan ketersediaan unsur hara bagi tanaman (Agrios, 2005).

Keberadaan aktinomisetes juga berperan dalam memperbaiki struktur tanah dan meningkatkan aktivitas mikroba lainnya. Kelompok aktinomisetes ini tidak hanya berfungsi sebagai agen pengendali patogen, tetapi juga sebagai komponen penting dalam menjaga kesehatan tanah secara keseluruhan.



Gambar 6. 3 Aktinomisetes Sebagai Agen Biokontrol Pada Tanaman

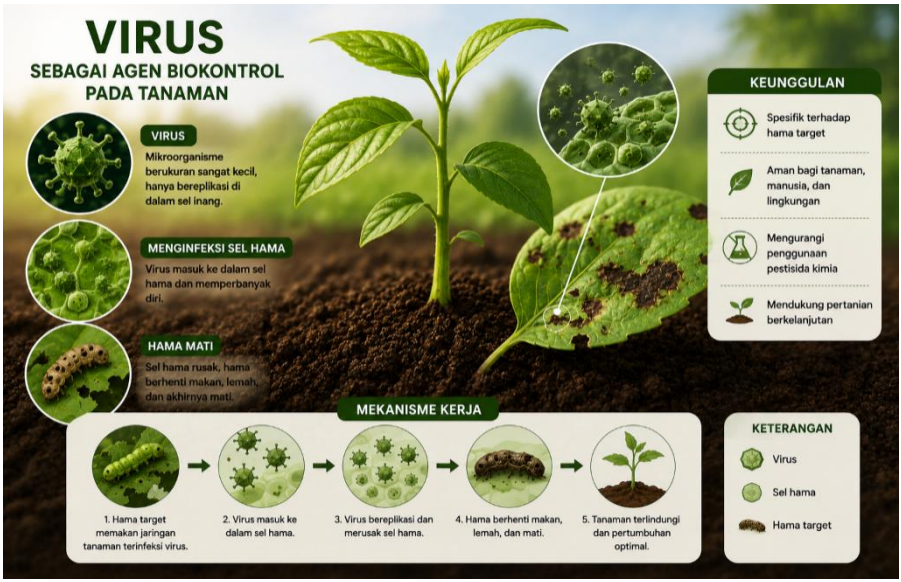
(Sumber : Gambar pribadi yang di desain dengan bantuan Ai)

6.1.4 Virus

Virus merupakan agen biokontrol yang digunakan terutama dalam pengendalian hama serangga. Virus yang dimanfaatkan biasanya bersifat sangat spesifik terhadap inangnya, sehingga tidak membahayakan organisme lain di lingkungan (Lantang & Mawardi, 2022).

Salah satu contoh yang paling umum digunakan adalah *Nucleopolyhedrovirus* (NPV). Virus ini menginfeksi larva serangga melalui konsumsi partikel virus yang terdapat pada permukaan tanaman. Setelah masuk ke dalam tubuh inang, virus akan memperbanyak diri di dalam sel dan menyebabkan kerusakan jaringan hingga kematian serangga (Moscardi, 1999).

Keunggulan utama virus sebagai agen biokontrol adalah tingkat spesifisitasnya yang tinggi, sehingga aman bagi organisme non-target. Namun, penggunaannya memiliki keterbatasan, terutama sensitivitas terhadap faktor lingkungan seperti sinar ultraviolet dan suhu tinggi yang dapat menurunkan viabilitas virus di lapangan.



Gambar 6. 4 Virus Sebagai Agen Biokontrol Pada Tanaman

(Sumber : Gambar pribadi yang di desain dengan bantuan Ai)

6.1.5 Protozoa

Protozoa merupakan mikroorganisme uniseluler yang memiliki peran sebagai predator dalam ekosistem tanah. Meskipun tidak secara langsung digunakan sebagai agen biokontrol utama, protozoa berkontribusi dalam menjaga keseimbangan populasi mikroorganisme di dalam tanah (Khairiyah *et al*., 2026).

Protozoa memangsa bakteri dan mikroorganisme lain, termasuk yang bersifat patogen. Dengan mengontrol populasi mikroba tertentu, protozoa membantu menciptakan kondisi lingkungan yang lebih stabil dan mendukung pertumbuhan tanaman. Selain itu, aktivitas predasi protozoa juga berperan dalam siklus nutrisi, karena melepaskan unsur hara yang dapat dimanfaatkan oleh tanaman (Clarholm, 1985)



Gambar 6. 5 Protozoa Sebagai Agen Biokontrol Pada Tanaman

(Sumber : Gambar pribadi yang di desain dengan bantuan menggunakan Ai)

Peran protozoa dalam biokontrol lebih bersifat tidak langsung, namun tetap penting dalam menjaga keseimbangan komunitas mikroba tanah. Dengan demikian, keberadaannya menjadi bagian integral dari sistem pengendalian hayati yang alami dan berkelanjutan.

6.2 Mekanisme Kerja Mikroorganisme Biokontrol

Efektivitas agen biokontrol sangat ditentukan oleh proses biologis yang berlangsung dalam menekan perkembangan patogen. Interaksi tersebut tidak hanya terjadi secara langsung melalui serangan terhadap patogen,

tetapi juga secara tidak langsung melalui perubahan kondisi lingkungan mikro maupun peningkatan ketahanan tanaman. Mekanisme kerja mikroorganisme biokontrol bersifat kompleks dan saling terkait, sehingga mampu memberikan efek pengendalian yang lebih stabil dan berkelanjutan (Shidqi & Ferdiansyah, 2026).

Sejalan dengan hal tersebut, berbagai penelitian menunjukkan bahwa keberhasilan agen biokontrol tidak bergantung pada satu mekanisme tunggal, melainkan kombinasi dari beberapa proses biologis yang saling melengkapi. Dengan demikian, pemahaman terhadap setiap mekanisme menjadi penting untuk menentukan jenis mikroorganisme yang tepat serta strategi aplikasinya di lapangan (Compant *et al*., 2005). Secara umum, mekanisme kerja tersebut dapat dijelaskan sebagai berikut:

6.2.1 Antagonisme

Sebagai salah satu mekanisme utama, antagonisme menggambarkan interaksi biologis di mana suatu mikroorganisme mampu menghambat pertumbuhan organisme lain melalui produksi senyawa penghambat. Senyawa tersebut dapat berupa antibiotik, toksin, maupun enzim hidrolitik yang berperan dalam merusak struktur sel patogen.

Lebih lanjut, antibiotik yang dihasilkan bekerja melalui berbagai cara, seperti mengganggu sintesis protein, merusak membran sel, atau menghambat proses metabolisme penting dalam sel patogen. Di sisi lain, enzim seperti kitinase, glukanase, dan protease berfungsi dalam mendegradasi komponen utama dinding sel, khususnya pada jamur patogen (Agrios, 2005).

Dengan kemampuan tersebut, antagonisme menjadi sangat efektif dalam menekan patogen tular tanah karena senyawa yang dihasilkan dapat berdifusi di sekitar zona perakaran. Oleh sebab itu, penghambatan tidak selalu memerlukan kontak langsung, sehingga mekanisme ini sering menjadi dasar keberhasilan banyak agen biokontrol di lapangan. Mekanisme ini kemudian berkaitan erat dengan proses lain, yaitu kompetisi dalam memperebutkan sumber daya.

6.2.2 Kompetisi

Berbeda dengan antagonisme yang menekan patogen melalui senyawa tertentu, kompetisi berlangsung melalui perebutan sumber daya terbatas antara mikroorganisme dan patogen, seperti nutrisi, ruang, dan oksigen. Dalam kondisi tersebut, mikroorganisme yang memiliki kemampuan adaptasi lebih baik akan mendominasi lingkungan dan secara tidak langsung menghambat pertumbuhan patogen (Shidqi & Ferdiansyah, 2026).

Salah satu bentuk kompetisi yang penting adalah perebutan unsur mikro, terutama besi (Fe), yang sangat dibutuhkan dalam metabolisme mikroba. Mikroorganisme tertentu mampu menghasilkan siderofor, yaitu senyawa pengikat besi dengan afinitas tinggi. Akibatnya, unsur tersebut menjadi tidak tersedia bagi patogen, sehingga pertumbuhannya terhambat (Compant *et al*., 2005).

Selain itu, kemampuan kolonisasi yang cepat pada permukaan akar juga berperan penting dalam membatasi ruang hidup patogen. Dengan terbentuknya populasi mikroorganisme yang stabil, patogen kesulitan untuk menempel dan menginfeksi tanaman. Kondisi ini menunjukkan bahwa kompetisi berfungsi sebagai

mekanisme pencegahan awal sebelum patogen berkembang lebih lanjut. Namun, apabila patogen telah berkembang, mekanisme lain seperti parasitisme akan berperan lebih dominan.

6.2.3 Parasitisme

Parasitisme merupakan mekanisme yang melibatkan interaksi langsung, di mana agen biokontrol menyerang patogen dan memanfaatkannya sebagai sumber nutrisi. Proses ini umumnya ditemukan pada mikroorganisme yang bersifat mikoparasit, terutama pada kelompok jamur antagonis.

Proses parasitisme diawali dengan pengenalan patogen melalui sinyal kimia, kemudian diikuti dengan penempelan pada permukaan tubuhnya. Selanjutnya, mikroorganisme membentuk struktur khusus yang memungkinkan penetrasi ke dalam sel patogen. Setelah berhasil masuk, agen biokontrol mengambil nutrisi dari dalam sel, sehingga menyebabkan kerusakan struktural hingga akhirnya patogen mati (Muliani *et al*., 2022).

Dalam proses tersebut, sering terjadi produksi enzim hidrolitik yang mempercepat penghancuran dinding sel. Dengan demikian, parasitisme merupakan mekanisme yang sangat spesifik dan efektif, khususnya dalam pengendalian patogen jamur di dalam tanah. Selain mekanisme yang melibatkan kontak langsung ini, terdapat pula mekanisme lain yang bekerja melalui senyawa aktif di lingkungan sekitar.

6.2.4 Produksi Senyawa Bioaktif

Selain melalui interaksi langsung, mikroorganisme juga dapat menghasilkan berbagai senyawa bioaktif yang mampu mengganggu fungsi fisiologis patogen. Senyawa ini meliputi antibiotik, metabolit sekunder, maupun

senyawa volatil yang berperan dalam menghambat pertumbuhan mikroorganisme target (Agrios, 2005).

Cara kerja senyawa tersebut cukup beragam, antara lain menghambat sintesis protein, merusak integritas membran sel, serta mengganggu proses pembelahan sel. Bahkan dalam beberapa kasus, senyawa bioaktif juga dapat menghambat sistem komunikasi antar mikroorganisme (quorum sensing), sehingga patogen tidak mampu membentuk koloni secara optimal (Raaijmakers *et al*., 2002).

Keunggulan dari mekanisme ini terletak pada kemampuannya bekerja melalui lingkungan sekitar, sehingga dapat menjangkau patogen tanpa harus terjadi kontak langsung. Produksi senyawa bioaktif sering menjadi faktor penting dalam efektivitas mikroorganisme, khususnya bakteri yang hidup di daerah rizosfer. Mekanisme ini kemudian melengkapi peran mekanisme tidak langsung lainnya, yaitu induksi ketahanan tanaman.

6.2.5 Induksi Ketahanan Tanaman

Sebagai mekanisme tidak langsung, induksi ketahanan tanaman berperan dalam meningkatkan kemampuan tanaman untuk melawan serangan patogen. Proses ini dikenal sebagai induced systemic resistance (ISR), di mana mikroorganisme berfungsi sebagai pemicu aktivasi sistem pertahanan internal tanaman (Djaenuddin, 2020).

Dalam proses ini, tanaman mengalami peningkatan berbagai respon fisiologis dan biokimia, seperti produksi enzim pertahanan, akumulasi senyawa fenolik, serta penguatan dinding sel melalui lignifikasi. Tanaman yang telah mengalami induksi ketahanan umumnya

menunjukkan respon yang lebih cepat dan efektif ketika terjadi infeksi (Pieterse *et al*., 2014).

Lebih lanjut, keunggulan mekanisme ini terletak pada sifatnya yang sistemik, sehingga perlindungan tidak hanya terjadi pada bagian tanaman yang berinteraksi langsung dengan mikroorganisme, tetapi juga menyebar ke seluruh jaringan tanaman. Tanaman memiliki tingkat ketahanan yang lebih tinggi terhadap berbagai jenis patogen.

Secara keseluruhan, kelima mekanisme tersebut tidak bekerja secara terpisah, melainkan saling berinteraksi dan melengkapi satu sama lain. Antagonisme dan produksi senyawa bioaktif berperan dalam menekan patogen secara langsung, kompetisi membatasi sumber daya, parasitisme menghancurkan patogen, sementara induksi ketahanan memperkuat sistem pertahanan tanaman. Kombinasi dari seluruh mekanisme ini menjadikan agen biokontrol sebagai pendekatan yang efektif dan berkelanjutan dalam pengendalian penyakit tanaman.

6.3 Keunggulan dan Keterbatasan Agen Biokontrol

Pemanfaatan mikroorganisme sebagai agen biokontrol dalam pengendalian organisme pengganggu tanaman (OPT) semakin berkembang seiring meningkatnya kebutuhan akan sistem pertanian yang ramah lingkungan. Pendekatan ini menawarkan alternatif yang lebih aman dibandingkan pestisida kimia, karena bekerja melalui interaksi biologis yang menjaga keseimbangan ekosistem. Meskipun demikian, keberhasilan penerapannya di lapangan tidak hanya ditentukan oleh keunggulan yang dimiliki, tetapi juga oleh kemampuan dalam mengatasi berbagai keterbatasan yang

ada. Oleh sebab itu, pemahaman yang komprehensif terhadap kedua aspek tersebut menjadi sangat penting dalam mendukung implementasi biokontrol secara efektif (Compant *et al*., 2005; Cook & Baker, 1983).

6.3.1 Keunggulan

Sejalan dengan prinsip pertanian berkelanjutan, agen biokontrol memiliki berbagai kelebihan yang menjadikannya semakin banyak digunakan dalam sistem budidaya modern, antara lain:

1) Tidak mencemari lingkungan

   Mikroorganisme biokontrol berasal dari komponen alami ekosistem, sehingga penggunaannya tidak menimbulkan pencemaran pada tanah, air, maupun udara. Selain itu, aktivitasnya cenderung mempertahankan keseimbangan biologis karena tidak merusak organisme lain yang berperan dalam agroekosistem (Muliani *et al*., 2022).
2) Tidak meninggalkan residu berbahaya

   Berbeda dengan pestisida sintetis, agen biokontrol tidak menghasilkan residu toksik pada hasil panen. Hal ini menjadikan produk pertanian lebih aman untuk dikonsumsi serta memenuhi standar keamanan pangan, terutama pada sistem pertanian organik (Agrios, 2005).
3) Aman bagi manusia dan organisme non-target

   Mikroorganisme biokontrol umumnya memiliki tingkat spesifisitas yang tinggi terhadap patogen atau hama tertentu. Dengan demikian, penggunaannya relatif tidak membahayakan manusia, hewan ternak, maupun organisme menguntungkan seperti musuh alami dan serangga penyerbuk (Compant *et al*., 2005).
4) Meningkatkan kualitas tanah

Selain berperan dalam pengendalian patogen, beberapa mikroorganisme juga berkontribusi dalam memperbaiki sifat fisik, kimia, dan biologi tanah. Aktivitas seperti dekomposisi bahan organik dan peningkatan populasi mikroba tanah dapat meningkatkan ketersediaan unsur hara bagi tanaman (Glick, 2012).

5) Mendukung sistem pertanian berkelanjutan

Penggunaan agen biokontrol sejalan dengan konsep pengendalian hama terpadu (PHT) yang mengedepankan keseimbangan ekosistem. Dengan mengurangi ketergantungan pada pestisida kimia, sistem produksi menjadi lebih berkelanjutan dan ramah lingkungan (Cook & Baker, 1983).

6) Berpotensi meningkatkan pertumbuhan tanaman

Beberapa mikroorganisme berfungsi sebagai pemacu pertumbuhan tanaman (plant growth-promoting microorganisms), misalnya melalui produksi hormon seperti auksin dan giberelin, serta peningkatan penyerapan unsur hara. Hal ini menunjukkan bahwa perannya tidak hanya terbatas pada pengendalian patogen, tetapi juga dalam meningkatkan produktivitas tanaman (Glick, 2012).

Berbagai keunggulan tersebut menunjukkan bahwa agen biokontrol memiliki peran ganda, yaitu sebagai pengendali patogen sekaligus pendukung kesehatan tanaman dan tanah. Namun demikian, penerapannya tidak terlepas dari berbagai kendala yang perlu diperhatikan.

6.3.2 Keterbatasan

Di samping manfaat yang ditawarkan, penggunaan agen biokontrol juga menghadapi beberapa keterbatasan yang dapat memengaruhi efektivitasnya di lapangan, di antaranya:

1) Dipengaruhi oleh kondisi lingkungan

   Aktivitas dan kelangsungan hidup mikroorganisme sangat dipengaruhi oleh faktor lingkungan seperti suhu, kelembapan, pH tanah, serta ketersediaan bahan organik. Kondisi yang tidak sesuai dapat menghambat pertumbuhan mikroorganisme sehingga efektivitas pengendalian menjadi menurun (Lantang & Mawardi, 2022)

2) Efek pengendalian tidak instan

   Agen biokontrol bekerja melalui proses biologis yang memerlukan waktu, seperti kolonisasi dan produksi metabolit. Oleh karena itu, efek pengendalian tidak secepat pestisida kimia dan lebih efektif jika digunakan sebagai langkah pencegahan (Agrios, 2005).

3) Memerlukan teknik aplikasi yang tepat

   Keberhasilan penggunaan sangat bergantung pada metode aplikasi yang digunakan, termasuk dosis, waktu, dan cara aplikasi. Ketidaktepatan dalam penerapan dapat menyebabkan mikroorganisme tidak berkembang secara optimal di lingkungan target (Compant *et al*., 2005).

4) Stabilitas produk relatif terbatas

   Karena berupa organisme hidup, agen biokontrol memiliki keterbatasan dalam hal penyimpanan dan umur simpan. Penurunan viabilitas dapat terjadi apabila kondisi penyimpanan tidak sesuai, sehingga memengaruhi kualitas produk saat diaplikasikan (Muliani *et al*., 2022).

5) Spektrum kerja cenderung spesifik

Agen biokontrol umumnya hanya efektif terhadap patogen atau hama tertentu. Meskipun hal ini menguntungkan dari sisi keamanan lingkungan, namun menjadi kendala ketika terdapat banyak jenis patogen di lapangan, sehingga diperlukan pendekatan kombinasi (Cook & Baker, 1983; Shidqi & Ferdiansyah, 2026).

6) Membutuhkan pemahaman teknis

Penggunaan agen biokontrol memerlukan pengetahuan yang memadai mengenai jenis mikroorganisme, mekanisme kerja, serta teknik aplikasinya. Tanpa pemahaman yang baik, efektivitas pengendalian dapat menjadi kurang optimal (Shah & Pell, 2003).

Secara keseluruhan, keunggulan dan keterbatasan agen biokontrol menunjukkan bahwa pendekatan ini memerlukan strategi penerapan yang tepat dan terintegrasi. Dengan mempertimbangkan kondisi lingkungan serta teknik aplikasi yang sesuai, agen biokontrol dapat menjadi solusi yang efektif dan berkelanjutan dalam pengendalian organisme pengganggu tanaman.

6.4 Aplikasi Agen Biokontrol dalam Pertanian

Penerapan mikroorganisme sebagai agen biokontrol di lapangan tidak hanya bergantung pada jenis mikroba yang digunakan, tetapi juga dipengaruhi oleh metode aplikasi, waktu penggunaan, serta kesesuaian dengan kondisi lingkungan. Strategi aplikasi yang tepat dapat meningkatkan keberhasilan kolonisasi mikroorganisme, memperkuat interaksi dengan tanaman, serta memaksimalkan kemampuan dalam menekan organisme pengganggu tanaman (OPT). Dalam praktiknya, agen biokontrol lebih

efektif digunakan sebagai tindakan pencegahan dibandingkan pengendalian setelah serangan terjadi, karena mikroorganisme memerlukan waktu untuk beradaptasi, berkembang, dan membentuk populasi yang stabil (Clarholm, 1985; Glick, 2012).

Berbagai metode aplikasi telah dikembangkan untuk memastikan bahwa mikroorganisme dapat mencapai target secara optimal. Pemilihan metode tersebut harus disesuaikan dengan jenis tanaman, fase pertumbuhan, serta karakteristik patogen yang akan dikendalikan (Hanifa *et al*., 2025; Suganda & Widiastuti, 2025).. Beberapa metode aplikasi agen biokontrol yang umum digunakan adalah sebagai berikut.

1) Perlakuan benih (*seed treatment*)

Metode perlakuan benih dilakukan dengan cara melapisi atau merendam benih menggunakan suspensi mikroorganisme sebelum penanaman. Cara ini memungkinkan agen biokontrol mulai berkolonisasi sejak awal pertumbuhan tanaman, terutama pada daerah perakaran. Mikroorganisme yang berkembang lebih awal akan lebih mudah bersaing dengan patogen di sekitar benih dan akar tanaman sehingga dapat membantu menjaga kesehatan tanaman sejak fase perkecambahan. Beberapa manfaat dari metode ini antara lain:

a) Meningkatkan perlindungan terhadap patogen tular benih dan tanah,
b) Mempercepat kolonisasi mikroorganisme di rizosfer,
c) Mendukung pertumbuhan awal tanaman melalui produksi hormon dan peningkatan penyerapan nutrisi,
d) Meningkatkan daya kecambah dan vigor benih,
e) Membantu pertumbuhan akar menjadi lebih baik, serta

f) Mengurangi risiko serangan penyakit pada fase awal pertumbuhan tanaman.

Perlakuan benih dianggap efektif karena mampu memberikan peluang bagi mikroorganisme untuk berkembang lebih cepat dibandingkan patogen pada fase awal pertumbuhan tanaman (Agrios, 2005).

2) Aplikasi melalui tanah (*soil application*)

Aplikasi Agen biokontrol juga dapat diaplikasikan langsung ke tanah dengan cara mencampurkannya ke media tanam atau melalui penyiraman di sekitar akar tanaman. Metode ini bertujuan meningkatkan populasi mikroorganisme menguntungkan di daerah rizosfer sehingga hubungan antara akar tanaman dan mikroorganisme dapat berlangsung lebih baik. Keberadaan mikroorganisme di sekitar akar membantu menciptakan lingkungan tanah yang lebih sehat dan mendukung pertumbuhan tanaman. Melalui aplikasi tanah, agen biokontrol dapat memiliki manfaat sebagai berikut:

a) Mengoptimalkan interaksi antara mikroorganisme dan akar tanaman,
b) Menekan patogen tular tanah secara langsung,
c) Meningkatkan aktivitas biologis tanah dan kesuburannya,
d) Membantu memperbaiki struktur tanah,
e) Meningkatkan ketersediaan dan penyerapan unsur hara bagi tanaman, serta
f) Mendukung pertumbuhan akar dan perkembangan tanaman secara lebih optimal.

Keberhasilan metode ini sangat dipengaruhi oleh kondisi lingkungan, terutama kelembapan tanah dan kandungan bahan organik, karena faktor-faktor tersebut berperan penting terhadap keberlangsungan hidup mikroorganisme (Glick, 2012).

3) Aplikasi melalui daun (*foliar application*)

Selain melalui benih dan tanah, agen biokontrol dapat diaplikasikan pada bagian daun melalui penyemprotan suspensi mikroorganisme. Metode ini digunakan untuk mengendalikan patogen yang menyerang bagian atas tanaman. Mikroorganisme yang berada di permukaan daun dapat membantu melindungi jaringan tanaman dari perkembangan patogen sekaligus menjaga kondisi daun tetap sehat selama pertumbuhan tanaman berlangsung. Manfaat dari aplikasi daun meliputi:

a) Menghambat perkembangan patogen pada permukaan daun,
b) Membentuk lapisan pelindung biologis (biological barrier)
c) Memicu ketahanan lokal pada jaringan tanaman
d) Membantu menjaga kesehatan dan kehijauan daun,
e) Mengurangi risiko penyebaran penyakit pada bagian tajuk tanaman, serta
f) Mendukung proses fotosintesis melalui kondisi daun yang lebih sehat.

Keberhasilan aplikasi daun sangat bergantung pada kondisi lingkungan, terutama kelembapan dan intensitas cahaya, karena dapat memengaruhi daya hidup mikroorganisme di permukaan daun (Pieterse *et al*., 2014)

4) Aplikasi melalui sistem irigasi (fertigasi/irigasi tetes)

Agen biokontrol juga dapat diaplikasikan melalui sistem irigasi, terutama pada budidaya skala luas. Metode ini memanfaatkan aliran air untuk mendistribusikan mikroorganisme ke area perakaran

tanaman secara lebih merata. Penggunaan sistem irigasi membuat proses aplikasi menjadi lebih praktis dan efisien, terutama pada lahan pertanian modern yang menggunakan teknologi irigasi tetes atau fertigasi. Beberapa keuntungan dari metode ini adalah:.

a) Memungkinkan distribusi mikroorganisme secara efisien dan merata
b) Menghemat tenaga dan waktu aplikasi
c) Cocok diterapkan pada sistem pertanian modern dan intensif
d) Membantu menjaga ketersediaan mikroorganisme di sekitar daerah perakaran
e) Meningkatkan efisiensi penggunaan air dan agen biokontrol
f) Mempermudah aplikasi pada areal pertanian yang luas

Namun, metode ini memerlukan formulasi mikroorganisme yang stabil agar tetap aktif selama proses distribusi melalui air (Compant *et al*., 2005).

Secara keseluruhan, keberhasilan aplikasi agen biokontrol sangat ditentukan oleh integrasi antara jenis mikroorganisme, metode aplikasi, serta kondisi lingkungan. Pendekatan yang bersifat preventif, dilakukan sejak awal pertumbuhan tanaman, terbukti lebih efektif dibandingkan tindakan kuratif setelah serangan terjadi. Oleh karena itu, penggunaan agen biokontrol sebaiknya menjadi bagian dari strategi pengelolaan terpadu dalam sistem pertanian berkelanjutan.

DAFTAR PUSTAKA

Agrios, G. N. (2005). *Plant pathology*. Elsevier.

Amaria, W., Kasim, N. N., & Munif, A. (2019). Kelimpahan populasi bakteri filosfer, rizosfer, dan endofit tanaman kemiri sunan (Reutealis Trisperma (Blanco) Airy Shaw), serta potensinya sebagai agens biokontrol. *Journal TABARO Agriculture Science*, *3*(1), 305-â.

Clarholm, M. (1985). Interactions of bacteria, protozoa and plants leading to mineralization of soil nitrogen. *Soil Biology and Biochemistry*, *17*(2), 181–187.

Compant, S., Duffy, B., Nowak, J., Clément, C., & Barka, E. A. (2005). Use of plant growth-promoting bacteria for biocontrol of plant diseases: principles, mechanisms of action, and future prospects. *Applied and Environmental Microbiology*, *71*(9), 4951–4959.

Cook, R. J., & Baker, K. F. (1983). *The nature and practice of biological control of plant pathogens.*

Djaenuddin, N. (2020). *Induksi Ketahanan Tanaman oleh Bakteri Rizosfer dan Asam Salisilat terhadap Penyakit Bulai pada Jagung*. Universitas Hasanuddin.

Elfina, Y., Sukendi, S., Efriyeldi, E., & Sutikno, A. (2024). Uji Kemampuan Bacillus spp. dalam Menghambat Ganoderma boninense Pat. Penyebab Penyakit Busuk Pangkal Batang Kelapa Sawit Secara in Vitro. *Agro Bali: Agricultural Journal*, *7*(2), 575–590.

Glick, B. R. (2012). Plant growth-promoting bacteria: mechanisms and applications. *Scientifica*, *2012*(1), 963401.

Hanifa, A. P., Heryanto, R., Negara, S. P. P. S., Sari, D., Sirappa, M. P., Ryadin, A. R., Mahmud, S. A., Soelistijono, R., &

Muazam, A. (2025). *Patologi tanaman*. Kamiya Jaya Aquatic.

Jumadi, O., & Caronge, W. (2021). Trichoderma dan pemanfaatan. *Penerbit Jurusan Biologi Fmipa Unm Kampus Unm Parang Tambung Jalan Malengkeri Raya. Makassar*.

Khairiyah, Y., Putri, D. A. L. P., Firlandiana, M., & Putra, G. M. (2026). *Biologi Tanah Untuk Ilmu Pertanian Dan Lingkungan*. Cv Get Press Indonesia.

Lantang, D., & Mawardi, A. (2022). *Biokontrol*. Samudra Biru.

Moscardi, F. (1999). Assessment of the application of baculoviruses for control of Lepidoptera. *Annual Review of Entomology*, *44*(1), 257–289.

Muliani, I. Y., MP, R. R. S., & TP, S. (2022). *Agensia Pengendali Hayati*. CV Jejak (Jejak Publisher).

Nouriza, A. P. (2024). *Potensi Biokontrol Isolat Trichoderma Sp.(T14 Dan T7834) Sebagai Antipatogen Jamur Phytopthora Sp. Dan Collettrichum Sp. Secara In Vitro*.

Pieterse, C. M. J., Zamioudis, C., Berendsen, R. L., Weller, D. M., Van Wees, S. C. M., & Bakker, P. A. H. M. (2014). Induced systemic resistance by beneficial microbes. *Annual Review of Phytopathology*, *52*(1), 347–375.

Raaijmakers, J. M., Vlami, M., & De Souza, J. T. (2002). Antibiotic production by bacterial biocontrol agents. *Antonie van Leeuwenhoek*, *81*(1), 537–547.

Setiaji, A., Annisa, R. R. R., & Rahmandhias, D. T. (2023). Bakteri Bacillus sebagai agen kontrol hayati dan biostimulan tanaman. *Rekayasa*, *16*(1), 96–106.

SETIAWAN, F. (2022). *Isolasi Dan Karakterisasi Senyawa Bioaktif Hasil Fermentasi Aktinomisetes Asosiasi Biota Laut Sebagai Fungisida*. UNIVERSITAS LAMPUNG.

Shah, P. A., & Pell, J. K. (2003). Entomopathogenic fungi as biological control agents. *Applied Microbiology and Biotechnology*, *61*(5), 413–423.

Shidqi, M. T., & Ferdiansyah, D. (2026). Biokontrol Berbasis Bakteri Dan Pengembangan Media Kultur Alami Dalam Akuakultur. Dunia Penerbitan buku.

Sopialena, S. (2022). Uji Efektivitas Jamur Metarhizium Anisoplae Dan Beauveria Bassiana Bals Lokal Dan Komerisial Terhadap Hama Kutu Daun (Aphis Craccivora) Pada Tanaman Kacang Panjang (Vigna Sinensis L.). *Agrifor: Jurnal Ilmu Pertanian Dan Kehutanan*, *21*(1), 147–160.

Sriwati, R. (2017). *Trichoderma: Si Agen Antagonis*. Syiah Kuala University Press.

Suganda, T., & Widiastuti, A. (2025). *Optimalisasi Pengelolaan Fungisida dalam Penanganan Resistensi Jamur Patogen Tanaman*. Penerbit Andi.

Zai, W. A. N., & Lase, N. K. (2025). Peran Mikroorganisme dalam Peningkatan Kesuburan Tanah dan Produktivitas Pertanian: Kajian Literatur. *Hidroponik: Jurnal Ilmu Pertanian Dan Teknologi Dalam Ilmu Tanaman*, *2*(1), 19–28.

Zakiah, S. (2025). *Pengaruh Aplikasi Priming Dan Penyemprotan Zn Dan/Atau Agensia Hayati Aktinomisetes Untuk Pengendalian Penyakit Bulai Pada Jagung (Zea Mays L.)*. Universitas Lampung.

BAB 7

MIKROORGANISME ENDOFITIK DAN FILOSFER

Oleh Mieke Rochimi Setiawati

Mikroorganisme merupakan komponen penting dalam ekosistem tanaman karena berperan dalam berbagai proses biologis yang menentukan kesehatan dan produktivitas tanaman. Mikroorganisme dapat ditemukan pada daerah perakaran, jaringan internal tanaman, maupun permukaan organ tanaman seperti daun dan batang (Compant *et al.,* 2010).

Interaksi antara tanaman dan mikroorganisme telah berkembang melalui proses evolusi yang panjang sehingga membentuk hubungan ekologis yang kompleks dan dinamis. Hubungan tersebut dapat bersifat mutualistik, komensal, maupun patogenik tergantung kondisi lingkungan dan jenis organisme yang terlibat (Bulgarelli *et al*., 2013).

Perhatian terhadap mikroorganisme yang berasosiasi dengan tanaman meningkat seiring berkembangnya konsep pertanian berkelanjutan yang menekankan pengurangan penggunaan bahan kimia sintetis dan peningkatan pemanfaatan sumber daya hayati (Backer *et al*., 2018).

Di antara berbagai kelompok mikroorganisme yang berasosiasi dengan tanaman, mikroorganisme endofitik dan filosfer menjadi dua kelompok yang banyak dipelajari karena

memiliki potensi besar dalam meningkatkan kesehatan tanaman dan produktivitas pertanian (Lindow & Brandl, 2003).

Mikroorganisme endofitik hidup di dalam jaringan tanaman tanpa menyebabkan gejala penyakit pada tanaman inangnya. Mikroorganisme ini diketahui mampu meningkatkan pertumbuhan tanaman melalui produksi fitohormon, fiksasi nitrogen, dan pelarutan fosfat (Ryan *et al*., 2008). Selain meningkatkan pertumbuhan tanaman, mikroorganisme endofitik juga mampu menghasilkan metabolit sekunder yang berfungsi dalam perlindungan tanaman terhadap patogen dan cekaman lingkungan (Hardoim *et al*., 2015).

Sementara itu, mikroorganisme filosfer hidup pada permukaan daun dan organ udara tanaman lainnya. Habitat filosfer merupakan lingkungan yang unik karena mengalami fluktuasi suhu, kelembapan, dan radiasi ultraviolet yang tinggi (Vorholt, 2012). Mikroorganisme filosfer memiliki kemampuan adaptasi yang tinggi terhadap kondisi lingkungan tersebut dan berperan dalam menjaga keseimbangan mikrobiologis pada permukaan daun (Lindow & Leveau, 2002).

Perkembangan teknologi biologi molekuler dan metagenomik telah membuka peluang besar dalam memahami keanekaragaman serta fungsi komunitas mikroorganisme pada tanaman. Teknologi tersebut memungkinkan identifikasi mikroorganisme yang sebelumnya sulit dikultur menggunakan metode konvensional (Berendsen *et al*., 2012). Pemanfaatan mikroorganisme endofitik dan filosfer sebagai pupuk hayati, agen pengendali hayati, dan bio-stimulan tanaman diharapkan dapat mendukung pengembangan sistem pertanian yang lebih produktif dan ramah lingkungan (Vessey, 2003).

Mikroorganisme endofitik merupakan mikroorganisme yang hidup di dalam jaringan tanaman selama sebagian atau seluruh siklus hidupnya tanpa menyebabkan gejala penyakit pada tanaman inang (Hallmann *et al*., 1997).

Istilah endofit berasal dari bahasa Yunani, yaitu "endon" yang berarti di dalam dan "phyton" yang berarti tumbuhan. Endofit mencakup berbagai kelompok mikroorganisme seperti bakteri, fungi, dan aktinomiset yang berkolonisasi pada jaringan tanaman (Stone *et al*., 2000). Mikroorganisme endofitik dapat ditemukan pada akar, batang, daun, bunga, buah, hingga biji tanaman. Keberadaan mikroorganisme ini dipengaruhi oleh jenis tanaman, umur tanaman, dan kondisi lingkungan (Santoyo *et al*., 2016).

Berbeda dengan endofit, mikroorganisme filosfer hidup pada permukaan organ udara tanaman, terutama daun. Filosfer merupakan salah satu habitat mikroba terbesar di bumi karena luas permukaan daun yang sangat besar (Lindow & Brandl, 2003). Komunitas mikroorganisme filosfer terdiri atas bakteri, jamur, khamir (*yeast*), dan mikroalga yang mampu bertahan hidup pada lingkungan yang miskin nutrisi dan mengalami tekanan lingkungan tinggi (Vorholt, 2012). Sebagian besar mikroorganisme filosfer bersifat epifit, yaitu hidup menempel pada permukaan tanaman tanpa memasuki jaringan internal tanaman (Leveau, 2006).

Ruang lingkup kajian mikroorganisme endofitik dan filosfer mencakup aspek ekologi, fisiologi, genetika, dan interaksi mikroba dengan tanaman serta lingkungannya (Bulgarelli *et al*., 2013). Kajian tersebut juga meliputi mekanisme kolonisasi, adaptasi lingkungan, komunikasi antar mikroorganisme, dan peran mikroba dalam mendukung kesehatan tanaman (Hardoim *et al*., 2015).

Dalam bidang pertanian, mikroorganisme endofitik dan filosfer dipelajari karena potensinya sebagai pupuk hayati, agen pengendali hayati, dan biofertilizer untuk meningkatkan

produktivitas tanaman secara berkelanjutan (Backer *et al*., 2018) Perkembangan teknologi molekuler seperti PCR, sequencing 16S rRNA, dan metagenomik telah memperluas pemahaman mengenai keragaman dan fungsi komunitas mikroorganisme tanaman yang sebelumnya sulit diamati secara konvensional (Berendsen *et al*., 2012).

Kajian mengenai mikroorganisme endofitik dan filosfer menjadi semakin penting seiring meningkatnya kebutuhan terhadap sistem pertanian yang ramah lingkungan dan berkelanjutan (Backer *et al*., 2018). Penggunaan pupuk dan pestisida kimia secara intensif dalam jangka panjang diketahui dapat menyebabkan degradasi tanah, pencemaran lingkungan, dan penurunan keanekaragaman hayati mikroorganisme tanah (Tilman *et al*., 2002).

Mikroorganisme endofitik dan filosfer memiliki potensi besar sebagai alternatif biologis untuk mengurangi ketergantungan terhadap input kimia sintetis dalam pertanian modern (Compant *et al*., 2005). Berbagai penelitian menunjukkan bahwa mikroorganisme endofitik mampu meningkatkan pertumbuhan tanaman melalui produksi hormon tumbuh seperti indole acetic acid (IAA), pelarutan fosfat, dan fiksasi nitrogen biologis (Ryan *et al*., 2008).

Selain itu, beberapa mikroorganisme endofitik menghasilkan metabolit sekunder yang mampu menghambat perkembangan patogen tanaman melalui mekanisme antibiosis maupun kompetisi ruang dan nutrisi (Hardoim *et al*., 2015). Mikroorganisme tertentu juga mampu menginduksi resistensi sistemik tanaman terhadap penyakit melalui mekanisme *Induced Systemic Resistance* (ISR) sehingga tanaman menjadi lebih tahan terhadap serangan patogen (Pieterse *et al*., 2014).

Dalam kondisi perubahan iklim global, tanaman sering mengalami cekaman abiotik seperti kekeringan, suhu ekstrem, dan salinitas tinggi. Mikroorganisme endofitik

diketahui mampu meningkatkan toleransi tanaman terhadap kondisi tersebut (Naylor *et al.*, 2017). Kajian mikroorganisme filosfer juga memiliki urgensi tinggi karena permukaan daun merupakan tempat pertama interaksi tanaman dengan lingkungan atmosfer dan berbagai mikroorganisme patogen udara (Vorholt, 2012).

Dari sisi ekonomi, pengembangan produk berbasis mikroorganisme seperti pupuk hayati dan biofungisida dapat meningkatkan efisiensi penggunaan input pertanian serta mengurangi biaya produksi petani. Dengan demikian, penelitian mengenai mikroorganisme endofitik dan filosfer memiliki nilai strategis dalam mendukung pengembangan pertanian modern yang produktif, sehat, dan berkelanjutan.

7.1 Mikroorganisme Endofitik

7.1.1 Pengertian dan Karakteristik Mikroorganisme Endofitik

Mikroorganisme endofitik merupakan mikroorganisme yang hidup dan berkolonisasi di dalam jaringan tanaman tanpa menyebabkan gejala penyakit pada tanaman inangnya selama sebagian atau seluruh siklus hidupnya (Hallmann *et al*., 1997). Mikroorganisme ini dapat ditemukan pada berbagai jaringan tanaman seperti akar, batang, daun, bunga, buah, dan biji.

Istilah endofit pertama kali digunakan untuk menggambarkan organisme yang hidup di dalam jaringan tanaman. Seiring perkembangan ilmu mikrobiologi, definisi endofit berkembang mencakup bakteri, fungi, dan aktinomiset yang membentuk hubungan ekologis tertentu dengan tanaman inang (Stone *et al*., 2000).

Sebagian besar mikroorganisme endofitik bersifat mutualistik, yaitu memberikan keuntungan bagi tanaman dan sekaligus memperoleh nutrisi serta habitat dari tanaman inang. Namun demikian, beberapa mikroorganisme endofitik juga dapat bersifat laten patogen tergantung kondisi fisiologis tanaman dan lingkungan (Hardoim *et al*., 2015).

Mikroorganisme endofitik memiliki kemampuan untuk masuk dan bertahan di dalam jaringan tanaman tanpa memicu respons pertahanan yang merugikan bagi tanaman. Kemampuan tersebut menunjukkan adanya proses adaptasi dan komunikasi molekuler antara mikroorganisme dan tanaman inang (Compant *et al*., 2010). Bakteri endofitik merupakan kelompok mikroorganisme endofitik yang paling banyak dipelajari. Kelompok ini meliputi berbagai genus seperti *Bacillus*, *Pseudomonas*, *Azospirillum*, *Enterobacter*, dan *Burkholderia* yang diketahui memiliki kemampuan meningkatkan pertumbuhan tanaman (Ryan *et al*., 2008).

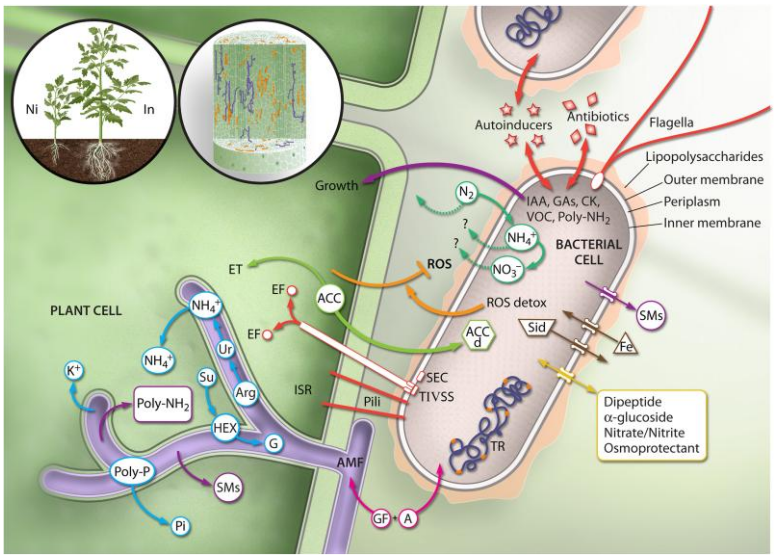
Selain bakteri, fungi endofitik juga banyak ditemukan pada tanaman. Fungi endofitik diketahui mampu menghasilkan metabolit sekunder bioaktif yang berperan dalam perlindungan tanaman terhadap cekaman biotik maupun abiotik (Rodriguez *et al*., 2009). Karakteristik utama mikroorganisme endofitik adalah kemampuannya hidup secara internal tanpa menyebabkan kerusakan jaringan tanaman. Berbeda dengan patogen, endofit mampu mempertahankan keseimbangan hubungan dengan tanaman sehingga tidak menimbulkan gejala penyakit (Hallmann *et al*., 1997).

Mikroorganisme endofitik juga memiliki kemampuan menghasilkan berbagai senyawa biologis

seperti hormon tumbuh, siderofor, antibiotik, dan enzim hidrolitik. Senyawa-senyawa tersebut berperan penting dalam meningkatkan kesehatan tanaman dan menghambat perkembangan patogen (Santoyo *et al*., 2016). Hardoim *et al*. (2015) menggambarkan adanya pertukaran nutrisi yang menguntungkan dari endofit bakteri dan jamur (mikoriza) ke tanaman setelah mikroorganisme tersebut mengkolonisasi jaringan tanaman. Sumber karbon (sukrosa) yang diserap oleh arbuskula mikoriza ditukar dengan fosfat (Pi), nitrogen (NH_4^+), kalium (K^+). Sukrosa sitoplasma tanaman diangkut ke ruang periarbuskular, kemudian diubah menjadi heksosa untuk diasimilasi oleh jamur (Gambar 7.1).

Heksosa akhirnya diubah menjadi glikogen untuk transportasi jarak jauh. Fosfat dan nitrogen diangkut di dalam sitoplasma jamur sebagai butiran polifosfat (Poli-P), yang diubah menjadi Pi dan arginin (Arg) di arbuskula. Pi diangkut ke sitoplasma inang, sedangkan Arg awalnya diubah menjadi urea (Ur) dan kemudian menjadi ammonium (NH_4^+). Hormon tanaman yang dikeluarkan jamur dan bakteri, seperti auksin (IAA), giberelin (GAs), sitokinin (CKs), senyawa organik yang mudah menguap (VOCs), dan poliamina (Poli-NH_2), serta metabolit sekunder (SMs), ditransfer ke inang. Berbagai struktur bakteri, seperti flagela, pili, sistem sekresi (misalnya, TIV SS dan SEC), dan lipopolisakarida, serta protein dan molekul yang berasal dari bakteri, seperti efektor (EF), autoinduser, dan antibiotik, dideteksi oleh sel inang dan memicu respons resistensi sistemik terinduksi (ISR). ACC, prekursor etilen (ET), langsung dimetabolisme oleh bakteri melalui enzim ACC deaminase (ACCd), sehingga memperbaiki stres abiotik. Berbagai detoksifikasi spesies oksigen reaktif enzim (ROS detoks) juga dapat memperbaiki stres yang

disebabkan oleh tanaman. Bakteri endofit diazotrofik mampu memfiksasi nitrogen di atmosfer (N_2) dan mungkin secara aktif mengangkut NH_4^+ dan nitrat (NO_3^-) ke inang. Berbagai proses yang dilakukan bakteri di dalam jaringan tanaman melibatkan produksi siderofor (Sid) dan serapan (Fe) yang terlibat dalam pemacu pertumbuhan tanaman, biokontrol, dan fitoremediasi serta berbagai substrat tempat transmembran protein yang diperkaya endofit juga regulator transkripsional (TR). Komunikasi dan interaksi antara sel-sel mikroorganisme yang tinggal di dalam jaringan tanaman dipacu oleh faktor pertumbuhan (GF), antibiotik (A) dan molekul autoinduser (Hardoim *et al*., 2015).



Gambar 7. 1 Sifat Menguntungkan Dari Endofit. Kiri Atas Tanaman Yang Diinokulasi (In) Mikroorganisme Bermanfaat Yang Secara Signifikan Meningkatkan Pertumbuhan Tanaman Dibandingkan Dengan Tanaman Yang Tidak Diinokulasi (Ni). Berbagai Mikroorganisme, Khususnya Bakteri (Warna Oranye) Dan Jamur (Ungu), Dapat Mengkolonisasi Jaringan

Internal Tanaman. Setelah Berada Di Dalam Tumbuhan, Bakteri Dan Jamur (Mikoriza) Endofit Berinteraksi Erat Dengan Sel Tumbuhan Dan Dengan Mikroorganisme Di Sekitarnya

Sumber: Hardoim *et al*., 2015

Keberadaan mikroorganisme endofitik dipengaruhi oleh faktor lingkungan, jenis tanaman, umur tanaman, dan kondisi fisiologis tanaman. Setiap tanaman memiliki komunitas endofitik yang berbeda sesuai karakteristik genetik dan habitatnya (Bulgarelli *et al*., 2013). Dalam bidang pertanian, mikroorganisme endofitik menjadi perhatian penting karena potensinya sebagai pupuk hayati, agen pengendali hayati, dan bio-stimulan tanaman. Pemanfaatan mikroorganisme tersebut diharapkan mampu mendukung sistem pertanian yang lebih berkelanjutan dan ramah lingkungan (Backer *et al*., 2018).

7.1.2 Habitat dan Distribusi Endofit pada Tanaman

Mikroorganisme endofitik dapat ditemukan hampir pada seluruh bagian tanaman, mulai dari akar hingga biji. Distribusi mikroorganisme tersebut dipengaruhi oleh kondisi lingkungan mikro pada masing-masing jaringan tanaman (Hardoim *et al*., 2015).

Akar merupakan habitat utama mikroorganisme endofitik karena bagian ini berhubungan langsung dengan tanah sebagai sumber utama mikroorganisme. Eksudat akar yang kaya senyawa organik mendukung kolonisasi dan pertumbuhan mikroorganisme endofitik (Compant *et al*., 2010). Mikroorganisme endofitik akar umumnya berasal dari rizosfer yang berhasil memasuki jaringan tanaman melalui celah alami atau luka pada akar. Setelah memasuki jaringan tanaman,

mikroorganisme dapat menyebar secara sistemik ke bagian tanaman lainnya (Hallmann *et al*., 1997).

Batang tanaman juga menjadi habitat penting bagi mikroorganisme endofitik. Kondisi internal batang menyediakan lingkungan yang relatif stabil dengan ketersediaan nutrisi yang mendukung pertumbuhan mikroorganisme tertentu (Santoyo *et al.*, 2016).

Pada jaringan daun, mikroorganisme endofitik hidup di ruang antar sel maupun jaringan vaskuler tanaman. Mikroorganisme tersebut berinteraksi secara langsung dengan metabolisme tanaman dan dapat memengaruhi fisiologi daun (Vorholt, 2012). Biji tanaman diketahui menjadi media transmisi vertikal mikroorganisme endofitik dari tanaman induk ke generasi berikutnya. Endofit yang terdapat pada biji berperan penting dalam mendukung perkecambahan dan vigor awal tanaman (Nelson, 2018).

Distribusi mikroorganisme endofitik berbeda pada setiap spesies tanaman. Faktor genetik tanaman berperan dalam menentukan jenis dan komposisi komunitas mikroorganisme yang mampu berkolonisasi pada jaringan tanaman tertentu (Bulgarelli *et al*., 2013). Selain faktor genetik tanaman, kondisi lingkungan seperti suhu, kelembapan, pH tanah, dan praktik budidaya juga memengaruhi distribusi mikroorganisme endofitik (Compant *et al*., 2010).

Umur tanaman turut menentukan keragaman dan populasi endofit. Pada fase pertumbuhan tertentu, tanaman menghasilkan senyawa metabolit yang berbeda sehingga memengaruhi kolonisasi mikroorganisme di dalam jaringan tanaman (Hardoim *et al*., 2015). Pemahaman mengenai habitat dan distribusi mikroorganisme endofitik penting dalam pengembangan teknologi inokulan mikroba untuk

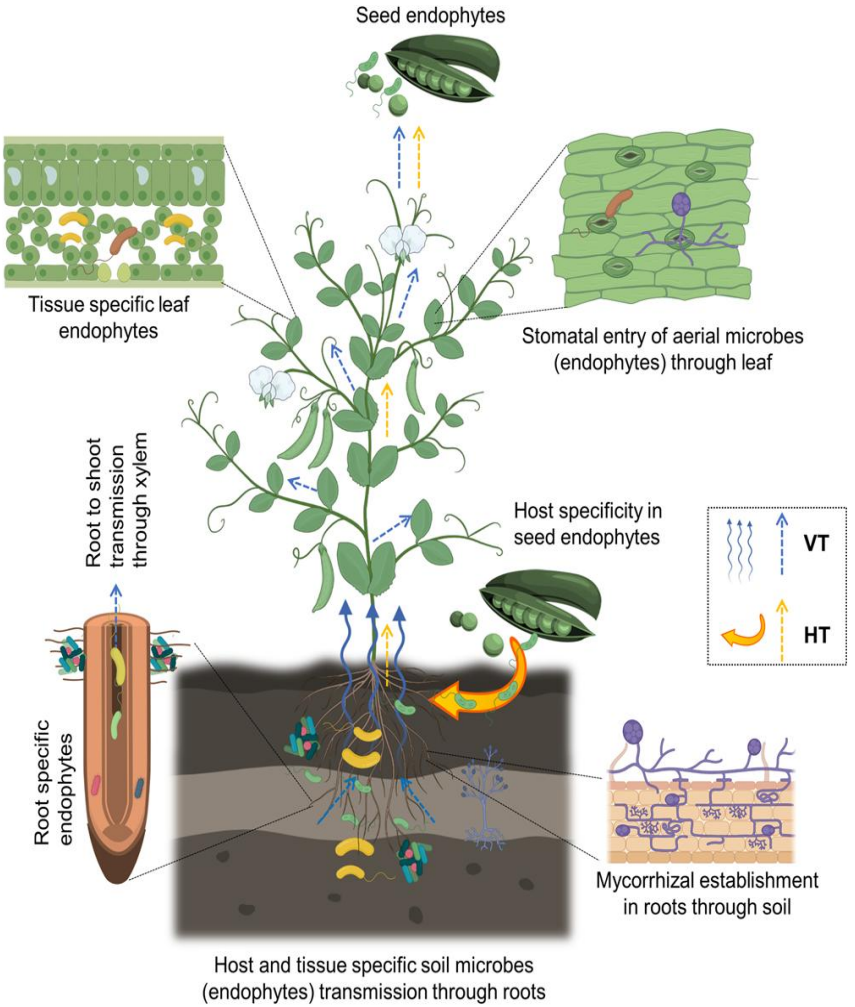
pertanian. Informasi tersebut membantu menentukan strategi aplikasi mikroorganisme yang lebih efektif pada tanaman budidaya (Backer *et al*., 2018).

7.1.3 Mekanisme Kolonisasi Endofit

Kolonisasi mikroorganisme endofitik pada tanaman merupakan proses kompleks yang melibatkan interaksi biologis antara mikroorganisme dan jaringan tanaman inang (Hardoim *et al*., 2015). Proses kolonisasi menentukan keberhasilan mikroorganisme bertahan hidup dan menjalankan fungsinya di dalam tanaman. Mikroorganisme harus mampu mengenali sinyal kimia tanaman sebelum memasuki jaringan inang. Oleh karena itu, kolonisasi menjadi tahap penting dalam hubungan simbiosis antara tanaman dan endofit.

Tahap awal kolonisasi endofit dimulai dengan perlekatan mikroorganisme pada permukaan akar, batang, daun, atau biji tanaman (Compant *et al*., 2010). Mikroorganisme memanfaatkan senyawa eksudat tanaman sebagai sumber nutrisi dan sinyal kimia untuk mendekati jaringan tanaman. Permukaan akar menjadi lokasi utama kolonisasi karena kaya akan eksudat organik seperti gula, asam amino, dan asam organik. Kondisi tersebut menciptakan lingkungan yang mendukung pertumbuhan mikroorganisme endofitik.

Eksudat akar memainkan peran penting dalam menarik mikroorganisme endofitik menuju permukaan tanaman (Bulgarelli *et al*., 2013). Senyawa kimia yang dikeluarkan akar berfungsi sebagai chemoattractant bagi bakteri dan fungi tertentu. Selain menyediakan nutrisi, eksudat akar membantu membentuk komunikasi awal antara tanaman dan mikroorganisme. Oleh karena itu, komposisi eksudat akar sangat memengaruhi keberhasilan kolonisasi mikroorganisme.



Gambar 7. 2 Interaksi Tumbuhan-Endofit. Endofit Terdapat Di Akar, Batang, Daun, Bunga, Buah Dan Biji. Endofit Masuk Ke Dalam Tanaman Terutama Melalui Akar Dan Stomata. Endofit Benih Berpotensi Dalam Penularan Ke Generasi Berikutnya

Sumber : Pandey *et al.*, 2022

Mikroorganisme endofitik memasuki jaringan tanaman melalui bukaan alami maupun luka pada permukaan tanaman (Hallmann *et al*., 1997). Celah stomata, lentisel, dan daerah munculnya akar lateral menjadi jalur utama masuknya mikroorganisme ke dalam tanaman. Selain itu, luka akibat aktivitas serangga atau kerusakan mekanis dapat mempermudah penetrasi mikroorganisme. Jalur masuk tersebut memungkinkan endofit mencapai jaringan internal tanaman tanpa merusak sel inang secara signifikan.

Beberapa mikroorganisme endofitik menghasilkan enzim hidrolitik untuk membantu penetrasi ke jaringan tanaman (Lodewyckx *et al*., 2002). Enzim seperti selulase, pektinase, dan hemiselulase membantu melonggarkan dinding sel tanaman sehingga mikroorganisme lebih mudah memasuki jaringan inang. Aktivitas enzim tersebut berlangsung secara terbatas sehingga tidak menyebabkan gejala penyakit pada tanaman. Dengan demikian, mikroorganisme tetap dapat hidup secara simbiotik di dalam jaringan tanaman.

Kemampuan motilitas membantu bakteri endofitik bergerak menuju lokasi kolonisasi yang sesuai di dalam tanaman (Compant *et al*., 2010). Banyak bakteri menggunakan flagela untuk bergerak mengikuti gradien senyawa kimia dari eksudat tanaman. Motilitas memungkinkan bakteri mencapai daerah akar yang aktif secara fisiologis. Hal ini meningkatkan peluang keberhasilan kolonisasi mikroorganisme pada jaringan tanaman.

Kolonisasi endofit dipengaruhi oleh kemampuan mikroorganisme menghindari sistem pertahanan tanaman (Hardoim *et al*., 2015). Tanaman memiliki mekanisme imun bawaan untuk mengenali dan menghambat mikroorganisme asing. Mikroorganisme

endofitik mampu menekan atau menghindari respons pertahanan tersebut sehingga dapat hidup di dalam jaringan tanaman tanpa memicu gejala penyakit. Interaksi ini menunjukkan adanya proses adaptasi evolusioner antara tanaman dan endofit.

Setelah berhasil memasuki tanaman, mikroorganisme endofitik dapat menyebar ke berbagai jaringan internal tanaman (Ryan *et al*., 2008). Mikroorganisme dapat ditemukan pada akar, batang, daun, bunga, bahkan biji tanaman. Penyebaran tersebut berlangsung melalui jaringan interseluler maupun sistem vaskular tanaman. Oleh karena itu, beberapa endofit mampu bertahan selama seluruh siklus hidup tanaman.

Padey *et al*., (2022) juga mengemukakan bahwa tanah merupakan sumber utama endofit spesifik untuk suatu tanaman tertentu (spesifisitas inang). Mikroorganisme endofit terdapat di berbagai bagian tanaman inang termasuk akar, batang, daun, bunga, buah dan biji. Endofit masuk ke dalam tanaman terutama dari akar tanaman dan menularkannya ke berbagai tempat bagian tumbuhan melalui xilem [transmisi vertikal]. Mikroorganisme endofit yang berada di udara juga dapat masuk ke dalam tanaman inang melalui stomata. Spesifisitas jaringan tanaman endofit merupakan atribut penting yang menentukan peran spesifik jaringan tanamannya. Endofit benih mempunyai potensi penting dalam penularannya ke generasi berikutnya [transmisi horizontal] (Gambar 2).

Kolonisasi mikroorganisme endofitik sangat dipengaruhi oleh faktor genetik tanaman inang (Müller *et al*., 2016). Setiap spesies tanaman memiliki kemampuan berbeda dalam memilih dan mempertahankan komunitas mikroorganisme tertentu.

Genotipe tanaman dapat memengaruhi komposisi eksudat dan respons imun terhadap mikroorganisme. Kondisi tersebut menyebabkan komunitas endofit berbeda pada setiap jenis tanaman.

Faktor lingkungan seperti suhu, pH, kelembapan, dan kondisi tanah juga memengaruhi keberhasilan kolonisasi endofit (Compant *et al*., 2010). Lingkungan yang sesuai membantu meningkatkan viabilitas dan aktivitas metabolik mikroorganisme. Sebaliknya, kondisi lingkungan ekstrem dapat menghambat pertumbuhan dan penyebaran endofit di dalam tanaman. Oleh karena itu, kolonisasi endofit merupakan hasil interaksi antara faktor biologis dan lingkungan.

Kolonisasi endofit yang berhasil memberikan berbagai manfaat fisiologis bagi tanaman inang (Santoyo *et al*., 2016). Mikroorganisme membantu meningkatkan penyerapan unsur hara, produksi fitohormon, dan ketahanan terhadap cekaman biotik maupun abiotik. Selain itu, beberapa endofit membantu meningkatkan toleransi tanaman terhadap kekeringan dan serangan patogen. Interaksi tersebut menjadikan endofit sebagai komponen penting dalam kesehatan tanaman.

Pemahaman mengenai mekanisme kolonisasi endofit sangat penting dalam pengembangan bioinokulan untuk pertanian berkelanjutan (Backer *et al*., 2018). Informasi tentang proses kolonisasi membantu peneliti memilih mikroorganisme dengan kemampuan adaptasi dan kolonisasi yang baik pada tanaman target. Selain itu, pemahaman tersebut mendukung pengembangan formulasi mikroba yang lebih efektif di lapangan. Dengan demikian, penelitian kolonisasi endofit memiliki nilai penting dalam pengembangan teknologi mikroba pertanian.

7.1.4 Keanekaragaman Mikroorganisme Endofitik

Keanekaragaman mikroorganisme endofitik sangat tinggi dan mencakup berbagai kelompok bakteri, fungi, dan aktinomiset yang hidup pada jaringan internal tanaman (Hardoim *et al*., 2015). Mikroorganisme tersebut ditemukan hampir pada semua jenis tanaman, baik tanaman pangan, hortikultura, kehutanan, maupun tanaman obat. Setiap spesies tanaman memiliki komunitas endofitik yang khas sesuai kondisi fisiologi dan lingkungannya. Keragaman ini menunjukkan bahwa tanaman merupakan habitat penting bagi berbagai mikroorganisme bermanfaat (Tabel 1).

Bakteri endofitik merupakan kelompok mikroorganisme endofitik yang paling banyak diteliti karena memiliki potensi besar dalam meningkatkan pertumbuhan tanaman (Ryan *et al*., 2008). Genus bakteri yang umum ditemukan antara lain *Bacillus*, *Pseudomonas*, *Azospirillum*, *Enterobacter*, dan *Burkholderia*. Bakteri tersebut diketahui mampu menghasilkan fitohormon, melarutkan fosfat, dan memfiksasi nitrogen biologis. Selain itu, beberapa spesies juga berperan sebagai agen pengendali hayati terhadap patogen tanaman.

Genus *Bacillus* merupakan kelompok bakteri endofitik yang penting karena memiliki kemampuan membentuk endospora dan menghasilkan berbagai metabolit bioaktif (Backer *et al*., 2018). Endospora memungkinkan bakteri bertahan pada kondisi lingkungan ekstrem seperti kekeringan dan suhu tinggi. Beberapa spesies *Bacillus* menghasilkan antibiotik, siderofor, dan enzim hidrolitik yang mampu menekan perkembangan patogen tanaman. Oleh karena itu, genus ini banyak dikembangkan sebagai bahan aktif pupuk hayati dan biofungisida.

Genus *Pseudomonas* dikenal sebagai kelompok bakteri endofitik yang memiliki aktivitas antagonistik tinggi terhadap patogen tanaman (Compant *et al*., 2005). Bakteri ini menghasilkan senyawa antimikroba seperti phenazine, pyoluteorin, dan siderofor yang mampu menghambat pertumbuhan mikroorganisme patogen. Selain itu, *Pseudomonas* juga mampu berkompetisi dalam memperoleh nutrisi dan ruang kolonisasi di jaringan tanaman. Kemampuan tersebut menjadikan bakteri ini efektif dalam pengendalian hayati penyakit tanaman.

Bakteri dari genus *Azospirillum* memiliki peran penting dalam meningkatkan pertumbuhan tanaman melalui mekanisme biologis tertentu (Bashan & de-Bashan, 2010). Mikroorganisme ini mampu memfiksasi nitrogen dari atmosfer menjadi bentuk yang tersedia bagi tanaman. Selain itu, *Azospirillum* menghasilkan hormon tumbuh seperti indole acetic acid (IAA), giberelin, dan sitokinin. Produksi hormon tersebut berpengaruh terhadap perkembangan akar dan penyerapan unsur hara tanaman.

Selain bakteri, fungi endofitik juga memiliki keragaman yang sangat tinggi dan tersebar luas pada berbagai spesies tanaman (Rodriguez *et al*., 2009). Fungi endofitik banyak ditemukan pada tanaman tropis dan diketahui menghasilkan metabolit sekunder yang bersifat bioaktif. Beberapa metabolit tersebut memiliki aktivitas antimikroba, antioksidan, dan antikanker. Oleh karena itu, fungi endofitik tidak hanya penting dalam pertanian tetapi juga berpotensi dimanfaatkan dalam bidang farmasi.

Genus *Trichoderma* merupakan salah satu fungi endofitik yang banyak digunakan sebagai agen pengendali hayati tanaman (Harman *et al*., 2004). Fungi

ini menghasilkan enzim hidrolitik seperti kitinase dan β-1,3-glukanase yang mampu merusak dinding sel patogen. Selain itu, *Trichoderma* dapat mengkolonisasi akar tanaman dan meningkatkan pertumbuhan tanaman melalui stimulasi fisiologis. Kemampuan tersebut menyebabkan fungi ini banyak diaplikasikan dalam teknologi pertanian berkelanjutan.

Beberapa spesies *Fusarium* nonpatogen juga diketahui hidup sebagai mikroorganisme endofitik yang menguntungkan tanaman (Santoyo *et al*., 2016). Kelompok ini mampu berkompetisi dengan *Fusarium* patogen dalam memperebutkan ruang dan nutrisi di jaringan tanaman. Selain itu, beberapa isolat menghasilkan metabolit yang dapat menghambat perkembangan patogen lain. Namun demikian, identifikasi spesies sangat penting karena genus *Fusarium* juga mencakup banyak spesies patogen tanaman.

Keragaman mikroorganisme endofitik dipengaruhi oleh berbagai faktor seperti jenis tanaman, lokasi geografis, kondisi lingkungan, dan metode identifikasi yang digunakan (Bulgarelli *et al*., 2013). Tanaman yang tumbuh pada lingkungan berbeda umumnya memiliki komunitas endofitik yang berbeda pula. Faktor iklim, kelembapan, dan sifat tanah berpengaruh terhadap seleksi mikroorganisme tertentu. Selain itu, metode molekuler modern mampu mengungkap lebih banyak jenis mikroorganisme dibandingkan metode kultur konvensional.

Perkembangan teknologi metagenomik menunjukkan bahwa sebagian besar mikroorganisme endofitik belum dapat dikultur menggunakan media laboratorium biasa (Berendsen *et al*., 2012). Teknologi sequencing DNA memungkinkan identifikasi

mikroorganisme langsung dari jaringan tanaman tanpa proses kultivasi. Pendekatan tersebut memperluas pemahaman mengenai kompleksitas komunitas mikroba tanaman. Oleh karena itu, eksplorasi keanekaragaman mikroorganisme endofitik masih menjadi bidang penelitian yang terus berkembang hingga saat ini.

Tabel 7. 1 Peran Menguntungkan Endofit dalam Meningkatkan Pertumbuhan dan Kesehatan Tanaman Melalui Berbagai Mekanisme

Species Tanaman	Bakteri/Fungi Endofit	Manfaat untuk Tanaman	Referensi
Lycopersicon esculentum	*Aspergillus nidulans*	Peningkatan hasil buah tomat dan biomassa tanaman	Xia *et al*. (2019)
Phragmites australis	*Pseudomonas* spp.	Perlindungan terhadap patogen tanaman	White *et al*. (2017)
Zea mays	*Bacillus* sp.	Pertahanan inang yang dimediasi lipopeptida terhadap patogen	Gond *et al*. (2015)
Ipomeapes-caprae L.	Fungi Endofit	Menginduksi toleransi salinitas pada *Oryza sativa* L.	Manasa *et al*. (2020)
Agave tequilana	*Bacillus tequilensis*	Serapan unsur hara untuk tanaman dan pertumbuhan tanaman	Beltr´an-García *et al*. (2014)
Poplar (*Populus* sp.)	*Burkholderia vietnameinsis, Pseudomonas* sp., *Rhanella* sp.	Penurunan konduktansi stomata dan kerusakan ROS, peningkatan biomassa tanaman	Khan *et al*. (2016)

Allium cepa	*Burkholderia phytofirmans*	Peningkatan kadar antioksidan, fotosintesis	Naveed *et al*. (2014)
Oryza sativa	*Bacillus subtilis var. amyloliquefaciens* 72β24	Biokontrol *Rhizoctonia solani*	Nagendran *et al*. (2014)
Piper nigrum L.	*Arthrobacter* sp. *Pseudomonas* sp. *Bacillus* sp.	Biokontrol *Phytophthora capsici*	Aravind *et al*. (2009)
Saccharum officinarum	*Gluconobacter diazotrophicus*	Pertahanan sistemik	Idogawa *et al*. (2014)
Lycopersicon esculentum	*Coniothyrium aleuritis Fusarium oxysporum Aspergillus nidulans*	Peningkatan hasil buah tomat dan bobot segar	Xia *et al*. (2019)
Zea mays L.	*Fusarium verticillioides*	Mengurangi pertumbuhan patogen api *Ustilago maydis* dengan mengeluarkan metabolit	Rodriguez *et al*. (2012)
Hordeum vulgare Nicotiana tabacum	*Piriformospora indica*	Peningkatan toleransi terhadap stres biotik dan abiotik	Johnson *et al*. (2014)
Saccharum officinarum Helianthus annus Gossypium hirsutum	*Epicoccum nigrum*	Perlindungan terhadap patogen, *Sklerotinia sclerotiorum* dan Pythium	Favaro *et al*. (2012)
Phaseolus vulgaris,	*Metarhizium*	Siklus nitrogen	Behie *et al*.

Panicum virgatum	*robertsii*	tanah	(2012)
Hordeum murinum subsp. murinum L.	*Fungal root endophytes*	Peningkatan hasil pada kultivar barley (jelai) yang kekurangan nutrisi	Murphy *et al*. (2015a)
Hordeum vulgare	*Piriformospora indica*	Toleransi tanaman terhadap cekaman biotik dan abiotik	Johnson, Alex, and Oelmuller (2014)
Triticum aestivum	*Acinetobacter Paenibacillus Bacillus*	Produksi siderofor, biokontrol *Gaeumannomyces graminis*	Duran *et al*. (2014)
Hordeum vulgare	*Piriformospora indica*	Peningkatan hasil biji barley	Achatz *et al*. (2010)
Medicago sativa L.	*Bacillus megaterium Microbacterium trichothecenolyticum*	Peningkatan nodulasi dan pertumbuhan tanaman di *Medicago sativa* L.	Stajkovic *et al*. (2009)
Lycopersicon esculentum Mill.	*Brevibacillus brevis Pseudomonas aeruginosa*	Perlindungan dari patogen tanaman jamur *Botrytis cinerea*	Yang *et al*. (2011)
Raphanus sativus L.	*Proteobacteria* sp.	Perlindungan terhadap patogen tanaman	Seo *et al*. (2010)
Vitis vinifera	*Pseudomonas cichorii Klebsiella pneumonia Xanthomonas* sp.	Bakteri endofit mendorong pertumbuhan tanaman	West *et al*. (2010)
Beta vulgaris L.	*Bacillus* sp. *Corynebacteriu*	*Profiling* molekuler komunitas mikroba penting untuk	Dent *et al*. (2004)

	m sp.	penyimpanan benih dan perkecambahanny a	
Solanum tuberosum L.	*Enterobacter* sp. *Comamonas* sp.	Perlindungan terhadap penyakit kaki hitam (yang disebabkan oleh *Erwinia carotovora* subsp. atroseptica)	Reiter *et al.* (2002)
Glycine max (L.) Merr.	*Pseudomonas citronellolis, Klebsiella pneumoniae*	Produksi asam asetat indol, pelarutan fosfat, fiksasi nitrogen	Kuklinsky-Sobral *et al*. (2004)
Triticum aestivum L.	*Mycobacterium* sp.	Fiksasi nitrogen	Iniguez *et al*. (2004)
Cullen plicata	*Thermomyces* sp.	Toleransi suhu tinggi pada *Cucumis sativus*	Ali *et al*. (2018)
Parthenium hysterophorus	*Curvularia geniculata*	Produksi fitohormon, pelarutan fosfat	Priyadharsini and Muthukumar (2017)
Hordeum vulgare	*Piriformospora indica*	Meningkatkan toleransi terhadap kekeringan barley	Ghaffari *et al*. (2019)
Brassica rapa	*Piriformospora indica*	Toleransi tanaman terhadap cekaman kekeringan	Sun *et al*. (2010)

Sumber: Tiwari *et al*., (2023).

7.1.5 Faktor yang Mempengaruhi Populasi Endofit

Populasi mikroorganisme endofitik pada tanaman dipengaruhi oleh berbagai faktor biotik dan abiotik yang saling berinteraksi dalam ekosistem tanaman (Hardoim *et al*., 2015). Faktor-faktor tersebut menentukan keberhasilan kolonisasi, kelimpahan populasi, dan stabilitas komunitas mikroorganisme di dalam jaringan tanaman. Perubahan lingkungan dapat memengaruhi struktur komunitas mikroba secara signifikan. Oleh karena itu, populasi endofit bersifat dinamis mengikuti kondisi habitat tanaman.

Faktor genetik tanaman merupakan salah satu faktor utama yang menentukan komposisi komunitas mikroorganisme endofitik (Bulgarelli *et al*., 2013). Setiap spesies tanaman menghasilkan eksudat dan metabolit yang berbeda sehingga memengaruhi seleksi mikroorganisme tertentu. Tanaman juga memiliki sistem pertahanan yang berbeda dalam merespons kolonisasi mikroorganisme. Akibatnya, jenis mikroorganisme endofitik yang ditemukan pada satu tanaman belum tentu sama dengan tanaman lainnya.

Umur tanaman memengaruhi keragaman dan populasi mikroorganisme endofitik karena terjadi perubahan fisiologi tanaman selama pertumbuhan (Compant *et al*., 2010). Pada fase vegetatif awal, tanaman umumnya menghasilkan eksudat yang mendukung kolonisasi mikroorganisme tertentu. Seiring bertambahnya umur tanaman, komposisi senyawa metabolit berubah sehingga memengaruhi struktur komunitas mikroba. Oleh karena itu, populasi endofit dapat berbeda antara tanaman muda dan tanaman dewasa.

Kondisi lingkungan seperti suhu, kelembapan, dan intensitas cahaya sangat memengaruhi perkembangan mikroorganisme endofitik pada tanaman (Vorholt, 2012). Mikroorganisme tertentu memiliki kisaran suhu optimum untuk pertumbuhan dan kolonisasi. Perubahan kelembapan lingkungan dapat memengaruhi aktivitas metabolik mikroorganisme di dalam jaringan tanaman. Selain itu, stres lingkungan sering menyebabkan perubahan komunitas endofitik secara keseluruhan.

Sifat fisik dan kimia tanah berperan penting dalam menentukan keberadaan mikroorganisme endofitik karena tanah merupakan sumber utama mikroorganisme tanaman (Berendsen *et al*., 2012). Faktor seperti pH tanah, kandungan bahan organik, tekstur tanah, dan ketersediaan unsur hara memengaruhi populasi mikroba tanah yang berpotensi menjadi endofit. Tanah dengan kandungan bahan organik tinggi umumnya memiliki keragaman mikroba yang lebih besar. Kondisi tersebut meningkatkan peluang kolonisasi mikroorganisme ke jaringan tanaman.

Praktik budidaya pertanian dapat memengaruhi keragaman dan populasi mikroorganisme endofitik pada tanaman budidaya (Backer *et al*., 2018). Penggunaan pupuk kimia dan pestisida secara intensif sering menurunkan populasi mikroorganisme menguntungkan. Sebaliknya, sistem pertanian organik cenderung mendukung keanekaragaman mikroorganisme yang lebih tinggi. Teknik budidaya seperti rotasi tanaman dan penggunaan pupuk hayati juga memengaruhi komunitas endofitik tanaman.

Penggunaan pestisida kimia secara berlebihan diketahui dapat mengganggu keseimbangan komunitas mikroorganisme tanaman (Tilman *et al*., 2002).

Beberapa bahan aktif pestisida bersifat toksik terhadap mikroorganisme non-target termasuk bakteri dan fungi endofitik. Penurunan populasi mikroorganisme menguntungkan dapat menyebabkan tanaman lebih rentan terhadap penyakit tertentu. Oleh karena itu, pengelolaan pestisida yang bijaksana sangat penting dalam menjaga keseimbangan mikrobioma tanaman.

Interaksi antar mikroorganisme di dalam jaringan tanaman juga memengaruhi populasi endofit tertentu (Santoyo *et al*., 2016). Mikroorganisme dapat saling berkompetisi dalam memperoleh ruang kolonisasi dan sumber nutrisi. Beberapa mikroorganisme menghasilkan senyawa antimikroba yang menghambat pertumbuhan mikroorganisme lain. Sebaliknya, hubungan sinergis antar mikroorganisme tertentu juga dapat meningkatkan stabilitas komunitas mikroba tanaman.

Tanaman yang mengalami cekaman biotik maupun abiotik umumnya menunjukkan perubahan struktur komunitas mikroorganisme endofitik sebagai bentuk respons adaptasi (Naylor & Coleman-Derr, 2017). Kondisi kekeringan, salinitas, atau serangan patogen dapat meningkatkan dominansi mikroorganisme tertentu yang toleran terhadap stres. Mikroorganisme tersebut sering membantu tanaman bertahan pada kondisi lingkungan yang tidak menguntungkan. Hal ini menunjukkan adanya hubungan erat antara kondisi tanaman dan komunitas mikroorganisme endofitik.

Pemahaman mengenai faktor-faktor yang memengaruhi populasi mikroorganisme endofitik sangat penting dalam pengembangan teknologi pupuk hayati dan bioinokulan (Compant *et al*., 2010). Informasi tersebut membantu menentukan strategi produksi, formulasi, dan aplikasi mikroorganisme yang lebih

efektif pada tanaman budidaya. Selain itu, pemahaman terhadap faktor lingkungan dapat meningkatkan keberhasilan kolonisasi mikroorganisme di lapangan. Dengan demikian, efisiensi pemanfaatan mikroorganisme dalam pertanian berkelanjutan dapat ditingkatkan.

7.2 Mikroorganisme Filosfer

7.2.1 Pengertian Filosfer

Filosfer merupakan habitat mikroorganisme yang terdapat pada permukaan organ udara tanaman, terutama daun (Lindow & Brandl, 2003). Habitat ini menjadi salah satu ekosistem mikroba terbesar di bumi karena luas total permukaan daun tanaman sangat besar. Permukaan daun menyediakan tempat hidup bagi berbagai jenis bakteri, fungi, khamir, dan mikroalga. Mikroorganisme tersebut berinteraksi secara langsung dengan lingkungan atmosfer dan jaringan tanaman.

Istilah filosfer berasal dari kata “phyllon” yang berarti daun dan “sphere” yang berarti lingkungan atau habitat (Vorholt, 2012). Filosfer mencakup seluruh bagian permukaan organ tanaman di atas permukaan tanah seperti daun, batang muda, bunga, dan buah (Gambar 3). Namun demikian, daun menjadi habitat utama karena memiliki luas permukaan paling dominan. Oleh sebab itu, sebagian besar penelitian filosfer berfokus pada komunitas mikroorganisme daun.

Permukaan daun merupakan habitat yang unik karena mengalami perubahan kondisi lingkungan secara cepat dan ekstrem (Lindow & Leveau, 2002). Mikroorganisme pada filosfer harus mampu bertahan terhadap radiasi ultraviolet, perubahan suhu, fluktuasi

kelembapan, dan keterbatasan nutrisi. Kondisi tersebut menyebabkan hanya mikroorganisme tertentu yang mampu beradaptasi dan berkembang pada habitat ini. Adaptasi tersebut menjadi faktor penting dalam keberhasilan kolonisasi mikroorganisme filosfer.

Mikroorganisme filosfer umumnya bersifat epifit, yaitu hidup menempel pada permukaan tanaman tanpa memasuki jaringan internal tanaman (Leveau, 2006). Mikroorganisme tersebut memperoleh nutrisi dari eksudat daun, senyawa volatil, dan partikel organik yang terdapat pada permukaan daun. Beberapa mikroorganisme mampu membentuk biofilm untuk meningkatkan daya tahan terhadap cekaman lingkungan. Pembentukan biofilm juga membantu mikroorganisme mempertahankan kolonisasi pada permukaan daun.

Filosfer merupakan habitat yang miskin nutrisi dibandingkan dengan rizosfer atau jaringan internal tanaman (Vorholt *et al*., 2012). Nutrisi yang tersedia pada permukaan daun umumnya berasal dari gula, asam amino, dan senyawa organik lain yang dikeluarkan tanaman dalam jumlah terbatas. Oleh karena itu, mikroorganisme filosfer harus memiliki efisiensi metabolik yang tinggi untuk bertahan hidup. Kompetisi antar mikroorganisme pada habitat ini juga berlangsung sangat intensif.

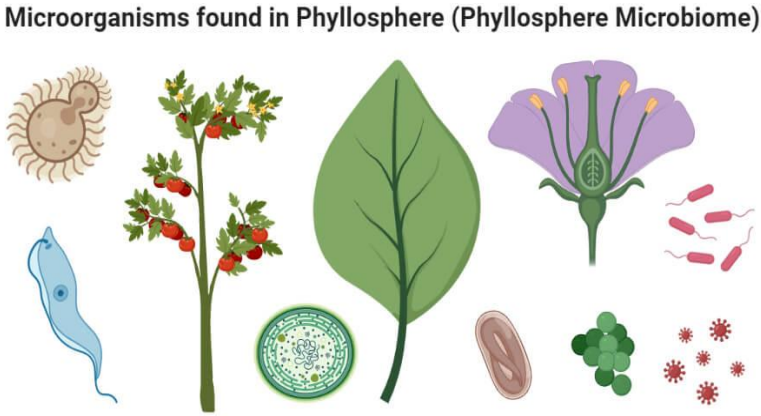
Keberadaan mikroorganisme filosfer memberikan pengaruh penting terhadap kesehatan tanaman dan keseimbangan ekosistem mikroba daun (Lindow & Brandl, 2003). Beberapa mikroorganisme mampu menghambat perkembangan patogen tanaman melalui mekanisme kompetisi maupun antibiosis. Selain itu, mikroorganisme tertentu dapat membantu tanaman meningkatkan toleransi terhadap cekaman lingkungan.

Dengan demikian, filosfer merupakan bagian penting dalam sistem mikrobioma tanaman.

Komunitas mikroorganisme filosfer bersifat dinamis dan dipengaruhi oleh berbagai faktor lingkungan (Remus-Emsermann & Schlechter, 2018). Perubahan musim, curah hujan, kelembapan udara, dan intensitas cahaya dapat memengaruhi struktur komunitas mikroba pada permukaan daun. Faktor fisiologi tanaman juga menentukan jenis mikroorganisme yang mampu berkolonisasi. Oleh sebab itu, komposisi mikroorganisme filosfer dapat berbeda antar tanaman maupun lokasi geografis.

Perkembangan teknologi molekuler menunjukkan bahwa filosfer memiliki keragaman mikroorganisme yang jauh lebih tinggi dibandingkan yang terdeteksi melalui metode kultur konvensional (Bulgarelli *et al*., 2013). Teknik sequencing DNA memungkinkan identifikasi mikroorganisme langsung dari permukaan daun. Pendekatan tersebut membantu mengungkap struktur komunitas mikroba secara lebih akurat. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sebagian besar mikroorganisme filosfer belum dapat dikultur di laboratorium.

Mikroorganisme filosfer memiliki hubungan erat dengan siklus biogeokimia di lingkungan atmosfer dan tanaman (Vorholt, 2012). Aktivitas mikroba pada permukaan daun dapat memengaruhi metabolisme karbon, nitrogen, dan senyawa volatil tanaman. Beberapa mikroorganisme juga berperan dalam degradasi polutan udara yang menempel pada daun. Oleh karena itu, filosfer memiliki peran ekologis yang penting dalam ekosistem daratan.



Gambar 7. 3 Filosfer Yaitu Seluruh Bagian Permukaan Organ Tanaman Di Atas Permukaan Tanah Seperti Daun, Batang Muda, Bunga, Dan Buah Yang Dapat Merupakan Habitat Mikrob

Sumber:https://microbenotes.com/phyllosphere-microorganisms/

Kajian mengenai filosfer menjadi semakin penting dalam pengembangan pertanian berkelanjutan dan mikrobiologi tanaman modern (Lindow & Brandl, 2003). Pemanfaatan mikroorganisme filosfer sebagai agen pengendali hayati dan bio-stimulan tanaman mulai banyak dikembangkan. Selain itu, filosfer juga menjadi model penting untuk memahami interaksi mikroorganisme dengan lingkungan udara tanaman. Dengan demikian, filosfer merupakan salah satu bidang penelitian yang terus berkembang dalam ilmu mikrobiologi pertanian.

7.2.2 Komunitas Mikroorganisme Filosfer

Komunitas mikroorganisme filosfer terdiri atas berbagai kelompok bakteri, fungi, khamir, dan mikroorganisme lain yang hidup pada permukaan daun tanaman (Vorholt, 2012). Mikroorganisme tersebut membentuk komunitas kompleks yang saling berinteraksi satu sama lain maupun dengan tanaman inang. Komposisi komunitas filosfer dipengaruhi oleh faktor lingkungan, jenis tanaman, dan kondisi fisiologis daun. Oleh karena itu, struktur komunitas mikroba filosfer bersifat sangat dinamis.

Bakteri merupakan kelompok mikroorganisme yang paling dominan pada filosfer tanaman (Lindow & Brandl, 2003). Populasi bakteri pada permukaan daun dapat mencapai jutaan sel per sentimeter persegi daun. Genus bakteri yang umum ditemukan meliputi *Pseudomonas*, *Methylobacterium*, *Sphingomonas*, dan *Bacillus*. Kelompok tersebut memiliki kemampuan adaptasi tinggi terhadap kondisi lingkungan permukaan daun.

Genus *Pseudomonas* merupakan salah satu bakteri filosfer yang paling banyak dipelajari karena memiliki kemampuan kolonisasi yang tinggi pada daun tanaman (Lindow & Leveau, 2002). Bakteri ini mampu menggunakan senyawa organik sederhana dari eksudat daun sebagai sumber nutrisi. Selain itu, beberapa spesies *Pseudomonas* menghasilkan antibiotik yang dapat menghambat pertumbuhan patogen tanaman. Kemampuan tersebut menyebabkan bakteri ini berpotensi digunakan sebagai agen pengendali hayati.

Genus *Methylobacterium* banyak ditemukan pada filosfer karena mampu memanfaatkan metanol yang dilepaskan daun selama proses metabolisme tanaman (Knief *et al*., 2010). Bakteri ini dikenal sebagai pink-

pigmented facultative methylotrophs yang sering membentuk koloni berwarna merah muda pada media kultur. Selain memanfaatkan metanol, *Methylobacterium* juga diketahui menghasilkan fitohormon yang mendukung pertumbuhan tanaman. Kehadiran bakteri ini sering dikaitkan dengan kesehatan tanaman yang lebih baik.

Fungi filosfer merupakan kelompok mikroorganisme penting yang berperan dalam keseimbangan ekosistem mikroba daun (Arnold *et al*., 2003). Beberapa fungi hidup sebagai saprofit, sedangkan sebagian lainnya bersifat patogen maupun mutualistik. Fungi tertentu membantu menghambat perkembangan patogen melalui kompetisi ruang dan nutrisi. Namun demikian, beberapa fungi filosfer juga dapat menyebabkan penyakit pada tanaman ketika kondisi lingkungan mendukung.

Khamir atau yeast merupakan komponen mikroorganisme filosfer yang sering ditemukan pada permukaan daun tanaman tropis dan subtropis (Fonseca & Inácio, 2006). Khamir memiliki kemampuan bertahan pada kondisi kering dan fluktuasi suhu tinggi. Beberapa spesies khamir menghasilkan senyawa antimikroba yang dapat menekan perkembangan patogen tanaman. Oleh karena itu, khamir filosfer mulai banyak dipelajari sebagai agen pengendali hayati alternatif.

Komunitas mikroorganisme filosfer membentuk hubungan interaksi yang kompleks dalam mempertahankan kolonisasi pada permukaan daun (Remus-Emsermann & Schlechter, 2018). Interaksi tersebut meliputi kompetisi nutrisi, pembentukan biofilm, komunikasi kimia, dan antibiosis. Mikroorganisme yang mampu beradaptasi lebih baik akan mendominasi komunitas filosfer. Kondisi tersebut

menentukan stabilitas komunitas mikroba pada daun tanaman.

Komposisi komunitas filosfer berbeda antara satu spesies tanaman dengan spesies lainnya (Bulgarelli *et al*., 2013). Perbedaan struktur permukaan daun, kandungan metabolit, dan eksudat tanaman memengaruhi seleksi mikroorganisme tertentu. Tanaman dengan permukaan daun berlilin umumnya memiliki komunitas mikroba yang berbeda dibandingkan tanaman dengan permukaan daun kasar. Hal ini menunjukkan bahwa karakteristik tanaman sangat menentukan struktur komunitas filosfer.

Perubahan kondisi lingkungan dapat menyebabkan perubahan komposisi komunitas mikroorganisme filosfer secara cepat (Vorholt, 2012). Curah hujan, kelembapan udara, dan intensitas cahaya memengaruhi pertumbuhan serta kelangsungan hidup mikroorganisme pada permukaan daun. Musim kemarau dan musim hujan umumnya menunjukkan struktur komunitas mikroba yang berbeda. Oleh karena itu, filosfer merupakan habitat yang sangat dinamis secara ekologis.

Pemahaman mengenai komunitas mikroorganisme filosfer sangat penting dalam pengembangan teknologi pertanian berbasis mikroba (Lindow & Brandl, 2003). Mikroorganisme tertentu berpotensi dikembangkan sebagai biofertilizer dan agen pengendali hayati penyakit daun. Selain itu, komunitas filosfer juga dapat digunakan sebagai indikator kesehatan tanaman dan lingkungan. Dengan demikian, kajian komunitas filosfer memiliki nilai ilmiah dan aplikatif yang tinggi.

7.2.3 Adaptasi Mikroorganisme di Filosfer

Mikroorganisme filosfer memiliki berbagai mekanisme adaptasi untuk bertahan hidup pada lingkungan permukaan daun yang ekstrem dan fluktuatif (Vorholt, 2012). Permukaan daun mengalami perubahan suhu, kelembapan, dan intensitas cahaya secara cepat sepanjang hari. Kondisi tersebut menyebabkan mikroorganisme harus mampu menyesuaikan metabolisme dan fisiologinya secara efisien. Adaptasi ini menjadi faktor utama keberhasilan kolonisasi filosfer.

Ketahanan terhadap radiasi ultraviolet merupakan salah satu bentuk adaptasi penting mikroorganisme filosfer (Lindow & Brandl, 2003). Radiasi ultraviolet dapat merusak DNA dan membran sel mikroorganisme. Beberapa bakteri filosfer menghasilkan pigmen pelindung seperti karotenoid untuk mengurangi kerusakan akibat radiasi. Selain itu, mikroorganisme tertentu memiliki sistem perbaikan DNA yang sangat efektif.

Mikroorganisme filosfer juga memiliki kemampuan bertahan terhadap kondisi kekeringan pada permukaan daun (Vorholt, 2012). Permukaan daun sering mengalami kekurangan air terutama pada siang hari ketika laju evaporasi meningkat. Beberapa mikroorganisme menghasilkan polisakarida ekstraseluler untuk mempertahankan kelembapan di sekitar selnya. Pembentukan biofilm juga membantu mengurangi kehilangan air dan meningkatkan daya tahan mikroorganisme.

Kemampuan memanfaatkan nutrisi dalam jumlah terbatas merupakan bentuk adaptasi penting pada habitat filosfer (Leveau, 2006). Nutrisi pada permukaan daun umumnya berasal dari eksudat tanaman seperti gula, asam amino, dan alkohol sederhana.

Mikroorganisme filosfer memiliki sistem transport dan metabolisme yang efisien untuk memanfaatkan senyawa tersebut. Adaptasi tersebut memungkinkan mikroorganisme tetap tumbuh pada kondisi miskin nutrisi.

Pembentukan biofilm merupakan strategi adaptasi yang umum dilakukan mikroorganisme filosfer untuk mempertahankan kolonisasi pada daun (Remus-Emsermann & Schlechter, 2018). Biofilm membantu mikroorganisme melekat lebih kuat pada permukaan daun dan melindungi sel dari cekaman lingkungan. Selain itu, biofilm memungkinkan pertukaran nutrisi dan komunikasi antar mikroorganisme berlangsung lebih efektif. Dengan demikian, biofilm meningkatkan stabilitas komunitas mikroba filosfer.

Beberapa mikroorganisme filosfer mampu beradaptasi terhadap perubahan suhu yang ekstrem pada permukaan daun (Lindow & Leveau, 2002). Pada siang hari, suhu daun dapat meningkat sangat tinggi akibat paparan sinar matahari langsung. Sebaliknya, suhu dapat turun drastis pada malam hari. Mikroorganisme tertentu menghasilkan protein kejut panas dan senyawa pelindung membran untuk mempertahankan fungsi seluler pada kondisi tersebut.

Mikroorganisme filosfer juga memiliki kemampuan komunikasi antar sel melalui mekanisme quorum sensing (Danhorn & Fuqua, 2007). Mekanisme ini memungkinkan mikroorganisme mengatur ekspresi gen tertentu berdasarkan kepadatan populasi. Komunikasi tersebut penting dalam pembentukan biofilm, produksi metabolit, dan kolonisasi permukaan daun. Oleh karena itu, quorum sensing berperan penting dalam adaptasi komunitas mikroba filosfer.

Adaptasi mikroorganisme filosfer dipengaruhi oleh karakteristik permukaan daun tanaman inang (Bulgarelli *et al*., 2013). Permukaan daun yang berlilin, berbulu, atau kasar menyediakan kondisi mikrohabitat yang berbeda bagi mikroorganisme. Selain itu, kandungan metabolit daun juga memengaruhi jenis mikroorganisme yang mampu bertahan. Hal ini menyebabkan setiap spesies tanaman memiliki komunitas filosfer yang khas.

Perubahan lingkungan atmosfer dapat memengaruhi kemampuan adaptasi mikroorganisme filosfer secara signifikan (Vorholt, 2012). Polusi udara, perubahan iklim, dan peningkatan suhu global berpotensi mengubah struktur komunitas mikroba pada daun. Mikroorganisme yang lebih toleran terhadap stres lingkungan cenderung mendominasi komunitas filosfer. Kondisi tersebut dapat memengaruhi kesehatan tanaman secara keseluruhan.

Pemahaman mengenai mekanisme adaptasi mikroorganisme filosfer sangat penting dalam pengembangan agen hayati berbasis mikroba daun (Lindow & Brandl, 2003). Mikroorganisme yang memiliki kemampuan adaptasi tinggi lebih berpotensi digunakan sebagai inokulan pertanian. Selain itu, pengetahuan mengenai adaptasi mikroba membantu meningkatkan efektivitas formulasi dan aplikasi bioinokulan di lapangan. Dengan demikian, kajian adaptasi filosfer memiliki peran penting dalam teknologi pertanian berkelanjutan.

7.2.4 Faktor yang Mempengaruhi Komunitas Filosfer

Komunitas mikroorganisme filosfer dipengaruhi oleh berbagai faktor lingkungan dan karakteristik tanaman yang menentukan keberhasilan kolonisasi

mikroba pada permukaan daun (Vorholt, 2012). Faktor-faktor tersebut memengaruhi jenis, keragaman, dan kelimpahan mikroorganisme yang hidup di filosfer. Perubahan kondisi lingkungan dapat menyebabkan perubahan struktur komunitas mikroba secara cepat. Oleh karena itu, komunitas filosfer bersifat sangat dinamis.

Morfologi daun merupakan salah satu faktor utama yang memengaruhi struktur komunitas mikroorganisme filosfer pada tanaman (Lindow & Brandl, 2003). Bentuk daun, keberadaan trikoma, ketebalan kutikula, dan tekstur permukaan daun menentukan kemampuan mikroorganisme untuk melekat dan berkembang. Permukaan daun yang kasar dan berbulu umumnya menyediakan lebih banyak mikrohabitat bagi mikroorganisme dibandingkan permukaan daun yang licin. Selain itu, stomata dan lekukan permukaan daun sering menjadi tempat akumulasi air dan nutrisi yang mendukung pertumbuhan mikroba.

Lapisan kutikula daun memengaruhi kemampuan mikroorganisme dalam mempertahankan kolonisasi pada filosfer tanaman (Leveau, 2006). Daun dengan lapisan lilin tebal cenderung memiliki kelembapan permukaan yang lebih rendah sehingga membatasi pertumbuhan mikroorganisme tertentu. Sebaliknya, daun dengan kutikula tipis memungkinkan retensi air lebih lama pada permukaan daun. Kondisi tersebut dapat meningkatkan populasi mikroorganisme pada filosfer.

Eksudat daun merupakan sumber nutrisi utama bagi mikroorganisme filosfer pada permukaan tanaman (Mercier & Lindow, 2000). Eksudat tersebut terdiri atas gula, asam amino, asam organik, dan berbagai metabolit sekunder yang dikeluarkan tanaman. Komposisi eksudat berbeda pada setiap spesies tanaman dan dipengaruhi

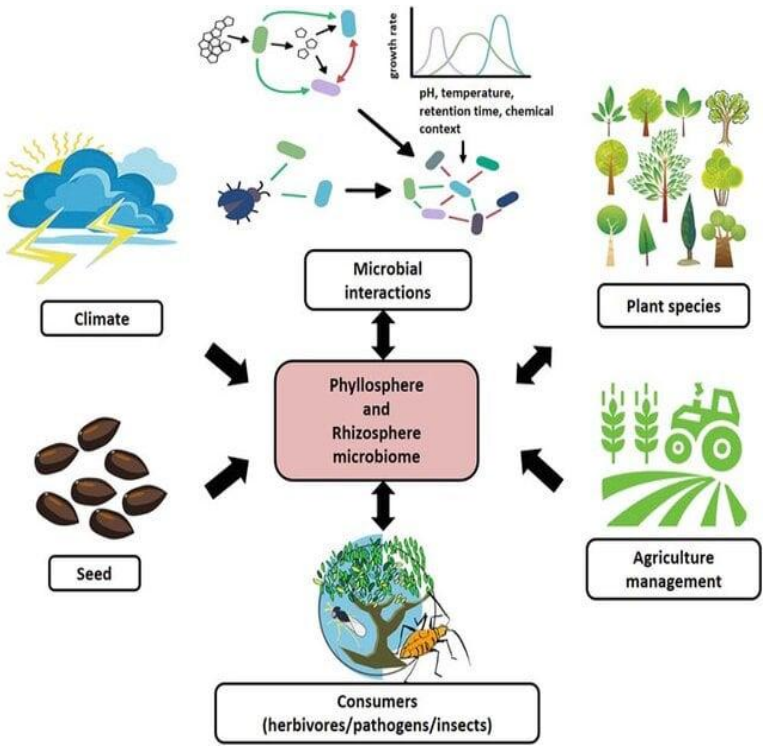
oleh kondisi fisiologi tanaman. Oleh karena itu, jenis eksudat daun sangat menentukan seleksi mikroorganisme yang mampu hidup pada filosfer.

Kandungan metabolit sekunder pada eksudat daun juga memengaruhi komunitas mikroorganisme filosfer secara selektif (Bulgarelli *et al*., 2013). Beberapa senyawa fenolik dan antimikroba yang diproduksi tanaman dapat menghambat pertumbuhan mikroorganisme tertentu. Sebaliknya, mikroorganisme yang toleran terhadap senyawa tersebut dapat mendominasi komunitas filosfer. Interaksi kimia tersebut menyebabkan terbentuknya komunitas mikroba yang khas pada setiap tanaman.

Iklim dan musim merupakan faktor lingkungan yang sangat memengaruhi komunitas mikroorganisme filosfer (Vorholt, 2012). Curah hujan, suhu udara, kelembapan, dan intensitas cahaya menentukan kondisi mikrohabitat pada permukaan daun. Musim hujan umumnya meningkatkan kelembapan daun sehingga mendukung pertumbuhan mikroorganisme tertentu. Sebaliknya, musim kemarau sering menyebabkan penurunan populasi mikroba akibat kondisi permukaan daun yang lebih kering.

Perubahan suhu lingkungan dapat memengaruhi aktivitas metabolik dan kelangsungan hidup mikroorganisme filosfer (Lindow & Leveau, 2002). Suhu yang terlalu tinggi dapat menyebabkan kerusakan membran sel dan denaturasi protein mikroorganisme. Namun, beberapa mikroorganisme filosfer memiliki mekanisme adaptasi seperti produksi protein kejut panas untuk bertahan pada kondisi tersebut. Adaptasi ini memungkinkan mikroorganisme tetap hidup pada lingkungan daun yang ekstrem.

Menurut Kumar *et al*. (2022) Sumber utama keanekaragaman mikroba di filosfer adalah tanah, air, udara, tunas tanaman, dan sisa tanaman dari tanaman sebelumnya. Populasi mikroba di filosfer mengalami fluktuasi suhu, kelembapan, dan penyinaran sinar UV yang sangat mempengaruhi perubahan pola pertumbuhan mikroba. Keanekaragaman dan perkembangan filosfer bergantung pada beragam faktor, abiotik dan biotik, yang sebagian besar membentuk strukturnya (Gambar 7.4).



Gambar 7. 4 Faktor yang Mempengaruhi Mikrobioma Filosfer dan Rizosfer

Sumber : Kumar *et al*. (2022)

Aktivitas manusia dalam sistem budidaya pertanian turut memengaruhi komunitas mikroorganisme filosfer pada tanaman (Remus-Emsermann & Schlechter, 2018). Praktik budidaya seperti pemupukan, irigasi, pemangkasan, dan penggunaan varietas tertentu dapat mengubah kondisi mikrohabitat daun. Perubahan tersebut berdampak terhadap struktur komunitas mikroba pada filosfer. Oleh karena itu, sistem budidaya tanaman sangat berpengaruh terhadap keseimbangan komunitas mikroorganisme daun.

Penggunaan pestisida kimia diketahui dapat memengaruhi keragaman dan populasi mikroorganisme filosfer secara signifikan (Tilman *et al*., 2002). Beberapa bahan aktif pestisida bersifat toksik terhadap mikroorganisme non-target termasuk bakteri dan fungi menguntungkan pada permukaan daun. Penurunan populasi mikroorganisme menguntungkan dapat meningkatkan peluang berkembangnya patogen tertentu. Selain itu, penggunaan pestisida berulang dapat menyebabkan perubahan stabilitas komunitas filosfer dalam jangka panjang.

Pemahaman mengenai faktor-faktor yang memengaruhi komunitas filosfer sangat penting dalam pengembangan teknologi mikroba untuk pertanian berkelanjutan (Lindow & Brandl, 2003). Informasi tersebut membantu menentukan strategi aplikasi agen hayati yang lebih efektif pada permukaan daun tanaman. Selain itu, pengelolaan faktor lingkungan dapat meningkatkan keberhasilan kolonisasi mikroorganisme menguntungkan. Dengan demikian, stabilitas komunitas filosfer dapat dipertahankan untuk mendukung kesehatan tanaman.

7.2.5 Interaksi Antar Mikroorganisme di Filosfer

Mikroorganisme pada filosfer membentuk berbagai bentuk interaksi yang menentukan stabilitas dan struktur komunitas mikroba pada permukaan daun (Vorholt, 2012). Interaksi tersebut dapat bersifat kompetitif maupun saling menguntungkan tergantung kondisi lingkungan dan jenis mikroorganisme yang terlibat. Hubungan antar mikroorganisme berlangsung sangat intensif karena filosfer merupakan habitat yang miskin nutrisi. Oleh sebab itu, kemampuan berinteraksi menjadi faktor penting dalam keberhasilan kolonisasi filosfer.

Kompetisi merupakan bentuk interaksi utama antar mikroorganisme pada filosfer karena keterbatasan ruang dan sumber nutrisi di permukaan daun (Lindow & Brandl, 2003). Mikroorganisme bersaing untuk memperoleh senyawa organik yang tersedia dari eksudat daun. Selain itu, ruang kolonisasi pada stomata, trikoma, dan lekukan permukaan daun juga menjadi area kompetisi penting. Mikroorganisme yang memiliki kemampuan adaptasi dan pertumbuhan lebih cepat cenderung mendominasi komunitas filosfer.

Kompetisi antar mikroorganisme dapat menghambat perkembangan mikroorganisme patogen pada permukaan daun tanaman (Mercier & Lindow, 2000). Mikroorganisme menguntungkan mampu memanfaatkan nutrisi lebih efisien sehingga membatasi pertumbuhan patogen. Selain itu, beberapa bakteri filosfer dapat mengkolonisasi area tertentu pada daun sebelum patogen berkembang. Mekanisme tersebut menjadi salah satu dasar penggunaan mikroorganisme filosfer sebagai agen pengendali hayati.

Antibiosis merupakan bentuk interaksi mikroorganisme yang melibatkan produksi senyawa antimikroba untuk menghambat pertumbuhan mikroorganisme lain (Compant *et al*., 2005). Beberapa bakteri filosfer seperti *Pseudomonas* menghasilkan antibiotik, siderofor, dan metabolit sekunder yang bersifat antagonistik terhadap patogen tanaman. Senyawa tersebut dapat menghambat pertumbuhan jamur maupun bakteri patogen pada daun. Aktivitas antibiosis berperan penting dalam menjaga keseimbangan komunitas mikroba filosfer.

Fungi dan khamir filosfer juga mampu menghasilkan senyawa antimikroba yang berfungsi dalam mekanisme antibiosis pada permukaan daun (Fonseca & Inácio, 2006). Senyawa tersebut dapat menghambat perkecambahan spora dan pertumbuhan hifa patogen tanaman. Beberapa khamir menghasilkan toksin protein yang bersifat spesifik terhadap mikroorganisme tertentu. Oleh karena itu, fungi dan khamir filosfer berpotensi dimanfaatkan sebagai agen biokontrol alami.

Quorum sensing merupakan mekanisme komunikasi antar mikroorganisme yang berperan penting dalam koordinasi aktivitas komunitas mikroba filosfer (Danhorn & Fuqua, 2007). Mikroorganisme menghasilkan molekul sinyal kimia yang konsentrasinya meningkat seiring pertambahan populasi. Ketika konsentrasi sinyal mencapai ambang tertentu, mikroorganisme akan mengaktifkan ekspresi gen tertentu secara kolektif. Mekanisme ini mengatur pembentukan biofilm, produksi metabolit, dan aktivitas kolonisasi mikroorganisme.

Mekanisme quorum sensing membantu mikroorganisme filosfer beradaptasi terhadap perubahan kondisi lingkungan pada permukaan daun (Remus-Emsermann & Schlechter, 2018). Melalui komunikasi kimia, mikroorganisme dapat mengoordinasikan respons terhadap cekaman lingkungan dan kompetisi nutrisi. Sistem tersebut meningkatkan efisiensi penggunaan sumber daya pada habitat filosfer yang terbatas. Dengan demikian, quorum sensing menjadi bagian penting dalam dinamika komunitas mikroorganisme daun.

Pembentukan biofilm merupakan strategi penting mikroorganisme filosfer dalam mempertahankan kolonisasi pada permukaan daun tanaman (Vorholt, 2012). Biofilm terdiri atas kumpulan mikroorganisme yang terikat dalam matriks polisakarida ekstraseluler. Struktur tersebut membantu mikroorganisme melekat lebih kuat pada daun dan melindungi sel dari cekaman lingkungan seperti kekeringan dan radiasi ultraviolet. Biofilm juga meningkatkan stabilitas komunitas mikroba pada filosfer.

Biofilm memberikan keuntungan ekologis bagi mikroorganisme karena memungkinkan pertukaran nutrisi dan komunikasi antar sel berlangsung lebih efektif (Lindow & Leveau, 2002). Mikroorganisme dalam biofilm memiliki toleransi yang lebih tinggi terhadap perubahan lingkungan dibandingkan sel bebas. Selain itu, biofilm membantu mikroorganisme mempertahankan populasi pada kondisi nutrisi rendah. Oleh karena itu, pembentukan biofilm menjadi salah satu faktor penting keberhasilan kolonisasi filosfer.

Interaksi antar mikroorganisme di filosfer sangat penting dalam pengembangan teknologi pengendalian hayati berbasis mikroba daun (Compant *et al*., 2005).

Pengetahuan mengenai kompetisi, antibiosis, quorum sensing, dan biofilm dapat digunakan untuk memilih mikroorganisme yang paling efektif sebagai agen hayati. Selain itu, strategi pengelolaan komunitas filosfer dapat meningkatkan kesehatan tanaman dan stabilitas ekosistem mikroba daun. Dengan demikian, kajian interaksi mikroorganisme filosfer memiliki nilai penting dalam pertanian berkelanjutan.

7.3 Metode Isolasi dan Karakterisasi

7.3.1 Teknik Isolasi Mikroorganisme Endofitik dan Filosfer

Teknik isolasi mikroorganisme endofitik dan filosfer merupakan tahap penting dalam mempelajari keragaman, fungsi, dan potensi mikroorganisme yang berasosiasi dengan tanaman (Hallmann *et al*., 2006). Proses isolasi bertujuan memperoleh mikroorganisme dalam bentuk kultur murni sehingga dapat dilakukan identifikasi dan pengujian lebih lanjut. Teknik isolasi yang tepat sangat menentukan keberhasilan memperoleh isolat mikroorganisme yang representatif. Oleh karena itu, prosedur isolasi harus dilakukan secara aseptik dan sistematis.

Isolasi mikroorganisme endofitik diawali dengan pengambilan sampel tanaman yang sehat dari lapangan atau rumah kaca (Ryan *et al*., 2008). Bagian tanaman yang digunakan dapat berupa akar, batang, daun, bunga, atau biji tergantung tujuan penelitian. Sampel tanaman sehat dipilih untuk mengurangi kemungkinan dominasi mikroorganisme patogen. Setelah pengambilan, sampel biasanya disimpan pada suhu rendah untuk mempertahankan viabilitas mikroorganisme.

Sterilisasi permukaan merupakan tahap paling penting dalam isolasi mikroorganisme endofitik (Schulz *et al*., 1993). Tahap ini bertujuan menghilangkan mikroorganisme epifit pada permukaan jaringan tanaman tanpa membunuh mikroorganisme yang berada di dalam jaringan. Sterilisasi umumnya menggunakan etanol, natrium hipoklorit, dan pembilasan dengan akuades steril. Keberhasilan sterilisasi biasanya diuji dengan menumbuhkan air bilasan terakhir pada media kultur.

Setelah sterilisasi permukaan selesai, jaringan tanaman dipotong kecil-kecil dan ditanam pada media pertumbuhan mikroba tertentu (Hallmann *et al*., 2006). Media yang sering digunakan untuk isolasi bakteri antara lain Nutrient Agar (NA) dan Tryptic Soy Agar (TSA). Untuk fungi endofitik, media Potato Dextrose Agar (PDA) lebih umum digunakan. Inkubasi dilakukan pada suhu tertentu hingga koloni mikroorganisme mulai tumbuh dari jaringan tanaman.

Isolasi mikroorganisme filosfer dilakukan dengan metode yang berbeda karena mikroorganisme berada pada permukaan daun tanaman (Lindow & Brandl, 2003). Teknik yang umum digunakan meliputi metode pencucian daun, swab permukaan, dan *imprint* daun pada media kultur. Daun dicuci menggunakan larutan buffer steril untuk melepaskan mikroorganisme dari permukaan daun. Suspensi hasil pencucian kemudian diencerkan dan ditumbuhkan pada media kultur.

Metode pengenceran berseri sering digunakan untuk memperoleh koloni mikroorganisme filosfer yang terpisah dengan baik (Madigan *et al*., 2018). Suspensi mikroorganisme hasil pencucian daun diencerkan secara bertingkat sebelum diinokulasikan pada media agar. Teknik ini membantu mengurangi kepadatan populasi

mikroba sehingga koloni tunggal dapat diamati dengan jelas. Koloni yang berbeda kemudian dipurifikasi untuk memperoleh kultur murni.

Pemilihan media kultur memengaruhi jenis mikroorganisme yang berhasil diisolasi dari tanaman (Atlas, 2010). Media umum sering digunakan untuk memperoleh berbagai jenis mikroorganisme heterotrof. Namun, beberapa mikroorganisme membutuhkan media selektif atau kondisi inkubasi khusus agar dapat tumbuh optimal. Oleh karena itu, penggunaan beberapa jenis media sering dilakukan untuk meningkatkan keberhasilan isolasi mikroorganisme.

Kondisi inkubasi seperti suhu, pH, dan lama inkubasi sangat memengaruhi pertumbuhan mikroorganisme hasil isolasi (Madigan *et al*., 2018). Bakteri umumnya diinkubasi pada suhu 28–37°C selama 24–72 jam, sedangkan fungi memerlukan waktu inkubasi lebih lama. Beberapa mikroorganisme tumbuh lambat sehingga membutuhkan periode inkubasi tambahan. Pengamatan rutin diperlukan untuk memastikan pertumbuhan koloni mikroorganisme.

Teknik kultur konvensional memiliki keterbatasan karena tidak semua mikroorganisme dapat tumbuh pada media laboratorium biasa (Bulgarelli *et al*., 2013). Sebagian besar mikroorganisme tanaman diketahui bersifat *unculturable* atau sulit dikultur menggunakan metode standar. Kondisi tersebut menyebabkan keragaman mikroorganisme yang diperoleh melalui kultur sering lebih rendah dibandingkan kondisi sebenarnya di alam. Oleh karena itu, teknik molekuler mulai banyak digunakan sebagai pelengkap metode isolasi konvensional.

Pemahaman mengenai teknik isolasi mikroorganisme sangat penting dalam penelitian mikrobiologi tanaman dan pengembangan bioinokulan pertanian (Hallmann *et al*., 2006). Teknik isolasi yang baik membantu memperoleh isolat mikroorganisme yang stabil dan potensial untuk dimanfaatkan lebih lanjut. Selain itu, keberhasilan isolasi menentukan kualitas data pada penelitian identifikasi dan karakterisasi mikroorganisme. Dengan demikian, metode isolasi menjadi dasar penting dalam studi mikroorganisme tanaman.

7.3.2 Identifikasi Secara Morfologi dan Molekuler

Identifikasi mikroorganisme merupakan tahap penting untuk mengetahui jenis dan karakteristik mikroorganisme hasil isolasi dari tanaman (Madigan *et al*., 2018). Identifikasi dilakukan untuk menentukan hubungan taksonomi dan potensi biologis mikroorganisme. Pendekatan identifikasi dapat dilakukan secara morfologi maupun molekuler. Kombinasi kedua metode tersebut memberikan hasil identifikasi yang lebih akurat.

Identifikasi morfologi dilakukan berdasarkan pengamatan karakter fisik koloni dan struktur sel mikroorganisme (Cappuccino & Sherman, 2014). Karakter koloni yang diamati meliputi bentuk, warna, ukuran, elevasi, tekstur, dan tepi koloni. Pengamatan ini membantu membedakan jenis mikroorganisme secara awal. Selain itu, karakter morfologi sering digunakan dalam proses seleksi isolat.

Pengamatan mikroskopis digunakan untuk mengetahui bentuk dan struktur sel mikroorganisme secara lebih rinci (Atlas, 2010). Bakteri diamati berdasarkan bentuk sel seperti kokus, basil, atau spiral

serta sifat Gram positif atau Gram negatif. Fungi diamati berdasarkan bentuk hifa, spora, dan struktur reproduktif lainnya. Pengamatan mikroskopis menjadi dasar penting dalam identifikasi awal mikroorganisme.

Pewarnaan Gram merupakan metode umum dalam identifikasi bakteri berdasarkan struktur dinding selnya (Cappuccino & Sherman, 2014). Bakteri Gram positif mempertahankan warna kristal violet sehingga tampak ungu, sedangkan bakteri Gram negatif tampak merah setelah pewarnaan safranin. Perbedaan tersebut berkaitan dengan komposisi peptidoglikan pada dinding sel bakteri. Metode ini membantu menentukan kelompok bakteri secara cepat.

Identifikasi fungi secara morfologi umumnya dilakukan berdasarkan karakter hifa dan struktur sporanya (Watanabe, 2010). Bentuk konidia, konidiofor, dan warna koloni menjadi ciri penting dalam identifikasi fungi. Beberapa genus fungi memiliki karakter morfologi khas yang mudah dikenali. Namun demikian, identifikasi morfologi fungi sering membutuhkan pengalaman dan referensi taksonomi yang lengkap.

Metode identifikasi molekuler berkembang pesat karena memberikan hasil yang lebih akurat dibandingkan identifikasi morfologi (Bulgarelli *et al*., 2013). Teknik ini menggunakan analisis DNA untuk menentukan identitas mikroorganisme berdasarkan urutan genetiknya. Identifikasi molekuler sangat membantu pada mikroorganisme yang memiliki karakter morfologi mirip. Selain itu, metode ini dapat digunakan untuk mikroorganisme yang sulit diidentifikasi secara konvensional.

Gen 16S rRNA merupakan marker molekuler yang paling umum digunakan untuk identifikasi bakteri (Janda & Abbott, 2007). Gen ini terdapat pada seluruh

bakteri dan memiliki daerah konservatif serta variabel yang penting untuk analisis filogenetik. Proses identifikasi dilakukan melalui amplifikasi DNA menggunakan *Polymerase Chain Reaction* (PCR). Hasil sekuensing kemudian dibandingkan dengan database genetik seperti GenBank.

Identifikasi fungi secara molekuler umumnya menggunakan daerah *Internal Transcribed Spacer* (ITS) pada DNA ribosomal (Schoch *et al*., 2012). Daerah ITS memiliki variasi genetik yang tinggi sehingga efektif digunakan dalam identifikasi fungi hingga tingkat spesies. Teknik PCR dan sequencing digunakan untuk memperoleh data urutan DNA fungi. Analisis tersebut memberikan hasil identifikasi yang lebih presisi dibandingkan pengamatan morfologi semata.

Teknologi sequencing modern memungkinkan analisis komunitas mikroorganisme secara langsung tanpa proses kultivasi (Knight *et al*., 2018). Pendekatan metagenomik digunakan untuk mempelajari keragaman mikroorganisme dari sampel tanaman atau lingkungan secara menyeluruh. Teknik ini mampu mendeteksi mikroorganisme yang tidak dapat tumbuh pada media kultur biasa. Oleh karena itu, metode molekuler sangat penting dalam studi mikrobioma tanaman.

Pemahaman mengenai identifikasi mikroorganisme sangat penting dalam pengembangan pupuk hayati dan agen pengendali hayati tanaman (Hallmann *et al*., 2006). Identifikasi yang akurat membantu menentukan fungsi biologis dan keamanan mikroorganisme sebelum diaplikasikan di lapangan. Selain itu, informasi taksonomi penting dalam proses registrasi produk mikroba pertanian. Dengan demikian, metode identifikasi menjadi bagian penting dalam penelitian mikrobiologi tanaman.

7.3.3 Uji Aktivitas Biologis

Uji aktivitas biologis dilakukan untuk mengetahui potensi fungsional mikroorganisme hasil isolasi dari tanaman (Compant *et al*., 2010). Pengujian ini bertujuan mengevaluasi kemampuan mikroorganisme dalam mendukung pertumbuhan tanaman maupun menghambat patogen. Aktivitas biologis menjadi dasar penting dalam seleksi isolat unggul untuk aplikasi pertanian. Oleh karena itu, pengujian dilakukan menggunakan berbagai metode laboratorium dan rumah kaca.

Uji produksi fitohormon merupakan salah satu pengujian penting untuk mengetahui kemampuan mikroorganisme dalam merangsang pertumbuhan tanaman (Santoyo *et al*., 2016). Mikroorganisme tertentu mampu menghasilkan hormon seperti indole acetic acid (IAA), giberelin, dan sitokinin. Produksi hormon tersebut dapat diuji menggunakan media tertentu dan analisis kolorimetri. Mikroorganisme penghasil hormon berpotensi digunakan sebagai bio-stimulan tanaman.

Uji pelarutan fosfat dilakukan untuk mengetahui kemampuan mikroorganisme dalam melarutkan fosfat tidak tersedia menjadi bentuk yang dapat diserap tanaman (Vessey, 2003). Pengujian umumnya menggunakan media Pikovskaya yang mengandung fosfat tidak larut. Mikroorganisme pelarut fosfat membentuk zona bening di sekitar koloni akibat pelarutan senyawa fosfat. Aktivitas ini penting dalam meningkatkan efisiensi pemupukan fosfor pada tanaman.

Kemampuan fiksasi nitrogen biologis juga menjadi parameter penting dalam karakterisasi mikroorganisme tanaman (Bashan & de-Bashan, 2010). Mikroorganisme penambat nitrogen diuji menggunakan media bebas

nitrogen untuk melihat kemampuannya tumbuh tanpa sumber nitrogen eksternal. Selain itu, aktivitas nitrogenase dapat dianalisis menggunakan metode *acetylene reduction assay.* Mikroorganisme tersebut berpotensi mengurangi ketergantungan tanaman terhadap pupuk nitrogen sintetis.

Uji antagonisme dilakukan untuk mengetahui kemampuan mikroorganisme menghambat pertumbuhan patogen tanaman (Compant *et al*., 2005). Pengujian biasanya menggunakan metode dual culture antara mikroorganisme antagonis dan patogen pada media agar. Mikroorganisme yang memiliki aktivitas antagonistik akan menghambat pertumbuhan patogen di sekitar koloni. Aktivitas ini menunjukkan potensi mikroorganisme sebagai agen pengendali hayati.

Produksi enzim hidrolitik menjadi salah satu parameter penting dalam uji aktivitas biologis mikroorganisme (Harman *et al*., 2004). Enzim seperti kitinase, selulase, protease, dan β-1,3-glukanase berperan dalam degradasi dinding sel patogen tanaman. Pengujian dilakukan menggunakan media spesifik yang mengandung substrat tertentu. Zona bening pada media menunjukkan aktivitas enzimatik mikroorganisme.

Produksi siderofor oleh mikroorganisme dapat diuji menggunakan media Chrome Azurol Sulfonate (CAS) agar (Neilands, 1995). Mikroorganisme penghasil siderofor menyebabkan perubahan warna media akibat pengikatan ion besi. Siderofor membantu mikroorganisme memperoleh besi dari lingkungan dan menghambat pertumbuhan patogen. Aktivitas ini penting dalam mekanisme pengendalian hayati tanaman.

Uji toleransi terhadap cekaman lingkungan dilakukan untuk mengetahui kemampuan mikroorganisme bertahan pada kondisi ekstrim (Vurukonda *et al*., 016). Pengujian meliputi toleransi terhadap pH rendah, suhu tinggi, salinitas, dan kekeringan. Mikroorganisme yang toleran terhadap kondisi stres lebih berpotensi diaplikasikan pada berbagai kondisi lapangan. Oleh karena itu, uji toleransi menjadi bagian penting dalam seleksi isolat unggul.

Pengujian aktivitas biologis juga dapat dilakukan secara in planta menggunakan tanaman uji di rumah kaca atau lapangan (Backer *et al*., 2018). Mikroorganisme diinokulasikan pada tanaman untuk mengevaluasi pengaruhnya terhadap pertumbuhan, hasil, dan ketahanan tanaman terhadap penyakit. Pendekatan ini memberikan gambaran efektivitas mikroorganisme pada kondisi biologis nyata. Dengan demikian, pengujian in planta menjadi tahap penting sebelum aplikasi skala luas.

Pemahaman mengenai aktivitas biologis mikroorganisme sangat penting dalam pengembangan pupuk hayati dan biofungisida pertanian (Compant *et al*., 2010). Seleksi isolat berdasarkan aktivitas biologis membantu memperoleh mikroorganisme yang efektif dan stabil di lapangan. Selain itu, pengujian aktivitas biologis mendukung pengembangan produk mikroba yang aman dan efisien. Oleh karena itu, karakterisasi biologis menjadi bagian utama dalam penelitian mikroorganisme tanaman.

7.3.4 Pendekatan Metagenomik

Pendekatan metagenomik merupakan metode modern untuk mempelajari komunitas mikroorganisme secara langsung dari lingkungan tanpa proses kultivasi

(Handelsman, 2004). Teknik ini memungkinkan identifikasi mikroorganisme berdasarkan materi genetik yang terdapat dalam sampel lingkungan. Pendekatan metagenomik berkembang pesat karena sebagian besar mikroorganisme tidak dapat dikultur menggunakan metode konvensional. Oleh karena itu, metode ini sangat penting dalam studi mikrobioma tanaman.

Metagenomik memungkinkan analisis keragaman mikroorganisme endofitik dan filosfer secara lebih komprehensif (Bulgarelli *et al*., 2013). DNA total diekstraksi langsung dari jaringan tanaman atau permukaan daun untuk dianalisis menggunakan teknik sequencing modern. Pendekatan ini mampu mendeteksi mikroorganisme dalam jumlah kecil sekalipun. Hasilnya memberikan gambaran komunitas mikroba yang lebih mendekati kondisi alami.

Teknik sequencing berbasis *Next Generation Sequencing* (NGS) menjadi teknologi utama dalam analisis metagenomik modern (Knight *et al*., 2018). Teknologi ini memungkinkan pembacaan jutaan fragmen DNA secara simultan dalam waktu singkat. Data sequencing kemudian dianalisis menggunakan perangkat bioinformatika untuk menentukan komposisi komunitas mikroorganisme. Dengan demikian, analisis metagenomik menghasilkan data yang sangat besar dan kompleks.

Analisis gen 16S rRNA banyak digunakan dalam studi metagenomik bakteri tanaman (Janda & Abbott, 2007). Gen tersebut diamplifikasi menggunakan PCR sebelum dilakukan sequencing. Variasi urutan gen digunakan untuk menentukan identitas dan hubungan filogenetik bakteri dalam komunitas mikroba. Teknik ini membantu mempelajari struktur komunitas bakteri secara cepat dan efisien.

Daerah ITS digunakan dalam pendekatan metagenomik untuk menganalisis komunitas fungi pada tanaman (Schoch *et al*., 2012). Marker ITS memiliki tingkat variasi tinggi sehingga efektif membedakan fungi hingga tingkat spesies. Analisis ini membantu mengungkap keragaman fungi endofitik dan filosfer yang sebelumnya sulit diketahui menggunakan metode kultur. Oleh karena itu, ITS menjadi marker standar dalam studi fungi molekuler.

Pendekatan metagenomik tidak hanya digunakan untuk identifikasi mikroorganisme tetapi juga untuk mempelajari fungsi genetik komunitas mikroba (Handelsman, 2004). Analisis gen fungsional memungkinkan peneliti mengetahui potensi mikroorganisme dalam fiksasi nitrogen, produksi enzim, dan sintesis metabolit tertentu. Dengan demikian, metagenomik memberikan informasi mengenai struktur dan fungsi komunitas mikroba secara bersamaan.

Bioinformatika memiliki peran penting dalam analisis data metagenomik karena jumlah data sequencing sangat besar (Knight *et al*., 2018). Perangkat lunak tertentu digunakan untuk proses filtering, clustering, anotasi gen, dan analisis filogenetik. Database genetik seperti GenBank dan SILVA membantu proses identifikasi mikroorganisme berdasarkan urutan DNA. Oleh karena itu, analisis metagenomik membutuhkan integrasi antara biologi molekuler dan ilmu komputasi.

Pendekatan metagenomik memiliki beberapa keunggulan dibandingkan metode kultur konvensional dalam studi mikrobioma tanaman (Bulgarelli *et al*., 2013). Teknik ini mampu mendeteksi mikroorganisme *unculturable* yang tidak dapat tumbuh pada media laboratorium. Selain itu, metagenomik memberikan gambaran komunitas mikroba secara lebih lengkap dan

akurat. Keunggulan tersebut menjadikan metagenomik sebagai metode penting dalam mikrobiologi modern.

Meskipun memiliki banyak kelebihan, pendekatan metagenomik juga memiliki beberapa keterbatasan teknis dan biaya yang relatif tinggi (Knight *et al*., 2018). Analisis data membutuhkan perangkat komputer dan keahlian bioinformatika yang memadai. Selain itu, interpretasi hasil sequencing sering dipengaruhi oleh kualitas database genetik yang tersedia. Oleh karena itu, validasi hasil metagenomik tetap diperlukan menggunakan pendekatan lain.

Pemanfaatan pendekatan metagenomik sangat penting dalam pengembangan teknologi mikroba pertanian dan pemahaman mikrobioma tanaman (Handelsman, 2004). Metagenomik membantu menemukan mikroorganisme baru yang potensial sebagai pupuk hayati dan agen pengendali hayati. Selain itu, pendekatan ini mendukung pengembangan strategi pertanian berbasis mikrobioma. Dengan demikian, metagenomik menjadi salah satu bidang penting dalam bioteknologi pertanian modern.

7.4 Aplikasi dalam Pertanian Berkelanjutan

7.4.1 Pupuk Hayati dan Biofertilizer

Pupuk hayati merupakan produk yang mengandung mikroorganisme hidup yang mampu meningkatkan pertumbuhan dan produktivitas tanaman melalui mekanisme biologis tertentu (Vessey, 2003). Mikroorganisme dalam pupuk hayati dapat berupa bakteri, fungi, maupun aktinomiset yang bersifat menguntungkan bagi tanaman. Berbeda dengan pupuk kimia, pupuk hayati bekerja melalui proses biologis

alami dalam tanah dan tanaman. Oleh karena itu, pupuk hayati menjadi salah satu komponen penting dalam sistem pertanian berkelanjutan.

Mikroorganisme pada pupuk hayati mampu meningkatkan ketersediaan unsur hara bagi tanaman melalui berbagai mekanisme biologis (Compant *et al*., 2010). Beberapa mikroorganisme memfiksasi nitrogen atmosfer, sedangkan yang lain melarutkan fosfat dan kalium yang tidak tersedia bagi tanaman. Aktivitas tersebut membantu meningkatkan efisiensi pemanfaatan unsur hara di dalam tanah. Dengan demikian, penggunaan pupuk hayati dapat mengurangi ketergantungan terhadap pupuk anorganik sintetis.

Bakteri penambat nitrogen seperti *Azospirillum*, *Rhizobium*, dan *Azotobacter* banyak digunakan dalam formulasi pupuk hayati (Bashan & de-Bashan, 2010). Mikroorganisme tersebut mampu mengubah nitrogen atmosfer menjadi amonia melalui aktivitas enzim nitrogenase. Nitrogen hasil fiksasi digunakan tanaman untuk sintesis protein dan pertumbuhan vegetatif. Aktivitas ini sangat penting terutama pada lahan dengan kandungan nitrogen rendah.

Mikroorganisme pelarut fosfat memiliki peran penting dalam meningkatkan efisiensi penggunaan fosfor oleh tanaman (Rodríguez & Fraga, 1999). Fosfor di dalam tanah sering berada dalam bentuk tidak larut sehingga sulit diserap akar tanaman. Mikroorganisme pelarut fosfat menghasilkan asam organik dan enzim fosfatase yang membantu melarutkan senyawa fosfat tersebut. Dengan demikian, ketersediaan fosfor bagi tanaman dapat meningkat secara alami.

Fungi mikoriza arbuskular merupakan salah satu komponen penting pupuk hayati yang banyak digunakan dalam pertanian (Smith & Read, 2008). Mikoriza

membentuk simbiosis dengan akar tanaman dan membantu meningkatkan penyerapan air serta unsur hara terutama fosfor. Selain itu, mikoriza membantu meningkatkan toleransi tanaman terhadap cekaman lingkungan. Hubungan mutualistik ini mendukung efisiensi pertumbuhan tanaman secara keseluruhan.

Mikroorganisme dalam pupuk hayati juga mampu menghasilkan fitohormon yang merangsang pertumbuhan tanaman (Santoyo *et al*., 2016). Hormon seperti indole acetic acid (IAA), sitokinin, dan giberelin membantu meningkatkan perkembangan akar dan pembelahan sel tanaman. Pertumbuhan akar yang lebih baik meningkatkan kemampuan tanaman menyerap unsur hara dan air. Oleh karena itu, pupuk hayati tidak hanya meningkatkan nutrisi tetapi juga merangsang pertumbuhan tanaman secara fisiologis.

Formulasi pupuk hayati dapat dibuat dalam bentuk cair, serbuk, granul, maupun mikroenkapsulasi sesuai kebutuhan aplikasi pertanian (Backer *et al*., 2018). Setiap formulasi memiliki kelebihan dan keterbatasan dalam mempertahankan viabilitas mikroorganisme selama penyimpanan. Formulasi yang baik harus mampu menjaga populasi mikroorganisme tetap stabil hingga waktu aplikasi. Oleh karena itu, teknologi formulasi menjadi faktor penting dalam pengembangan pupuk hayati.

Penggunaan pupuk hayati memberikan manfaat ekologis karena membantu menjaga keseimbangan mikrobiota tanah dan mengurangi pencemaran lingkungan (Tilman *et al*., 2002). Pengurangan penggunaan pupuk kimia dapat menurunkan risiko degradasi tanah dan pencemaran air akibat residu pupuk sintetis. Selain itu, pupuk hayati mendukung peningkatan bahan organik dan aktivitas biologis tanah.

Kondisi tersebut penting dalam menjaga kesuburan tanah jangka panjang.

Efektivitas pupuk hayati dipengaruhi oleh kondisi lingkungan, jenis tanaman, dan kemampuan adaptasi mikroorganisme (Compant *et al*., 2010). Faktor seperti suhu, pH tanah, kelembapan, dan kandungan bahan organik menentukan keberhasilan kolonisasi mikroorganisme pada tanaman. Oleh karena itu, pemilihan isolat mikroba harus disesuaikan dengan kondisi agroekosistem setempat. Pendekatan tersebut membantu meningkatkan keberhasilan aplikasi pupuk hayati di lapangan.

Pengembangan pupuk hayati menjadi salah satu strategi penting dalam mendukung pertanian berkelanjutan dan ramah lingkungan (Backer *et al*., 2018). Pemanfaatan mikroorganisme dapat membantu meningkatkan produktivitas tanaman sekaligus menjaga kualitas lingkungan pertanian. Selain itu, pupuk hayati mendukung efisiensi penggunaan input pertanian secara lebih ekonomis. Dengan demikian, pupuk hayati memiliki prospek besar dalam sistem pertanian masa depan.

7.4.2 Peningkatan Produktivitas Tanaman

Mikroorganisme tanaman memiliki peran penting dalam meningkatkan pertumbuhan dan produktivitas tanaman budidaya (Vessey, 2003). Mikroorganisme tersebut membantu tanaman melalui peningkatan penyerapan unsur hara, produksi fitohormon, dan perlindungan terhadap patogen. Interaksi ini mendukung pertumbuhan tanaman secara lebih optimal. Oleh karena itu, mikroorganisme banyak dimanfaatkan dalam teknologi pertanian modern.

Mikroorganisme mampu meningkatkan perkembangan sistem perakaran tanaman sehingga penyerapan air dan unsur hara menjadi lebih efisien (Santoyo *et al*., 2016). Produksi hormon seperti indole acetic acid (IAA) membantu merangsang pembentukan akar lateral dan rambut akar. Sistem perakaran yang lebih luas meningkatkan kemampuan tanaman memperoleh nutrisi dari tanah. Kondisi tersebut berpengaruh langsung terhadap pertumbuhan dan hasil tanaman.

Bakteri penambat nitrogen membantu meningkatkan produktivitas tanaman dengan menyediakan nitrogen biologis bagi tanaman (Bashan & de-Bashan, 2010). Nitrogen merupakan unsur penting dalam pembentukan protein dan klorofil tanaman. Ketersediaan nitrogen yang cukup meningkatkan aktivitas fotosintesis dan pertumbuhan vegetatif tanaman. Dengan demikian, aktivitas mikroorganisme membantu meningkatkan hasil tanaman secara alami.

Mikroorganisme pelarut fosfat juga berperan penting dalam meningkatkan efisiensi penggunaan fosfor oleh tanaman (Rodríguez & Fraga, 1999). Fosfor sangat penting dalam pembentukan energi dan perkembangan akar tanaman. Mikroorganisme membantu melarutkan fosfat yang tidak tersedia menjadi bentuk yang mudah diserap tanaman. Aktivitas tersebut mendukung pertumbuhan dan pembentukan hasil tanaman yang lebih baik.

Mikroorganisme endofitik dan filosfer membantu meningkatkan kesehatan tanaman melalui pengendalian patogen secara biologis (Compant *et al*., 2005). Tanaman yang terlindungi dari penyakit memiliki kemampuan pertumbuhan yang lebih baik dibandingkan tanaman terinfeksi patogen. Selain itu, pengurangan kerusakan

jaringan tanaman membantu mempertahankan aktivitas fotosintesis secara optimal. Kondisi tersebut berdampak positif terhadap produktivitas tanaman.

Penggunaan mikroorganisme dapat meningkatkan kualitas hasil pertanian selain meningkatkan kuantitas produksi tanaman (Backer *et al*., 2018). Beberapa penelitian menunjukkan peningkatan kandungan protein, vitamin, dan metabolit tertentu pada tanaman yang diinokulasi mikroorganisme menguntungkan. Selain itu, mikroorganisme tertentu membantu meningkatkan ukuran dan keseragaman hasil panen. Hal ini menunjukkan bahwa mikroorganisme memiliki pengaruh luas terhadap kualitas tanaman.

Mikroorganisme juga membantu meningkatkan toleransi tanaman terhadap cekaman lingkungan yang dapat menurunkan hasil tanaman (Vurukonda *et al*., 2016). Tanaman yang lebih toleran terhadap kekeringan, salinitas, dan suhu ekstrem cenderung memiliki produktivitas lebih stabil. Mikroorganisme membantu tanaman mempertahankan aktivitas metabolik selama kondisi stres. Oleh karena itu, pemanfaatan mikroorganisme penting dalam menghadapi perubahan iklim.

Efektivitas mikroorganisme dalam meningkatkan produktivitas tanaman dipengaruhi oleh jenis tanaman dan kondisi lingkungan (Compant *et al*., 2010). Tidak semua mikroorganisme memberikan respons yang sama pada setiap komoditas pertanian. Faktor lingkungan seperti suhu, pH tanah, dan kelembapan juga memengaruhi keberhasilan kolonisasi mikroorganisme. Oleh karena itu, pemilihan isolat mikroba harus mempertimbangkan kondisi agroekosistem setempat.

Penggunaan mikroorganisme dalam budidaya tanaman membantu mengurangi ketergantungan terhadap input kimia sintetis (Tilman *et al*., 2002). Pengurangan penggunaan pupuk dan pestisida kimia membantu menekan biaya produksi serta mengurangi pencemaran lingkungan. Selain itu, aktivitas biologis mikroorganisme membantu menjaga kesehatan tanah dalam jangka panjang. Pendekatan ini mendukung sistem produksi pertanian yang lebih berkelanjutan.

Pemanfaatan mikroorganisme untuk meningkatkan produktivitas tanaman memiliki prospek besar dalam mendukung ketahanan pangan global (Backer *et al*., 2018). Teknologi berbasis mikroba dapat membantu meningkatkan hasil pertanian secara ramah lingkungan dan ekonomis. Selain itu, mikroorganisme mendukung stabilitas produksi pada kondisi lingkungan yang berubah. Dengan demikian, mikroorganisme menjadi komponen penting dalam pertanian masa depan.

7.4.3 Tantangan dan Prospek Masa Depan

Pengembangan teknologi mikroorganisme untuk pertanian berkelanjutan menghadapi berbagai tantangan ilmiah dan teknis di lapangan (Backer *et al*., 2018). Meskipun banyak penelitian menunjukkan potensi mikroorganisme dalam meningkatkan pertumbuhan tanaman, efektivitas aplikasi di lapangan sering bervariasi. Variasi kondisi lingkungan menjadi salah satu penyebab utama ketidakstabilan performa mikroorganisme. Oleh karena itu, diperlukan pendekatan yang lebih adaptif dalam pengembangan teknologi mikroba pertanian.

Salah satu tantangan utama adalah kemampuan mikroorganisme untuk bertahan hidup dan berkolonisasi pada lingkungan lapangan yang kompleks

(Compant *et al*., 2010). Mikroorganisme harus mampu bersaing dengan mikroba asli tanah dan tanaman yang sudah ada sebelumnya. Selain itu, kondisi suhu, kelembapan, dan pH tanah dapat memengaruhi viabilitas mikroorganisme inokulan. Kondisi tersebut menyebabkan efektivitas mikroorganisme sering berbeda antara laboratorium dan lapangan.

Teknologi formulasi menjadi faktor penting dalam menjaga stabilitas dan viabilitas mikroorganisme selama penyimpanan dan aplikasi (Backer *et al*., 2018). Mikroorganisme hidup sangat sensitif terhadap perubahan suhu dan kelembapan selama distribusi produk. Oleh karena itu, pengembangan carrier dan teknik mikroenkapsulasi menjadi fokus penting dalam industri pupuk hayati. Formulasi yang baik membantu mempertahankan populasi mikroorganisme hingga waktu aplikasi.

Kurangnya pemahaman mengenai interaksi kompleks antara tanaman, mikroorganisme, dan lingkungan masih menjadi tantangan dalam pengembangan bioinokulan (Bulgarelli *et al*., 2013). Komunitas mikroba tanaman terdiri atas berbagai spesies yang saling berinteraksi secara dinamis. Introduksi mikroorganisme tertentu dapat memengaruhi keseimbangan komunitas mikroba alami. Oleh sebab itu, pendekatan berbasis mikrobioma menjadi penting dalam penelitian masa depan.

Perkembangan teknologi molekuler dan metagenomik membuka peluang besar dalam eksplorasi mikroorganisme baru yang potensial untuk pertanian (Handelsman, 2004). Teknik sequencing modern memungkinkan identifikasi mikroorganisme unculturable yang sebelumnya sulit dipelajari. Selain itu, analisis genetik membantu memahami fungsi biologis

mikroorganisme secara lebih mendalam. Teknologi ini mempercepat pengembangan produk mikroba yang lebih efektif.

Pendekatan konsorsium mikroorganisme mulai dikembangkan untuk meningkatkan efektivitas aplikasi mikroba di lapangan (Bashan *et al*., 2014). Penggunaan beberapa jenis mikroorganisme sekaligus diharapkan memberikan efek sinergis terhadap pertumbuhan dan kesehatan tanaman. Konsorsium mikroba dapat meningkatkan stabilitas fungsi biologis pada berbagai kondisi lingkungan. Oleh karena itu, pendekatan ini memiliki prospek besar dalam teknologi biofertilizer modern.

Perubahan iklim global meningkatkan kebutuhan terhadap teknologi pertanian yang mampu mendukung ketahanan tanaman terhadap cekaman lingkungan (Naylor & Coleman-Derr, 2017). Mikroorganisme tanaman berpotensi membantu tanaman bertahan pada kondisi kekeringan, salinitas, dan suhu ekstrem. Pengembangan mikroorganisme toleran stres menjadi strategi penting dalam menghadapi perubahan iklim. Dengan demikian, mikroorganisme memiliki peran strategis dalam pertanian masa depan.

Aspek regulasi dan standardisasi produk mikroba juga menjadi tantangan dalam pengembangan industri biofertilizer dan biofungisida (Malusá & Vassilev, 2014). Produk mikroba harus memenuhi standar keamanan, efektivitas, dan stabilitas sebelum dipasarkan secara luas. Selain itu, proses registrasi produk biologis sering membutuhkan waktu dan biaya yang besar. Oleh karena itu, dukungan kebijakan pemerintah sangat penting dalam pengembangan industri mikroba pertanian.

Peningkatan kesadaran masyarakat terhadap pertanian ramah lingkungan menjadi peluang besar bagi pengembangan teknologi mikroorganisme pertanian (Tilman *et al*., 2002). Permintaan terhadap produk pertanian yang aman dan rendah residu kimia terus meningkat. Kondisi tersebut mendorong penggunaan pupuk hayati dan agen hayati dalam sistem budidaya tanaman. Dengan demikian, teknologi mikroorganisme memiliki potensi ekonomi yang besar di masa depan.

Pemanfaatan mikroorganisme dalam pertanian berkelanjutan memiliki prospek yang sangat luas seiring perkembangan ilmu mikrobiologi dan bioteknologi modern (Backer *et al*., 2018). Integrasi teknologi molekuler, bioinformatika, dan formulasi mikroba akan meningkatkan efektivitas aplikasi mikroorganisme di lapangan. Selain mendukung produktivitas tanaman, teknologi ini membantu menjaga keseimbangan ekosistem pertanian. Oleh karena itu, mikroorganisme diperkirakan menjadi salah satu komponen utama pertanian masa depan.

7.5 Tantangan dan Prospek Penelitian

7.5.1 Tantangan Penelitian Mikroorganisme Endofitik dan Filosfer

Penelitian mengenai mikroorganisme endofitik dan filosfer berkembang sangat pesat, namun masih menghadapi berbagai tantangan ilmiah dan teknis yang kompleks (Bulgarelli *et al*., 2013). Kompleksitas komunitas mikroba tanaman menyebabkan banyak aspek interaksi mikroorganisme dengan tanaman belum sepenuhnya dipahami. Selain itu, keragaman mikroorganisme yang sangat tinggi menyulitkan proses identifikasi dan karakterisasi secara menyeluruh. Oleh

karena itu, penelitian di bidang ini masih terus berkembang hingga saat ini.

Salah satu tantangan utama dalam penelitian mikroorganisme tanaman adalah tingginya proporsi mikroorganisme yang tidak dapat dikultur menggunakan metode laboratorium konvensional (Handelsman, 2004). Banyak mikroorganisme memerlukan kondisi lingkungan khusus yang sulit direplikasi secara in vitro. Akibatnya, sebagian besar komunitas mikroba tanaman belum dapat dipelajari secara mendalam menggunakan pendekatan kultur biasa. Kondisi tersebut menyebabkan informasi mengenai fungsi biologis banyak mikroorganisme masih terbatas.

Variasi komunitas mikroorganisme antar spesies tanaman dan lingkungan menjadi tantangan besar dalam interpretasi hasil penelitian (Lindow & Brandl, 2003). Komposisi mikroorganisme dapat berubah tergantung jenis tanaman, varietas, umur tanaman, kondisi tanah, dan iklim. Selain itu, faktor musim dan lokasi geografis turut memengaruhi struktur komunitas mikroba tanaman. Variasi tersebut menyebabkan hasil penelitian sering sulit digeneralisasi untuk berbagai kondisi agroekosistem.

Teknik isolasi dan identifikasi mikroorganisme masih memiliki berbagai keterbatasan metodologis (Hallmann *et al*., 2006). Metode kultur konvensional sering hanya mampu mendeteksi sebagian kecil komunitas mikroba yang sebenarnya terdapat pada tanaman. Sementara itu, metode molekuler memerlukan biaya tinggi dan kemampuan analisis bioinformatika yang memadai. Oleh karena itu, kombinasi beberapa metode sering diperlukan untuk memperoleh data yang lebih akurat.

Kontaminasi sampel menjadi salah satu masalah penting dalam penelitian mikroorganisme endofitik dan filosfer (Schulz *et al*., 1993). Mikroorganisme epifit pada permukaan tanaman dapat memengaruhi hasil isolasi mikroorganisme endofitik apabila proses sterilisasi permukaan tidak dilakukan dengan baik. Selain itu, kontaminasi silang selama proses laboratorium juga dapat menyebabkan kesalahan identifikasi mikroorganisme. Kondisi ini menuntut penerapan prosedur aseptik yang sangat ketat dalam penelitian.

Analisis data metagenomik menjadi tantangan tersendiri karena menghasilkan data sequencing dalam jumlah sangat besar (Knight *et al*., 2018). Pengolahan data membutuhkan perangkat lunak bioinformatika serta kemampuan interpretasi data molekuler yang kompleks. Selain itu, hasil analisis sangat bergantung pada kualitas database genetik yang tersedia. Keterbatasan data referensi menyebabkan sebagian mikroorganisme belum dapat diidentifikasi secara tepat.

Pemahaman mengenai mekanisme interaksi antara tanaman dan mikroorganisme masih menjadi tantangan penting dalam penelitian modern (Hardoim *et al*., 2015). Interaksi tersebut melibatkan komunikasi kimia, regulasi gen, dan respons fisiologis yang sangat kompleks. Banyak mekanisme kolonisasi dan adaptasi mikroorganisme dalam jaringan tanaman belum diketahui secara detail. Oleh karena itu, penelitian multidisiplin sangat diperlukan untuk memahami hubungan tersebut secara menyeluruh.

Efektivitas mikroorganisme hasil penelitian di laboratorium sering tidak konsisten ketika diaplikasikan di lapangan (Backer *et al*., 2018). Kondisi lingkungan alami yang lebih kompleks dapat memengaruhi kemampuan kolonisasi dan aktivitas biologis

mikroorganisme. Kompetisi dengan mikroorganisme asli lingkungan juga dapat mengurangi efektivitas inokulan mikroba. Hal ini menjadi tantangan besar dalam pengembangan produk mikroba komersial.

Aspek regulasi dan standardisasi penelitian mikroorganisme pertanian juga masih menjadi kendala di berbagai negara (Malusá & Vassilev, 2014). Pengembangan produk berbasis mikroba memerlukan pengujian keamanan, efektivitas, dan stabilitas yang ketat sebelum dapat digunakan secara luas. Selain itu, prosedur registrasi produk biologis sering memerlukan biaya dan waktu yang cukup besar. Kondisi ini dapat memperlambat pengembangan teknologi mikroorganisme untuk pertanian.

Keterbatasan integrasi antara penelitian dasar dan aplikasi lapangan menjadi tantangan dalam pengembangan teknologi mikroorganisme tanaman (Compant *et al*., 2010). Banyak penelitian masih berfokus pada identifikasi mikroorganisme tanpa pengujian aplikatif di lapangan. Padahal, keberhasilan teknologi mikroba sangat bergantung pada kemampuan penerapan secara nyata dalam sistem pertanian. Oleh karena itu, kolaborasi antara peneliti, industri, dan sektor pertanian sangat diperlukan.

Perubahan iklim global juga menjadi tantangan baru dalam penelitian mikroorganisme tanaman (Naylor & Coleman-Derr, 2017). Perubahan suhu, pola curah hujan, dan kondisi lingkungan dapat memengaruhi stabilitas komunitas mikroba tanaman. Selain itu, stres lingkungan dapat mengubah hubungan simbiosis antara tanaman dan mikroorganisme. Kondisi tersebut memerlukan penelitian lebih lanjut mengenai adaptasi mikrobioma tanaman terhadap perubahan iklim.

Meskipun menghadapi banyak tantangan, penelitian mikroorganisme endofitik dan filosfer tetap memiliki potensi besar untuk mendukung pertanian berkelanjutan (Bulgarelli *et al*., 2013). Perkembangan teknologi molekuler dan bioinformatika membuka peluang baru untuk memahami mikrobioma tanaman secara lebih mendalam. Selain itu, meningkatnya kebutuhan terhadap teknologi pertanian ramah lingkungan mendorong perkembangan penelitian mikroorganisme tanaman. Dengan demikian, tantangan yang ada sekaligus menjadi peluang bagi pengembangan ilmu mikrobiologi pertanian di masa depan.

7.5.2 Arah Penelitian dan Inovasi Masa Depan

Perkembangan teknologi molekuler dan bioteknologi membuka peluang besar bagi penelitian mikroorganisme endofitik dan filosfer di masa depan (Handelsman, 2004). Penelitian modern tidak hanya berfokus pada identifikasi mikroorganisme tetapi juga memahami fungsi biologis dan interaksinya secara menyeluruh. Pendekatan multidisiplin mulai digunakan untuk mengintegrasikan mikrobiologi, genomik, fisiologi tanaman, dan bioinformatika. Oleh karena itu, arah penelitian mikroorganisme tanaman menjadi semakin kompleks dan inovatif.

Pendekatan metagenomik diperkirakan akan menjadi salah satu fokus utama penelitian mikrobioma tanaman di masa depan (Knight *et al*., 2018). Teknologi sequencing modern memungkinkan analisis komunitas mikroorganisme secara lebih cepat dan akurat. Peneliti dapat mempelajari mikroorganisme unculturable yang sebelumnya sulit diidentifikasi menggunakan metode konvensional. Dengan demikian, pemahaman mengenai keragaman mikrobioma tanaman akan semakin meningkat.

Analisis multi-omics mulai banyak digunakan untuk memahami fungsi dan aktivitas mikroorganisme tanaman secara lebih mendalam (Hardoim *et al*., 2015). Pendekatan ini mengintegrasikan genomik, transkriptomik, proteomik, dan metabolomik dalam satu sistem analisis. Teknologi tersebut membantu mengungkap mekanisme molekuler interaksi antara tanaman dan mikroorganisme. Selain itu, multi-omics memungkinkan identifikasi gen dan metabolit yang berperan dalam pertumbuhan tanaman dan ketahanan terhadap stres.

Penelitian mengenai komunikasi kimia antara tanaman dan mikroorganisme diperkirakan akan berkembang pesat pada masa mendatang (Venturi & Keel, 2016). Molekul sinyal seperti quorum sensing dan metabolit sekunder berperan penting dalam kolonisasi mikroorganisme pada tanaman. Pemahaman terhadap komunikasi tersebut dapat digunakan untuk meningkatkan efektivitas mikroorganisme menguntungkan dalam pertanian. Oleh karena itu, studi signaling mikroba menjadi salah satu bidang penting dalam mikrobiologi tanaman modern.

Pengembangan konsorsium mikroorganisme menjadi arah penelitian yang menjanjikan untuk meningkatkan stabilitas aplikasi mikroba di lapangan (Bashan *et al*., 2014). Konsorsium mikroba terdiri atas beberapa jenis mikroorganisme yang bekerja secara sinergis mendukung pertumbuhan tanaman. Pendekatan ini diharapkan lebih efektif dibandingkan penggunaan isolat tunggal karena mampu menjalankan berbagai fungsi biologis secara bersamaan. Selain itu, konsorsium mikroba lebih adaptif terhadap perubahan kondisi lingkungan.

Eksplorasi mikroorganisme lokal dari berbagai ekosistem menjadi peluang penting dalam pengembangan bioinokulan spesifik lokasi (Compant *et al*.,2010). Mikroorganisme indigenous umumnya memiliki kemampuan adaptasi yang lebih baik terhadap kondisi lingkungan setempat. Penggunaan mikroorganisme lokal juga membantu meningkatkan keberhasilan kolonisasi dan efektivitas aplikasi di lapangan. Oleh karena itu, eksplorasi biodiversitas mikroba lokal menjadi prioritas penelitian di berbagai negara.

Teknologi rekayasa genetika dan synthetic biology mulai digunakan untuk meningkatkan fungsi biologis mikroorganisme tanaman (Singh *et al*., 2020). Teknik tersebut memungkinkan modifikasi gen mikroorganisme untuk meningkatkan kemampuan fiksasi nitrogen, produksi hormon, atau ketahanan terhadap cekaman lingkungan. Selain itu, synthetic biology membuka peluang pengembangan mikroorganisme dengan fungsi spesifik sesuai kebutuhan pertanian. Namun demikian, aspek biosafety dan regulasi tetap menjadi perhatian penting dalam penerapan teknologi ini.

Penelitian mengenai peran mikroorganisme dalam meningkatkan toleransi tanaman terhadap perubahan iklim diperkirakan akan semakin penting pada masa depan (Naylor & Coleman-Derr, 2017). Mikroorganisme tertentu diketahui mampu membantu tanaman bertahan pada kondisi kekeringan, salinitas, dan suhu ekstrem. Pemanfaatan mikroorganisme tersebut menjadi strategi potensial dalam mendukung ketahanan pangan global. Oleh karena itu, penelitian mikrobioma tanaman terkait perubahan iklim terus meningkat.

Pemanfaatan kecerdasan buatan dan analisis big data mulai diterapkan dalam penelitian mikrobioma tanaman modern (Knight *et al*., 2018). Teknologi ini membantu menganalisis data sequencing dalam jumlah besar untuk menemukan pola hubungan antara mikroorganisme dan tanaman. Selain itu, machine learning dapat digunakan untuk memprediksi fungsi biologis mikroorganisme tertentu. Pendekatan tersebut mempercepat proses eksplorasi dan pengembangan teknologi mikroba pertanian.

Kolaborasi multidisiplin antara mikrobiologi, agronomi, bioteknologi, dan ilmu komputer menjadi faktor penting dalam perkembangan penelitian masa depan (Hardoim *et al*., 2015). Kompleksitas sistem mikrobioma tanaman memerlukan pendekatan integratif dari berbagai bidang ilmu. Selain itu, kerja sama antara perguruan tinggi, industri, dan pemerintah penting untuk mempercepat hilirisasi hasil penelitian. Dengan demikian, inovasi teknologi mikroorganisme dapat lebih cepat diterapkan dalam sistem pertanian.

Pengembangan teknologi formulasi dan delivery system mikroorganisme menjadi fokus penting dalam penelitian aplikatif (Backer *et al*., 2018). Teknologi seperti mikroenkapsulasi dan carrier berbasis biomaterial dikembangkan untuk meningkatkan viabilitas dan efektivitas mikroorganisme. Formulasi yang baik membantu menjaga stabilitas mikroba selama penyimpanan dan aplikasi di lapangan. Oleh karena itu, inovasi formulasi memiliki peran besar dalam keberhasilan produk mikroba komersial.

Prospek penelitian mikroorganisme endofitik dan filosfer sangat besar dalam mendukung pertanian berkelanjutan dan keamanan pangan global (Bulgarelli *et al*., 2013). Perkembangan ilmu pengetahuan dan

teknologi memungkinkan eksplorasi mikroorganisme secara lebih mendalam dibandingkan sebelumnya. Selain meningkatkan produktivitas tanaman, penelitian mikrobioma tanaman berpotensi membantu mengatasi berbagai tantangan lingkungan pertanian modern. Dengan demikian, penelitian mikroorganisme tanaman diperkirakan akan terus berkembang pesat di masa depan.

Mikroorganisme endofitik dan filosfer merupakan komponen penting dalam mikrobioma tanaman yang memiliki peran besar dalam menjaga keseimbangan ekosistem pertanian dan mendukung pertumbuhan tanaman secara alami (Bulgarelli *et al*., 2013). Mikroorganisme endofitik hidup di dalam jaringan tanaman tanpa menimbulkan gejala penyakit, sedangkan mikroorganisme filosfer hidup pada permukaan daun dan bagian tanaman yang berada di atas permukaan tanah. Kedua kelompok mikroorganisme tersebut membentuk hubungan interaktif yang kompleks dengan tanaman inangnya. Interaksi tersebut dapat bersifat mutualistik dan memberikan berbagai manfaat biologis bagi tanaman.

Mikroorganisme endofitik dan filosfer berperan penting dalam meningkatkan ketersediaan unsur hara bagi tanaman melalui berbagai mekanisme biologis (Compant *et al*., 2010). Beberapa mikroorganisme mampu memfiksasi nitrogen atmosfer, melarutkan fosfat, serta menghasilkan senyawa pengkelat besi seperti siderofor. Aktivitas tersebut membantu meningkatkan efisiensi penyerapan unsur hara oleh tanaman. Dengan demikian, mikroorganisme tanaman berkontribusi terhadap peningkatan kesuburan tanah dan efisiensi penggunaan pupuk.

Produksi fitohormon oleh mikroorganisme menjadi salah satu mekanisme utama dalam mendukung pertumbuhan tanaman (Santoyo *et al*, 2016).

Mikroorganisme tertentu mampu menghasilkan hormon seperti indole acetic acid (IAA), giberelin, dan sitokinin yang berperan dalam perkembangan akar dan pertumbuhan vegetatif tanaman. Sistem perakaran yang lebih baik meningkatkan kemampuan tanaman menyerap air dan unsur hara. Oleh karena itu, keberadaan mikroorganisme menguntungkan sangat penting dalam mendukung pertumbuhan tanaman secara optimal.

Mikroorganisme endofitik dan filosfer juga berperan dalam meningkatkan ketahanan tanaman terhadap serangan patogen melalui berbagai mekanisme biologis (Compant *et al*., 2005). Mikroorganisme tersebut dapat menghasilkan antibiotik, enzim hidrolitik, dan metabolit sekunder yang menghambat perkembangan patogen tanaman. Selain itu, beberapa mikroorganisme mampu menginduksi resistensi sistemik tanaman sehingga tanaman lebih siap menghadapi infeksi penyakit. Aktivitas tersebut membantu mengurangi ketergantungan terhadap pestisida kimia sintetis.

Peran mikroorganisme dalam membantu tanaman menghadapi cekaman lingkungan menjadi semakin penting di tengah perubahan iklim global (Naylor & Coleman-Derr, 2017). Mikroorganisme tertentu diketahui mampu meningkatkan toleransi tanaman terhadap kekeringan, salinitas, suhu ekstrem, dan cekaman oksidatif. Mikroorganisme membantu tanaman mempertahankan aktivitas fisiologis dan metabolisme selama kondisi stres. Dengan demikian, mikroorganisme memiliki potensi besar dalam mendukung stabilitas produksi pertanian pada kondisi lingkungan yang berubah.

Kemajuan teknologi molekuler dan pendekatan metagenomik telah memperluas pemahaman mengenai keragaman dan fungsi mikroorganisme tanaman (Handelsman, 2004). Teknologi sequencing modern memungkinkan identifikasi komunitas mikroorganisme

secara lebih komprehensif termasuk mikroorganisme yang tidak dapat dikultur menggunakan metode konvensional. Selain itu, pendekatan multi-omics membantu memahami interaksi molekuler antara tanaman dan mikroorganisme secara lebih mendalam. Perkembangan teknologi ini membuka peluang besar dalam eksplorasi mikroorganisme potensial untuk pertanian.

Pemanfaatan mikroorganisme endofitik dan filosfer dalam bentuk pupuk hayati, biofertilizer, dan agen pengendali hayati memiliki prospek yang sangat menjanjikan untuk mendukung pertanian berkelanjutan (Backer *et al*., 2018). Penggunaan mikroorganisme dapat membantu meningkatkan produktivitas tanaman sekaligus menjaga kesehatan lingkungan pertanian. Selain itu, teknologi mikroba dapat membantu mengurangi penggunaan pupuk dan pestisida sintetis yang berpotensi mencemari lingkungan. Pendekatan ini mendukung sistem pertanian yang lebih ramah lingkungan dan efisien.

Meskipun memiliki potensi besar, pengembangan teknologi mikroorganisme tanaman masih menghadapi berbagai tantangan ilmiah dan teknis (Bulgarelli *et al*., 2013). Stabilitas mikroorganisme di lapangan, interaksi dengan mikrobiota asli, serta efektivitas formulasi masih memerlukan penelitian lebih lanjut. Selain itu, diperlukan integrasi antara penelitian dasar, teknologi formulasi, dan aplikasi lapangan agar teknologi mikroba dapat diterapkan secara luas. Oleh karena itu, penelitian multidisiplin menjadi sangat penting dalam pengembangan teknologi mikroorganisme pertanian.

Pengembangan bioinput berbasis mikroorganisme diperkirakan akan menjadi salah satu komponen utama pertanian masa depan (Singh *et al*., 2020). Meningkatnya kebutuhan terhadap sistem pertanian berkelanjutan dan rendah residu kimia mendorong pemanfaatan teknologi

biologis dalam budidaya tanaman. Selain itu, eksplorasi biodiversitas mikroba lokal membuka peluang pengembangan produk bioinput spesifik lokasi yang lebih adaptif terhadap kondisi lingkungan setempat. Kondisi tersebut memberikan peluang ekonomi dan ekologis yang besar dalam sektor pertanian.

Secara keseluruhan, mikroorganisme endofitik dan filosfer memiliki kontribusi yang sangat penting terhadap kesehatan tanaman, produktivitas pertanian, dan keberlanjutan agroekosistem (Compant *et al*., 2010). Perkembangan ilmu mikrobiologi, bioteknologi, dan bioinformatika akan terus memperluas pemahaman mengenai fungsi mikroorganisme tanaman di masa depan. Dengan dukungan penelitian yang berkelanjutan, mikroorganisme tanaman berpotensi menjadi solusi biologis utama dalam menghadapi tantangan pertanian modern. Oleh karena itu, pemanfaatan mikroorganisme endofitik dan filosfer menjadi langkah strategis dalam mewujudkan pertanian berkelanjutan dan ketahanan pangan global.

DAFTAR PUSTAKA

Arnold AE, Mejía LC, Kyllo D, Rojas EI, Maynard Z, Robbins N, Herre EA. 2003. Fungal endophytes limit pathogen damage in a tropical tree. *Proceedings of the National Academy of Sciences USA* 100(26):15649–15654.

Atlas RM. 2010. *Handbook of Microbiological Media*. 4th ed. CRC Press, Boca Raton.

Backer R, Rokem JS, Ilangumaran G, Lamont J, Praslickova D, Ricci E, Subramanian S, Smith DL. 2018. Plant growth-promoting rhizobacteria: Context, mechanisms of action, and roadmap to commercialization of biostimulants for sustainable agriculture. *Frontiers in Plant Science* 9:1473.

Bashan Y, de-Bashan LE. 2010. How the plant growth-promoting bacterium *Azospirillum* promotes plant growth — A critical assessment. *Advances in Agronomy* 108:77–136.

Bashan Y, Kamnev AA, de-Bashan LE. 2014. A proposal for isolating and testing phosphate-solubilizing bacteria that enhance plant growth. *Biology and Fertility of Soils* 49:1–2.

Berendsen RL, Pieterse CMJ, Bakker P. 2012. The rhizosphere microbiome and plant health. *Trends in Plant Science* 17(8):478–486.

Bulgarelli D, Schlaeppi K, Spaepen S, van Themaat EVL, Schulze-Lefert P. 2013. Structure and functions of the bacterial microbiota of plants. *Annual Review of Plant Biology* 64:807–838.

Cappuccino JG, Sherman N. 2014. *Microbiology: A Laboratory Manual*. 10th ed. Pearson Education, Boston.

Compant S, Clément C, Sessitsch A. 2010. Plant growth-promoting bacteria in the rhizo- and endosphere of plants: Their role, colonization, mechanisms involved and prospects for utilization. *Soil Biology and Biochemistry* 42(5):669–678.

Compant S, Duffy B, Nowak J, Clément C, Barka EA. 2005. Use of plant growth-promoting bacteria for biocontrol of plant diseases: Principles, mechanisms of action, and future prospects. *Applied and Environmental Microbiology* 71(9):4951–4959.

Danhorn T, Fuqua C. 2007. Biofilm formation by plant-associated bacteria. *Annual Review of Microbiology* 61:401–422.

Durrant WE, Dong X. 2004. Systemic acquired resistance. *Annual Review of Phytopathology* 42:185–209.

Egamberdieva D, Wirth SJ, Alqarawi AA, Abd_Allah EF, Hashem A. 2017. Phytohormones and beneficial microbes: Essential components for plants to balance stress and fitness. *Frontiers in Microbiology* 8:2104.

Fonseca Á, Inácio J. 2006. Phylloplane yeasts. In: Rosa C, Péter G (eds). *Biodiversity and Ecophysiology of Yeasts*. Springer, Berlin. pp. 263–301.

Hallmann J, Quadt-Hallmann A, Mahaffee WF, Kloepper JW. 1997. Bacterial endophytes in agricultural crops. *Canadian Journal of Microbiology* 43(10):895–914.

Handelsman J. 2004. Metagenomics: Application of genomics to uncultured microorganisms. *Microbiology and Molecular Biology Reviews* 68(4):669–685.

Hardoim PR, van Overbeek LS, Berg G, Pirttilä AM, Compant S, Campisano A, Döring M, Sessitsch A. 2015. The hidden world within plants: Ecological and evolutionary considerations for defining functioning of microbial

endophytes. *Microbiology and Molecular Biology Reviews* 79(3):293–320.

Harman GE, Howell CR, Viterbo A, Chet I, Lorito M. 2004. *Trichoderma* species—Opportunistic, avirulent plant symbionts. *Nature Reviews Microbiology* 2(1):43–56.

Janda JM, Abbott SL. 2007. 16S rRNA gene sequencing for bacterial identification in the diagnostic laboratory. *Journal of Clinical Microbiology* 45(9):2761–2764.

Kloepper JW, Ryu CM, Zhang S. 2004. Induced systemic resistance and promotion of plant growth by *Bacillus* spp. *Phytopathology* 94(11):1259–1266.

Knief C, Delmotte N, Chaffron S, Stark M, Innerebner G, Wassmann R, von Mering C, Vorholt JA. 2010. Metaproteogenomic analysis of microbial communities in the phyllosphere and rhizosphere of rice. *ISME Journal* 6:1378–1390.

Knight R, Vrbanac A, Taylor BC, Aksenov A, Callewaert C, Debelius J, Gonzalez A, Kosciolek T, McCall LI, McDonald D, *et al*. 2018. Best practices for analysing microbiomes. *Nature Reviews Microbiology* 16(7):410–422.

Kumar S., Joshi D, Pandey S.C., Debbarma P., Suyal D.C., Chaubey A.K. and Soni R. 2022. Structure and Functions of Rice and Wheat Microbiome. R. Goel *et al*. (eds.). Survival Strategies in Cold-adapted Microorganisms. Springer Nature. 15:343-365.

Lata R, Chowdhury S, Gond SK, White JF Jr. 2018. Induction of abiotic stress tolerance in plants by endophytic microbes. *Letters in Applied Microbiology* 66(4):268–276.

Leveau JHJ. 2006. Microbial communities in the phyllosphere. In: Riederer M, Müller C (eds). *Biology of the Plant Cuticle*. Blackwell Publishing, Oxford. pp. 334–367.

Lindow SE, Brandl MT. 2003. Microbiology of the phyllosphere. *Applied and Environmental Microbiology* 69(4):1875–1883.

Lindow SE, Leveau JHJ. 2002. Phyllosphere microbiology. *Current Opinion in Biotechnology* 13(3):238–243.

Lodewyckx C, Vangronsveld J, Porteous F, Moore ERB, Taghavi S, Mezgeay M, van der Lelie D. 2002. Endophytic bacteria and their potential applications. Critical Reviews in Plant Sciences 21(6):583–606.

Ma Y, Rajkumar M, Rocha I, Oliveira RS, Freitas H. 2016. Beneficial role of bacterial endophytes in heavy metal phytoremediation. *Journal of Environmental Management* 174:14–25.

Madigan MT, Bender KS, Buckley DH, Sattley WM, Stahl DA. 2018. *Brock Biology of Microorganisms*. 15th ed. Pearson Education, New York.

Malusá E, Vassilev N. 2014. A contribution to set a legal framework for biofertilisers. *Applied Microbiology and Biotechnology* 98:6599–6607.

Mercier J, Lindow SE. 2000. Role of leaf surface sugars in colonization of plants by bacterial epiphytes. *Applied and Environmental Microbiology* 66(1):369–374.

Müller DB, Vogel C, Bai Y, Vorholt JA. 2016. The plant microbiota: Systems-level insights and perspectives. Annual Review of Genetics 50:211–234.

Naylor D, Coleman-Derr D. 2017. Drought stress and root-associated bacterial communities. *Frontiers in Plant Science* 8:2223.

Neilands JB. 1995. Siderophores: Structure and function of microbial iron transport compounds. *Journal of Biological Chemistry* 270(45):26723–26726.

Pandey SS, Jain R, Bhardwaj P, Thakur A, Kumari M, Bhushan S, Kumar S. 2022. Plant probiotics – Endophytes pivotal to plant health. Microbiological Research 263. 127148: 1-16.

Pieterse CMJ, Zamioudis C, Berendsen RL, Weller DM, van Wees SCM, Bakker P. 2014. Induced systemic resistance by beneficial microbes. *Annual Review of Phytopathology* 52:347–375.

Pragya Tiwari, Seogchan Kang, Hanhong Bae. 2023. Plant-endophyte associations: Rich yet under-explored sources of novel bioactive molecules and applications. Microbiological Research 266 (2023) 127241: 1-16.

Remus-Emsermann MNP, Schlechter RO. 2018. Phyllosphere microbiology: At the interface between microbial individuals and the plant host. *New Phytologist* 218(4):1327–1333.

Rodríguez H, Fraga R. 1999. Phosphate solubilizing bacteria and their role in plant growth promotion. *Biotechnology Advances* 17(4–5):319–339.

Ryan RP, Germaine K, Franks A, Ryan DJ, Dowling DN. 2008. Bacterial endophytes: Recent developments and applications. *FEMS Microbiology Letters* 278(1):1–9.

Santoyo G, Moreno-Hagelsieb G, Orozco-Mosqueda MDC, Glick BR. 2016. Plant growth-promoting bacterial endophytes. *Microbiological Research* 183:92–99.

Schoch CL, Seifert KA, Huhndorf S, Robert V, Spouge JL, Levesque CA, Chen W. 2012. Nuclear ribosomal internal transcribed spacer (ITS) region as a universal DNA barcode marker for fungi. *Proceedings of the*

National Academy of Sciences USA 109(16):6241–6246.

Schulz B, Wanke U, Draeger S, Aust HJ. 1993. Endophytes from herbaceous plants and shrubs: Effectiveness of surface sterilization methods. *Mycological Research* 97(12):1447–1450.

Singh BK, Trivedi P, Egidi E, Macdonald CA, Delgado-Baquerizo M. 2020. Crop microbiome and sustainable agriculture. *Nature Reviews Microbiology* 18:601–602.

Smith SE, Read DJ. 2008. *Mycorrhizal Symbiosis*. 3rd ed. Academic Press, London.

Stone JK, Bacon CW, White JF Jr. 2000. An overview of endophytic microbes: Endophytism defined. In: Bacon CW, White JF Jr (eds). *Microbial Endophytes*. Marcel Dekker, New York. pp. 3–29.

Tilman D, Cassman KG, Matson PA, Naylor R, Polasky S. 2002. Agricultural sustainability and intensive production practices. *Nature* 418:671–677.

Van Loon LC, Bakker PAHM, Pieterse CMJ. 1998. Systemic resistance induced by rhizosphere bacteria. *Annual Review of Phytopathology* 36:453–483.

Vandenkoornhuyse P, Quaiser A, Duhamel M, Le Van A, Dufresne A. 2015. The importance of the microbiome of the plant holobiont. *New Phytologist* 206(4):1196–1206.

Venturi V, Keel C. 2016. Signaling in the rhizosphere. *Trends in Plant Science* 21(3):187–198

Vessey JK. 2003. Plant growth promoting rhizobacteria as biofertilizers. *Plant and Soil* 255:571–586.

Vorholt JA. 2012. Microbial life in the phyllosphere. *Nature Reviews Microbiology* 10(12):828–840.

Vurukonda SSKP, Vardharajula S, Shrivastava M, SkZ A. 2016. Enhancement of drought stress tolerance in crops by plant growth promoting rhizobacteria. *Microbiological Research* 184:13–24.

Watanabe T. 2010. *Pictorial Atlas of Soil and Seed Fungi: Morphologies of Cultured Fungi and Key to Species*. 3rd ed. CRC Press, Boca Raton.

Weller DM. 2007. *Pseudomonas* biocontrol agents of soilborne pathogens: Looking back over 30 years. *Phytopathology* 97(2):250–256.

BAB 8

MIKROORGANISME PELARUT FOSFAT DAN PENAMBAT NITROGEN

Oleh Yonce Melyanus Killa

Kesuburan tanah merupakan fondasi utama dalam mendukung produktivitas pertanian dan keberlangsungan sistem kehidupan tanaman. Di dalam tanah berlangsung berbagai proses biologis yang melibatkan interaksi antara akar tanaman, bahan organik, dan beragam komunitas mikroorganisme. Mikroorganisme tanah memiliki peran penting dalam menjaga keseimbangan ekosistem karena mampu membantu dekomposisi bahan organik, mendaur ulang unsur hara, serta meningkatkan ketersediaan nutrisi bagi tanaman. Mikroorganisme dalam kegiatan pertanian tidak lagi dipandang hanya sebagai komponen biologis tanah, melainkan sebagai agen hayati yang berpotensi mendukung pertanian berkelanjutan (Dohare *et al*., 2025). Pemanfaatan mikroorganisme menjadi semakin relevan di tengah meningkatnya kebutuhan pangan dan tantangan degradasi lingkungan akibat penggunaan pupuk kimia yang berlebihan (Basoka *et al*., 2025).

Kesuburan tanah sangat dipengaruhi oleh ketersediaan unsur hara dalam tanah yang dibutuhkan oleh tanaman. Unsur hara makro esensial yang sangat dibutuhkan oleh tanaman seperti nitrogen dan fosfor. Fosfor berperan dalam

proses transfer energi, pembentukan jaringan, perkembangan akar, dan metabolisme sel, sedangkan nitrogen menjadi komponen utama penyusun protein, asam amino, dan klorofil (Suryani & Utami, 2025). Meskipun kedua unsur tersebut tersedia di alam dalam jumlah besar, sebagian besar berada dalam bentuk yang tidak dapat langsung dimanfaatkan oleh tanaman. Fosfor umumnya terikat pada mineral tanah sehingga sulit larut (Firnia, 2018), sedangkan nitrogen atmosfer tidak dapat diserap secara langsung oleh akar tanaman (Tando, 2018). Kondisi ini menyebabkan efisiensi pemupukan menjadi rendah dan sering kali meningkatkan ketergantungan pada pupuk anorganik sintetis. Dalam konteks tersebut, keberadaan mikroorganisme sangat mempengaruhi ketersediaan unsur hara tersebut. Mikroorganisme yang dapat membantu seperti mikroorganisme pelarut fosfat dan penambat nitrogen yang dapat membantu menyediakan unsur hara secara alami melalui mekanisme biologis tertentu.

Mikroorganisme pelarut fosfat memiliki kemampuan untuk mengubah fosfat tidak larut menjadi bentuk yang tersedia bagi tanaman melalui produksi asam organik, enzim fosfatase, maupun mekanisme biologis lainnya (Sonia & Setiawati, 2022). Sementara itu, mikroorganisme penambat nitrogen mampu mengikat nitrogen bebas dari atmosfer dan mengonversinya menjadi senyawa yang dapat dimanfaatkan oleh tanaman (Waruwu *et al*., 2025). Kedua kelompok mikroorganisme ini umumnya ditemukan di rizosfer dan memiliki hubungan erat dengan sistem perakaran tanaman. Aktivitas biologis yang dilakukan oleh mikroorganisme tersebut tidak hanya meningkatkan ketersediaan unsur hara, tetapi juga membantu memperbaiki kesehatan tanah serta meningkatkan efisiensi penggunaan pupuk. Beberapa jenis mikroorganisme yang berpotensi menjadi pupuk hayati seperti (1) mikroorganisme penambat N_2 udara baik secara

simbiotik maupun non-simbiotik, (2) mikroorganisme pelarut fosfat (bakteri maupun fungi) (Subowo *et al*., 2013).

8.1 Mikroorganisme Pelarut Fosfor (P)

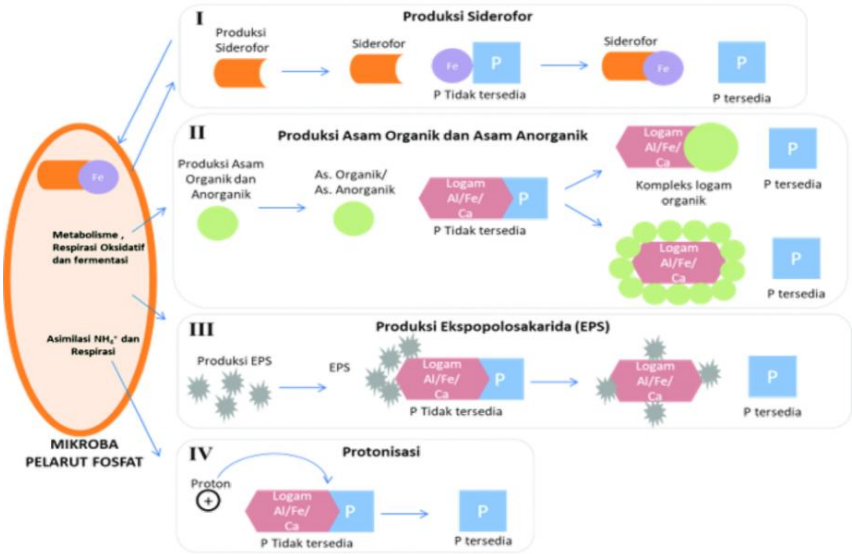
8.1.1 Pengertian dan Jenis Mikroorganisme Pelarut Fosfat

Fosfor (P) merupakan unsur yang esensial bagi tanaman seperti unsu Nitrogen. Unsur P merupakan unsur yang tidak dapat digantikan dengan unsur yang lain. Fosfor tidak tersedia di atmosfer seperti nitrogen, sehingga kekurangan unsur ini sangat mempengaruhi pertumbuhan dan hasil tanaman (Ajeng *et al*., 2020). Fosfor dalam tanah sekitar 95-95 % dalam bentuk tidak terlarut dalam larutan tanah. P dalam tanah berbentuk P organik yang berasal dari bahan organik dan P anorganik yang berasal dari mineral fosfat (Simanungkalit *et al*., 2006). Unsur P baik organik maupun anorganik tidak larut dalam larutan tanah sehingga perlu adanya mikroorganisme pelarut P yang melarutkan agar unsur tersebut diserap oleh tanaman.

Mikroorganisme pelarut fosfat (MPF) adalah kelompok mikroorganisme yang menguntungkan dan mampu menghidrolisis senyawa fosfor organik dan anorganik dari senyawa yang tidak larut. Mikroorganisme yang dapat berfungsi sebagai pelarut fosfat dari golongan bakteri (*Bacillus*, *Pseudomonas*, dan *Rhizobium*), golongan jamur (*Penicillium* dan *Aspergillus*), *Actinomycetes*, dan *mikoriza arbuskular* (AM) (Ajeng *et al*., 2020).

8.1.2 Mekanisme Pelarut Fosfat

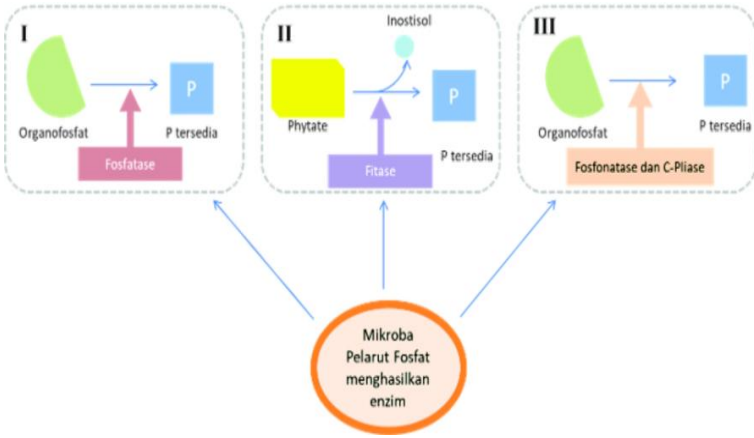
Mekanisme pelarutan fosfat terhadap fosfat anorganik oleh MPF adalah dengan memproduksi asam anorganik, asam organik, H2S, produksi siderofor, melepaskan proton NH^{4+}, dan produksi ekspopolisakarida (Pane *et al*., 2022). MPF memproduksi asam organik dan anorganik. Asam organik seperti asetat, oksalat, tartrat, suksinat, sitrat, α-ketoglutarat, laktat, formiat, propionat, glikolat, glioksilat, glutamat, fumarat dan malat (Gambar 8.1). Adanya asam organik dapat melarutkan fosfat dengan mengkelat P dari ikatan Fe, Al, dan Ca. Selain itu dengan adanya MPF dapat menurunkan pH sehingga P dapat dibebaskan dari kompleks jerapan dengan pertukaran asam amino dengan fosfat (Pane *et al*., 2022). Asam anorganik seperti asam sulfat, asam klorida, asam karbamat dan asam nitrat yang dapat melarutkan fosfat (Rawat *et al*., 2020 dalam (Pane *et al*., 2022). MPF memproduksi H2S, siderofor, dan ekspopolisakarida (Gambar 8.1). H2S bereaksi dengan Fe-P sehingga melepaskan fosfor dan membentuk fero sulfat. MFP menghasilkan eksopopolisakarida yang dapat membentuk kompleks dengan ion logam sehingga fosfat dapat terlarut (Pane *et al*., 2022).



Gambar 8. 1 Mekanisme Pelarutan Fosfat Anorganik oleh Mikoorganisme Pelarut Fosfat

(Sumber: Pane *et al*., 2022)

Mekanisme pelarutan fosfat terhadap fosfat organik oleh MPF adalah dengan memproduksi enzim seperti Fosfatase asam non-spesifik, Fitase, Fosfonatase dan C-Pliase. Enzim-enzim ini melakukan proses mineralisasi terhadap fosfat organik sehingga terlarut (Gambar 8.2). Fosfatase melarutkan fosfat dengan mengkatalisasi defosforilasi fosfoester atau ikatan fosfoanhidrida dari senyawa fosfat organik . Enzim fitase melarutkan fosfor dengan mengkatalisis senyawa fitat (fosfor organik dalam tanah), maupun fosfor yang tersimpan dalam serbuk sari dan biji. Fosfonatase dan C-Pliase mengkatalisis pemutusan ikatan C-P organofosfat. Pemutusan ikatan tersebut mengakibatkan peningkatan ketersediaan fosfor bagi tanaman (Sharma *et al*., 2013; Rodríguez *et al*., 2006; Pane *et al*., 2022).



Gambar 8. 2 Mekanisme Pelarutan Fosfat Organik oleh Mikoorganisme Pelarut Fosfat

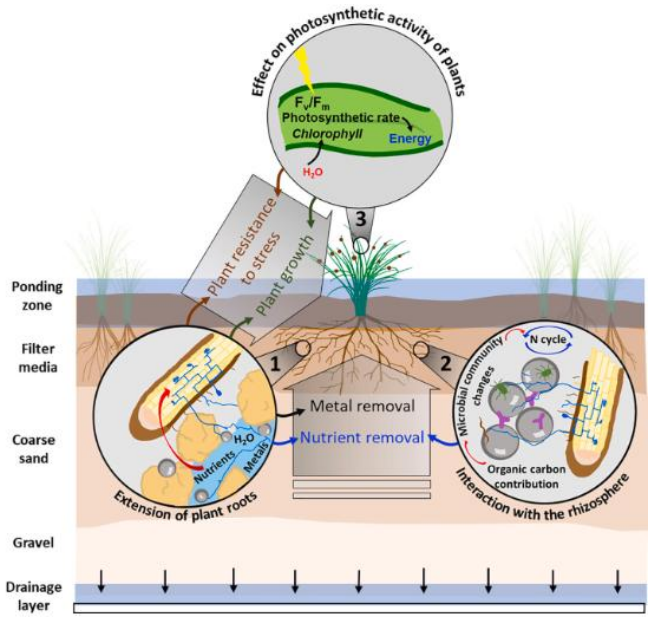
(Sumber: Pane *et al*., 2022)

8.1.3 Fungi Mikoriza

Mikoriza merupakan suatu sistem perakaran yang terbentuk akibat simbiosis antara fungi (*myces*) dan perakaran (*rhiza*) tumbuhan atau adanya asosiasi antara fungi dan akar tanaman yang membentuk jalinan interaksi yang kompleks. Interaksi ini terjadi ketika jamur mikoriza menyerang akar tanaman dan hidup di dalam jaringan tanaman (Hajoeningrijas, 2009). Mikoriza memperoleh karbon dari tumbuhan sebagai makanan dengan cara mengolonisasi apoplast dan sel korteks tumbuhan, sedangkan tumbuhan dengan bantuan hifa fungi menyerap mineral-mineral yang tidak dijangkau oleh akar untuk kebutuhan metabolisme tumbuhan. Mikoriza mempunyai peran baik secara ekologis maupun agronomis melalui peningkatan serapan fosfor serta unsur hara N, K, Co, Zn, Mo dan S, membantu tanaman tahan terhadap kekeringan, memperbaiki agregat tanah, mendorong pertumbuhan mikroorganisme tanah yang baik untuk tanaman, dan

melindungi tanaman dari patogen penyebab penyakit (Christofer *et al*., 2022).

Mekanisme kerja mikoriza yang mempengaruhi kinerja biosfer (Gambar 8.3). Gambar (1) menunjukkan bahwa mikoriza dapat bertindak sebagai perpanjangan akar tanaman, memberikan tambahan air dan nutrisi untuk pertumbuhan tanaman dan ketahanan terhadap cekaman lingkungan, serta logam-logam berat diserap kemudian disimpan dalam jaringan mikoriza agar tidak diserap oleh tanaman. Gambar (2) menunjukkan interaksinya dengan rizosfer, Mikoriza dapat menyumbangkan karbon organik ke tanah dan mengubah struktur komunitas bakteri, yang berperan penting dalam siklus nitrogen (N). Gambar (3) Mikoriza dapat meningkatkan produksi energi dengan meningkatkan aktivitas fotosintesis tanaman, memiliki dampak penting pada pertumbuhan tanaman dan ketahanan tanaman terhadap cekaman (Palacios & Winfrey, 2021).



Gambar 8. 3 Mekanisme Kerja Mikoriza

(Sumber: Palacios and Winfrey, 2021).

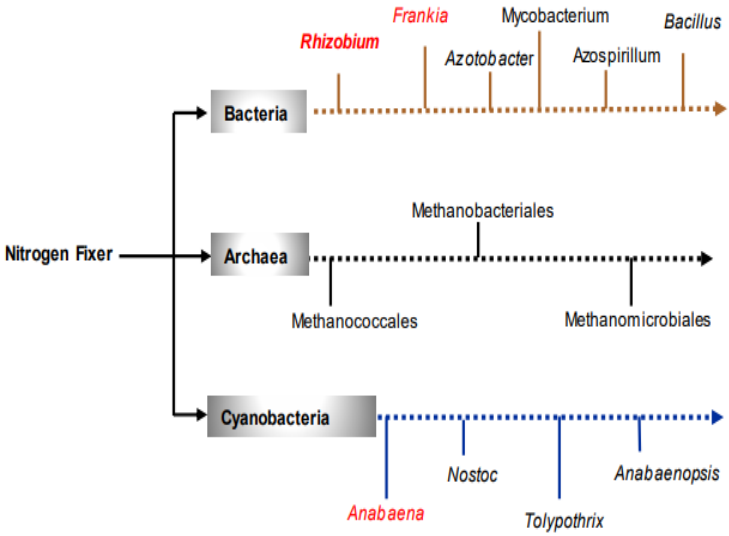
8.2 Mikroorganisme Penambat Nitrogen (N)

8.2.1 Pengertian dan Jenis Mikroorganisme Penambat Nitrogen

Tanaman dalam proses pertumbuhan dan perkembangannya membutuhkan unsur nitrogen. Nitrogen sangat penting bagi tanaman karena berfungsi sebagai penyusun asam nukleat, asam amino, protein, protoplasma, serta klorofil (Sari & Prayudyaningsih, 2015). Sumber N dalam tanah berasal dari sisa-sisa tanaman, biota tanah, dan hewan yang berbentuk nitrogen organik dan terdapat di atmosfer sekitar 78%. Akan tetapi, nitrogen ini tidak dapat diserap oleh tanaman karena dalam bentuk molekul yang tidak

reaktif (Sapalina *et al*., 2022). Nitrogen organik maupun nitrogen dari atmosfer yang dapat digunakan tanaman atau tersedia harus melalui mineralisasi maupun fiksasi oleh mikroorganisme. Mikroorganisme penambat nitrogen (Nitrogen Fixing Microorganisms) adalah kelompok mikroba yang mampu mengubah nitrogen atmosfer (N_2) menjadi amonia (NH_3) melalui proses fiksasi nitrogen biologis (Mendrofa *et al*., 2024). Organisme yang sering dipelajari sebagai pengikat N adalah dari kelompok bakteri. Terdapat beberapa jenis bakteri yang dapat menambat nitrogen yaitu

1. Bakteri yang hidup bebas dan tidak berinteraksi dengan organisme lain. Contohnya adalah *Bacillus*, *Szotobacter*, *Klebsiella*, *Clostidium* dan lainnya (Soumare *et al*., 2020).
2. Bakteri yang berasosiasi dengan tanaman dari famili Poaceae (rumput) atau padi, jagung, gandum, dan lainnya. Contohnya seperti bakteri *Azospirillum* (Soumare *et al*., 2020).
3. Bakteri penambat N yang bersimbiosis dengan tanaman legum membentuk bintil atau nodul akra. Contohnya rhizobia dari keluarga Rhizobiaceae, yaitu, *Rhizobium*, *Azorhizobium, Bradyrhizobium*, *Mesorhizobium, Sinorhizobium*, dan *Sinorhizobium* (Ensifer) (Purba *et al*., 2021).



Gambar 8. 4 Tiga Kelompok Bakteri Penambat Nitrogen. Tulisan Merah Adalah Spesies Bakteri yang Bersimbiosis. Tulisan Hitam Miring Adalah Spesies yang Hidup Bebas

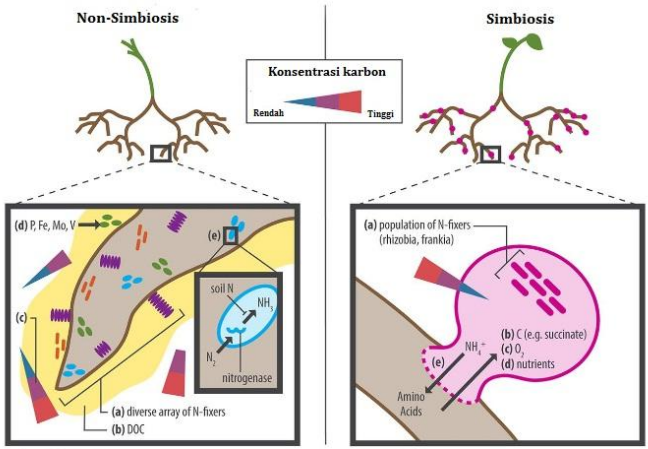
(Sumber: (Soumare *et al*., 2020)).

8.2.1 Mekanisme Penambatan Nitrogen

Proses penambatan nitrogen oleh bakteri yang hidup bebas yaitu bakteri bekoloni di dekat permukaan akar. Kemudian bakteri tersebut menghasilkan zat pemacu tumbuh seperti giberelin, sitokinin, serta asam indol asesat yang dapat dimanfaatkan untuk memacu pertumbuhan akar tanaman. Salah satu contoh bakteri adalah *Azotobacter* (Simanungkalit *et al*., 2006). Bakteri *Azotobacter* melakukan penambatan nitrogen dengan cara mempertahankan oksigen dalam sel dalam kondisi rendah, melalui peningkatan laju respirasi, sehingga tidak terjadi nitrogenase terhadap oksigen (Sapalina *et al*., 2022). Contoh lain bekteri yang melakukan mekanisme penambatan yang tidak bersimbiosis ialah

Cyanobacteria. *Cyanobacteria* melakukan mekanisme penambatan dengan memisahkan O_2 dari sistem nitrogenase. Proses ini terjadi di heterokis yaitu sel khusus yang berdinding tebal untuk melindungi kompleks enzim nitrogenase dan berfungsi dalam fiksasi nitrogen (Sapalina *et al*., 2022).

Mekanisme penambatan nitrogen oleh bakteri yang bersimbiosis dengan tanaman yaitu bakteri melakukan infeksi pada akar tanaman sehingga terbentuk bintil akar. Nitrogen bebas di udara diikat oleh bakteri menjadi amonia (NH_3). NH_3 kemudian diubah menjadi asam amino, lalu dilanjutkan menjadi senyawa nitrogen yang dapat diserap oleh tanaman untuk pertumbuhan dan perkembangannya. Contoh bakteri yang melakukan infeksi dan mpenambatan ialah bakteri *Rhizobium*. Bakteri ini dapat melakukan fiksasi nitrogen jika berada dalam bintil akar. Hal ini karena bakteri ini memperoleh sumber energi berupa karbohidrat dari tanaman inang (Sari & Prayudyaningsih, 2015). Penambatan nitrogen dapat dipengaruhi oleh faktor-faktor seperti suplai fotosintat, temperatur, aerasi, pH tanah serta ketersediaan nitrogen (Adnyana, 2012).



Gambar 8. 5 Mekanisme Penambatan Nitrogen oleh Bakteri yang Hidup Bebas (Non-Simbiosis) Dan Bakteri yang Bersimbiosis dengan Tanaman

(Sumber: Soumare *et al*., 2020)

DAFTAR PUSTAKA

Adnyana, G. M. (2012). Mekanisme Penambatan Nitrogen Udara oleh Bakteri Rhizobium Menginspirasi Perkembangan Teknologi Pemupukan Organik yang Ramah Lingkungan. *Agrotrop*, *2*(2), 145–149.

Ajeng, A. A., Abdullah, R., Malek, M. A., Chew, K. W., Ho, Y. C., Ling, T. C., Lau, B. F., & Show, P. L. (2020). The effects of biofertilizers on growth, soil fertility, and nutrients uptake of oil palm (Elaeis guineensis) under greenhouse conditions. *Processes*, *8*(12), 1–16. https://doi.org/10.3390/pr8121681

Basoka, S. W., Johan, E. A., M, N. R., & Baihaqi, B. (2025). Riview Artikel: Mikroba, Tanaman dan Teknologi Sebagai Integrasi Bioteknologi Mikrobial Dalam Pertanian Modern. *Minfo Polgan*, *14*(1), 1520–1526. https://doi.org/10.33395/jmp.v14i1.15137

Christofer, F., Sari, S. P., Sapulette, K., Anggayni, M., Hutagalung, E., & Irawati, W. (2022). Mycorizoremediation : Association of Arbuscular Mycorrhizal Fungi to Increas Metal Absorption Ability in Hyperaccumulator Plants at Mining Land. *Jurnal Teknologi Lingkungan*, *23*(1), 118–125.

Dohare, K. S., Lahagu, M. P., & Waruwu, P. N. K. (2025). Peran Mikroorganisme Tanah dalam Meningkatkan Kesehatan Tanah dan Hasil Pertanian Organik. *Hidroponik : Jurnal Ilmu Pertanian Dan Teknologi Dalam Ilmu Tanaman*, *2*(1), 166–178. https://doi.org/10.62951/hidroponik.v2i1.253

Firnia, D. (2018). Dinamika Unsur Fosfor Pada Tiap Horison Profil Tanah Masam. *Agroekotek*, *10*(1), 45–52.

Mendrofa, P. K. T., Waruwu, A. B. S., & Lase, N. K. (2024). Kajian Literatur: Potensi Rhizombium Dalam Fiksasi Nitrogen Sebagai Solusi Ramah Lingkungan Untuk Peningkatan Kesuburan Tanah. *Penarik: Jurnal Ilmu Pertanian Dan Perikanan*, *1*(2), 156–161.

Oetami Dwi Hajoeningrijas. (2009). Ketergantungan Tanaman Terhadap Mikoriza Sebagai Kajian Potensi Pupuk Hayati Mikoriza Pada Budidaya Tanaman Berkelanjutan. *Agritech*, *XI*(2), 125–136.

Palacios, Y. M., & Winfrey, B. K. (2021). Three mechanisms of mycorrhizae that may improve stormwater biofilter performance. *Ecological Engineering*, *159*(October), 106085. https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2020.106085

Pane, R. D. P., Ginting, E. N., & Hidayat, F. (2022). Mikroba pelarut fosfat dan potensinya dalam meningkatkan pertumbuhan tanaman. *Warta Pusat Penelitian Kelapa Sawit*, *27*(1), 51–59.

Purba, T., Situmeang, R., Rohman, H. F., Mahyati, Arsi, Firgiyanto, R., Junaedi, A. S., Saadah, T. T., Junairiah, Herawati, J., & Suhastyo, A. A. (2021). Pemupukan dan Teknologi Pemupukan. In *Yayasan Kita Menulis*.

Sapalina, F., Ginting, E. N., & Hidayat, F. (2022). Bakteri penambat nitrogen sebagai agen biofertilizer. *Warta Pusat Penelitian Kelapa Sawit*, *27*(1), 41–50.

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

Simanungkalit, R. D. M., Suriadikarta, D. A., Saraswati, R., Setyorini, D., & Hartatik, W. (2006). *Pupuk Organik dan Pupuk Hayati*. Balai Besar Penelitian dan Pengembangan Sumberdaya Lahan Pertanian.

Sonia, A. V., & Setiawati, T. C. (2022). Aktivitas bakteri pelarut fosfat terhadap peningkatan ketersediaan fosfat pada tanah masam. *Agrovigor: Jurnal Agroekoteknologi*, *15*(1), 44–53. https://doi.org/10.21107/agrovigor.v15i1.13449

Soumare, A., Diedhiou, A. G., Thuita, M., & Hafidi, M. (2020). Exploiting Biological Nitrogen Fixation : A Route. *Plants*, 1–22.

Subowo, Purwani, J., & Rochayati, S. (2013). Prospek dan Tantangan Pengembangan Biofertilizer untuk Perbaikan Kesuburan Tanah. *Jurnal Sumberdaya Lahan*, *7*(1), 15–26.

Suryani, R., & Utami, R. S. (2025). Efektivitas Pupuk Organik Cair Dan Pupuk NPK Pada Pertumbuhan Dan Hasil Tanaman Cabai. *Pucuk: Jurnal Ilmu Tanaman*, *5*(2), 215–230.

Tando, E. (2018). Review: Upaya Efisiensi Dan Peningkatan Ketersediaan Nitrogen Dalam Tanah Serta Serapan Nitrogen Pada Tanaman Padi Sawah (Oryza sativa L.). *Busana Sains*, *18*(2), 171–180.

Waruwu, S. S., Nazara, R. V., Telaumbanua, P. H., & Lase, N. K. (2025). Peran Rhizobium Dalam Meningkatkan Efisiensi Serapan Nitrogen Pada Tanaman Kacang Hijau (Vigna radiata L). *Partner*, *30*(1), 52–63.

BAB 9

TEKNIK INOKULASI MIKROORGANISME YANG BERPOTENSI SESUAI PEMANFAATAN UNTUK APLIKASINYA

Oleh Kurniawan Shidiq Sutikno

Secara konseptual, penemuan mikroorganisme yang memiliki potensi unggul di laboratorium—baik sebagai agen pemacu pertumbuhan tanaman (*Plant Growth-Promoting Microorganisms*), agen biokontrol, maupun pelarut hara—hanyalah langkah awal dalam rangkaian panjang rekayasa fitomikrobiologi. Tantangan terbesar yang sesungguhnya berada pada fase transisi dari skala *in vitro* (laboratorium) menuju skala *in vivo* (lapangan atau agroindustri). Kunci keberhasilan transisi ini terletak pada proses inokulasi. Inokulasi dalam konteks fitomikrobiologi didefinisikan sebagai proses pemindahan atau introduksi mikroorganisme target secara sengaja dan terukur ke dalam lingkungan tanaman, seperti benih, area perakaran (rizosfer), atau tajuk tanaman (filosfer), dengan tujuan agar mikroorganisme tersebut dapat bertahan hidup, berkolonisasi, dan memberikan efek fisiologis yang menguntungkan bagi inangnya (Bashan *et al*., 2014).

Dalam skala pengembangan produk agroindustri, teknik inokulasi tidak bisa dilakukan secara sembarangan. Pendekatan vokasional menuntut adanya efisiensi, efektivitas, dan standarisasi operasional (SOP). Ketepatan dalam memilih teknik aplikasi akan sangat menentukan viabilitas (daya hidup) sel mikroba saat menghadapi cekaman lingkungan abiotik dan biotik di lapangan. Sehebat apa pun potensi genetik dan metabolit sekunder yang dimiliki oleh suatu isolat mikroba, potensinya tidak akan termanifestasi jika mikroba tersebut mati sebelum mencapai jaringan target pada tanaman(O'Callaghan, 2016).Oleh karena itu, pemilihan teknik inokulasi yang tepat berkorelasi langsung dengan efisiensi biaya produksi (*cost-efficiency*) dan konsistensi hasil panen, yang merupakan parameter krusial dalam industri pertanian modern (Malusá *et al*., 2012).

Lebih lanjut, teknik inokulasi harus disesuaikan secara spesifik dengan karakteristik biologis mikroorganisme dan tujuan pemanfaatannya, sebagaimana yang telah dibahas pada bab-bab sebelumnya. Sebagai contoh, bakteri pengikat nitrogen seperti *Rhizobium* diberikan dengan cara melapisi benih, sedangkan mikroba pembasmi penyakit daun diaplikasikan dengan cara disemprotkan ke bagian daun. Begitu juga dengan mikroba endofit yang butuh cara khusus agar bisa masuk dan hidup di dalam tanaman tanpa membuatnya sakit (Herrmann and Lesueur, 2013). Bab ini akan menguraikan secara komprehensif berbagai teknik inokulasi mikroorganisme, mulai dari persiapan inokulum hingga metode aplikasinya di lapangan. Pemahaman yang mendalam mengenai teknik-teknik ini diharapkan dapat membekali praktisi dan mahasiswa agroindustri dengan kemampuan rekayasa teknis yang mumpuni, sehingga pemanfaatan agen hayati dapat diaplikasikan secara optimal, berkelanjutan, dan memberikan nilai tambah ekonomi yang nyata.

9.1 Persiapan Inokulum dan Bentuk Formulasi

Pengembangan mikroorganisme dari skala laboratorium menjadi produk komersial yang siap diaplikasikan di lapangan membutuhkan proses formulasi yang cermat. Biakan murni hasil fermentasi (*broth culture*) umumnya sangat rentan terhadap kondisi lingkungan ekstrem seperti fluktuasi suhu, radiasi UV, dan kekeringan. Oleh karena itu, mikroorganisme memerlukan bahan pembawa (*carrier*) yang berfungsi sebagai "rumah sementara" untuk melindungi sel, menyediakan nutrisi awal, dan memperpanjang umur simpan (*shelf-life*) produk sebelum diaplikasikan ke tanaman (Brahmaprakash and Sahu, 2012).

9.1.1 Karakteristik Inokulum Siap Pakai

Dalam standar industri pertanian, inokulum mikroba yang siap diaplikasikan harus memenuhi beberapa parameter kualitas utama:

1. **Tingkat Kelangsungan Hidup (Viabilitas):** Kepadatan populasi mikroba pada produk wajib memenuhi standar minimum, yaitu antara 10^7 hingga 10^9 *Colony Forming Unit* (CFU) per gram atau mililiter (Bashan *et al*., 2014). Kepadatan yang tinggi ini sangat penting agar mikroba yang diintroduksi mampu bersaing secara efektif dengan mikroba lokal (*indigenous*) di lahan penanaman.
2. **Kemurnian Produk:** Inokulum harus sepenuhnya bebas dari patogen yang dapat menginfeksi manusia, hewan, dan tanaman. Selain itu, tingkat keberadaan mikroba non-target (kontaminan) harus ditekan pada level yang sangat minimal, umumnya di bawah 10^3 CFU/g, agar tidak menghambat kinerja strain mikroba utama.

3. **Stabilitas Fisik dan Kimia:** Formulasi inokulum harus dirancang agar stabil selama masa penyimpanan dan distribusi. Hal ini mencakup pemeliharaan tingkat keasaman (pH) dan kelembapan yang sesuai untuk menjaga kelangsungan hidup sel mikroba dalam fase dorman (istirahat) hingga produk tersebut siap diaplikasikan.

9.1.2 Karakteristik Inokulum Siap Pakai

Berdasarkan wujud fisiknya, formulasi inokulum yang digunakan dalam rekayasa agroindustri dibagi menjadi tiga kategori utama, yang masing-masing menentukan teknik inokulasinya di lapangan:

A. **Formulasi Padat (*Solid Formulations*)** Ini adalah bentuk formulasi yang paling konvensional namun masih sangat luas digunakan karena kemudahan transportasinya.

- **Gambut (*Peat*):** Telah lama menjadi *gold standard* untuk inokulan *Rhizobium* karena kapasitas menahan air (*Water Holding Capacity*) yang tinggi dan kaya bahan organik.
- **Serbuk Mineral (*Talc/Kaolin*):** Sering digunakan untuk agen biokontrol seperti *Trichoderma* atau *Pseudomonas*. Bahan ini mudah menempel pada benih saat dilakukan perlakuan benih (*seed coating*).
- **Granul dan Kompos:** Bahan organik (seperti kompos, arang sekam/biochar) yang dibentuk menjadi granul (butiran) memudahkan aplikasi langsung ke tanah, baik ditebar maupun dibenamkan dalam alur tanam bersama pupuk dasar (Schoebitz *et al*., 2013).

B. Formulasi Cair (*Liquid Formulations*) Saat ini formulasi cair semakin mendominasi skala industri agroteknologi karena kepraktisannya. Untuk memperpanjang umur simpan (*shelf-life*) dan menjaga viabilitas mikroba, inokulum cair tidak hanya berisi sel mikroba dan sisa media fermentasi, tetapi juga wajib ditambahkan senyawa aditif pelindung yang bertindak sebagai *osmoprotectant* (seperti gliserol, trehalosa, atau *Polyvinylpyrrolidone*/ PVP). Kehadiran senyawa aditif ini sangat krusial untuk menurunkan aktivitas air (a_w) di dalam larutan, sehingga sel mikroba terlindungi dari lisis atau kerusakan membran sel akibat tekanan osmotik dan cekaman desikasi selama masa penyimpanan di gudang (Berninger *et al*., 2018).

- *Keunggulan:* Sangat mudah diaplikasikan secara mekanis, cocok untuk penyemprotan daun (*foliar spray*), perendaman benih (*seed priming*), dan sistem fertigasi (irigasi tetes).

C. Formulasi Enkapsulasi (*Polymer-based Encapsulation*) Ini merupakan teknologi maju (*advanced technology*) yang sangat relevan untuk dikembangkan dalam proyek agroindustri. Mikroba dibungkus (dienkapsulasi) di dalam matriks polimer alami, seperti natrium alginat, pektin, atau kitosan, membentuk manik-manik (*beads*) atau makrokapsul (Vassilev *et al*., 2020).

- *Keunggulan:* Melindungi sel mikroba secara maksimal dari stres biotik/abiotik dan mampu melepaskan mikroba secara perlahan (*slow-release*) seiring dengan degradasi polimer di dalam tanah. Kapsul ini juga dapat diperkaya dengan nutrisi makro/mikro tambahan.

9.2 Teknik Inokulasi Berdasarkan Target Sasaran (Metode Aplikasi)

Pemilihan teknik inokulasi tidak dapat dipukul rata untuk semua jenis mikroba dan tanaman. Keputusan ini sangat bergantung pada lokasi target kolonisasi mikroorganisme (seperti permukaan benih, zona perakaran, atau jaringan daun) serta ketersediaan sarana mekanis di area pertanian. Secara umum, teknik aplikasi di lapangan terbagi menjadi empat kategori utama berdasarkan target sasarannya.

9.2.1 Perlakuan Benih (*Seed Treatment*)

Perlakuan benih merupakan metode yang paling umum, efisien, dan ekonomis karena hanya membutuhkan jumlah inokulum yang relatif sedikit untuk mencakup area tanam yang luas (O'Callaghan, 2016). Target utamanya adalah memastikan mikroorganisme sudah berada di lokasi yang tepat saat benih mulai berkecambah (radikula muncul), sehingga kolonisasi pada akar muda dapat segera terjadi.

- **Pelapisan Benih (*Seed Coating* dan *Pelleting*):** Teknik ini melibatkan pelapisan permukaan benih dengan formulasi inokulum padat (seperti gambut/*talc*) atau cair. Dalam skala agroindustri, proses ini membutuhkan bahan perekat organik yang aman bagi mikroba, seperti *Gum Arabic* 10-40% atau *Carboxymethyl Cellulose* (CMC) 1-2% (Rocha *et al*., 2019).
- **Perendaman Benih (*Biopriming*):** Metode ini memadukan proses penyerapan air pada benih (*seed priming*) dengan pemberian mikroba. Dalam praktiknya, benih direndam di dalam cairan mikroba selama kurun waktu 12 hingga 24 jam. Proses perendaman ini memungkinkan benih

menyerap air sekaligus membawa agen inokulum masuk menembus pori-pori kulit benih (Mahmood *et al*., 2016). Pendekatan ini dinilai sangat efektif diaplikasikan pada agen pengendali hayati, seperti *Trichoderma* spp., untuk melindungi benih dari serangan penyakit yang bersumber dari tanah (*soil-borne pathogens*).

9.2.2 Aplikasi pada Tanah dan Area Perakaran

Metode aplikasi langsung ke tanah umumnya dipilih untuk memperbaiki kondisi biokimia tanah secara menyeluruh (misalnya pada penggunaan bakteri pelarut fosfat), atau ketika inokulasi melalui benih dinilai kurang efektif akibat tingginya ancaman patogen di lapangan. Beberapa teknik yang dapat diterapkan meliputi:

- **Penyiraman (*Soil Drenching*):** Inokulum cair dilarutkan dengan air, kemudian disiramkan langsung ke area perakaran (*rhizosphere*). Teknik ini sangat efektif diterapkan pada tanaman hortikultura yang telah memasuki masa pertumbuhan vegetatif.
- **Aplikasi Alur Tanam (*In-Furrow Application*) dan Penebaran (*Broadcasting*):** Teknik ini menggunakan inokulum berwujud butiran (granul) atau kompos aktif. Inokulum dapat disebar secara merata di lahan (*broadcasting*) atau diletakkan secara spesifik di dalam alur tanam bersamaan dengan benih (Mitter *et al*., 2013). Keuntungan metode ini adalah bahan pembawa (*carrier*) organik pada granul dapat sekaligus berfungsi sebagai cadangan nutrisi bagi mikroba di dalam tanah.
- **Aplikasi Sistem Fertigasi (*Fertigation*):** Di era pertanian presisi, inokulum cair diintegrasikan dengan sistem irigasi tetes (*drip irrigation*). Teknik

ini sangat direkomendasikan untuk industri perkebunan/hortikultura modern (misalnya *greenhouse*) karena mampu menghemat biaya tenaga kerja secara signifikan dan memastikan inokulum mencapai area perakaran secara efisien tanpa terbuang percuma (Malusá *et al*., 2012).

9.2.3 Aplikasi pada Tajuk/ Daun (*Foliar Application*)

Pendekatan ini difokuskan pada inokulasi area filosfer (permukaan atas daun dan batang). Tujuan utamanya adalah untuk mengaplikasikan pupuk hayati foliar atau menyebarkan agen biokontrol untuk menekan penyakit daun, misalnya aplikasi *Pseudomonas* pada kasus karat daun.

- **Metode Penyemprotan (*Foliar Spray*):** Inokulum diberikan menggunakan alat semprot manual (*knapsack sprayer*) atau alat berskala besar yang ditarik traktor (*boom sprayer*).
- **Hal Penting dalam SOP Penyemprotan:** Mengingat inokulum berisi entitas hidup yang sangat rentan, perlakuannya tidak dapat disamakan dengan pestisida atau pupuk kimia sintetis. Aplikasi penyemprotan mikroba membutuhkan prosedur khusus dan harus memperhatikan hal-hal krusial berikut (Preininger *et al*., 2018):

  1. **Waktu Strategis:** Semprotkan sebelum pukul 09.00 atau setelah pukul 15.00. Kondisi ini menjamin radiasi UV rendah dan stomata daun terbuka sempurna untuk penyerapan maksimal.
  2. **Gunakan Adjuvant:** Tambahkan perekat (*surfactant*) non-toksik dan pelindung UV. Ini penting agar mikroba tidak meluncur jatuh dari

lapisan lilin daun atau mati akibat penguapan dan sinar matahari.

3. **Atur Tekanan:** Gunakan tekanan sprayer yang rendah hingga sedang. Tekanan terlalu tinggi menciptakan gaya geser mekanis yang berisiko memecah membran sel mikroorganisme.

9.2.4 Teknik Spesifik Lainnya

Selain melalui penyemprotan dan aplikasi tanah, efektivitas inokulasi dapat ditingkatkan melalui teknik intervensi langsung pada jaringan tanaman. Pendekatan ini memastikan mikroba target berada tepat di area yang paling membutuhkan perlindungan atau nutrisi.

- **Pencelupan Akar (*Root Dipping*):** Teknik ini merupakan standar emas bagi tanaman yang melalui fase persemaian sebelum pindah tanam (*transplanting*), seperti padi, tomat, atau cabai. Dengan merendam akar bibit dalam suspensi inokulum selama 15–30 menit, mikroba memiliki waktu yang cukup untuk melekat erat pada permukaan akar. Hal ini memberikan keunggulan kompetitif yang masif, karena perakaran langsung terkolonisasi secara optimal tepat sebelum bibit terpapar patogen di lingkungan tanah yang baru (Dal Cortivo *et al*., 2017).
- **Injeksi Batang (*Trunk/ Stem Injection*):** Metode ini menjadi solusi efektif untuk tanaman keras, pohon buah, atau komoditas perkebunan seperti kelapa sawit dan karet yang sulit dijangkau melalui metode konvensional. Inokulum cair—umumnya berupa mikroba endofit atau agen biokontrol—diinjeksikan langsung ke dalam jaringan vaskular (xilem atau floem) menggunakan alat suntik bertekanan. Teknik ini sangat efisien karena

mengandalkan sistem transportasi internal tanaman (translokasi sistemik) untuk mendistribusikan mikroba secara merata ke seluruh bagian batang hingga ke pucuk daun, tanpa terpengaruh oleh faktor lingkungan luar (Berger, 1996).

9.3 Strategi Inokulasi Berdasarkan Tujuan Pemanfaatan

Pemilihan metode inokulasi tidak boleh hanya bergantung pada bentuk fisik produk (formulasi), tetapi wajib disesuaikan dengan mekanisme kerja (*mode of action*) dan target fisiologis dari mikroorganisme itu sendiri. Apabila teknik aplikasi tidak selaras dengan fungsi mikroba, hal ini akan memicu inefisiensi yang berujung pada kerugian finansial yang signifikan di skala industri pertanian. Oleh karena itu, dari segi manajemen teknis, strategi pemberian agen hayati umumnya dikelompokkan ke dalam tiga tujuan utama:

9.3.1 Aplikasi untuk Pupuk Hayati (*Biofertilizer*)

Fokus utama dari penggunaan pupuk hayati adalah memperkaya populasi mikroba fungsional di area rizosfer, yakni zona pertukaran eksudat akar dan penyerapan nutrisi. Strategi aplikasi ini harus disesuaikan dengan karakteristik mikrobanya. Pada kelompok **bakteri pengikat nitrogen simbiotik** (seperti *Rhizobium* sp.), interaksi dini dengan calon akar sangatlah krusial. Oleh sebab itu, teknik pelapisan benih (*seed coating*) menggunakan inokulum bergambut menjadi standar baku. Keberadaan mikroba pada permukaan benih memungkinkan mereka untuk segera merespons sinyal flavonoid dari akar muda dan mulai membentuk bintil akar (Itelima *et al*., 2018).

Sebaliknya, untuk kelompok **mikroba pelarut fosfat dan pengikat nitrogen non-simbiotik** (seperti *Bacillus* spp., *Azotobacter*, dan Mikoriza) yang hidup bebas di area rizosfer, pendekatannya berbeda. Aplikasi yang paling efektif adalah melalui penebaran inokulum granul di alur tanam (*in-furrow*) atau pencelupan akar (*root dipping*) saat proses pindah tanam bibit. Apabila menggunakan sistem irigasi modern, penerapan fertigasi inokulum cair secara berkala dapat menjadi solusi ideal untuk menjaga kepadatan populasi mikroba tanah selama masa pertumbuhan tanaman (Bhattacharyya and Jha, 2012).

9.3.2 Aplikasi untuk Agen Biokontrol (*Bioprotectant*)

Efektivitas aplikasi agen biokontrol atau biopestisida (contohnya *Trichoderma* spp., *Pseudomonas fluorescens*, maupun *Beauveria bassiana*) sangat ditentukan oleh strategi pengaturan waktu (*timing*). Terdapat dua pendekatan utama yang dapat diterapkan berdasarkan target patogennya. Pertama, **pendekatan preventif** yang difokuskan pada pencegahan patogen tular tanah penyebab penyakit rebah kecambah (*damping-off*), seperti *Pythium* dan *Fusarium*. Langkah pencegahan yang paling optimal adalah melalui perendaman benih (*biopriming*). Melalui teknik ini, mikroba agen hayati akan berkoloni dan mendominasi ruang di sekitar perakaran lebih dulu (*niche exclusion*), sehingga membentuk benteng pertahanan sebelum patogen sempat menginfeksi (Heydari and Pessarakli, 2010).

Kedua, **pendekatan kuratif dan protektif tajuk** untuk menanggulangi penyakit yang menyebar melalui udara atau menyerang daun, seperti hawar dan karat daun. Strategi yang diaplikasikan adalah penyemprotan daun (*foliar spray*) yang harus merata di seluruh sisi

permukaan daun. Dalam praktik agroindustri, pendekatan ini menuntut adanya pemantauan ambang batas ekonomi. Inokulasi atau penyemprotan baru dilakukan tepat pada saat gejala awal penyakit mulai terlihat, atau ketika kondisi iklim sangat mendukung proliferasi patogen (Köhl *et al*., 2019).

9.3.3 Aplikasi untuk Mikroba Endofit

Mikroba endofit, baik berupa bakteri maupun jamur, memiliki karakteristik yang unik karena mampu hidup dan berkembang di dalam jaringan internal tanaman tanpa merugikan inangnya. Oleh karena itu, metode inokulasinya memerlukan teknik khusus yang dapat memfasilitasi mikroba menembus sel tanaman:

- **Inokulasi Sejak Dini:** Pendekatan paling efektif untuk mengintroduksi endofit adalah melalui perendaman benih (*seed priming*) menggunakan inokulum cair. Ketika benih menyerap air (*imbibisi*), sel-sel mikroba akan ikut terbawa menembus jaringan embrio. Selanjutnya, mikroba ini akan menyebar dan berkembang secara sistemik mengikuti fase pertumbuhan tanaman (Hardoim *et al*., 2015).
- **Inokulasi pada Tanaman Dewasa:** Pada tanaman berkayu atau komoditas perkebunan yang sudah tumbuh besar, agen endofit dapat diaplikasikan melalui teknik injeksi batang atau dengan membuat sedikit perlukaan pada akar saat penyiraman. Luka mekanis ini sengaja dibuat agar berfungsi sebagai "pintu masuk" bagi mikroba menuju jaringan pembuluh vaskular tanaman (Compant *et al*., 2010).

9.4 Faktor-faktor yang Mempengaruhi Keberhasilan Inokulasi di Lapangan

Perpindahan mikroba dari lingkungan laboratorium yang terkontrol menuju lahan pertanian terbuka merupakan sebuah transisi ekologis yang ekstrem. Di lapangan, sel mikroba dihadapkan pada kondisi alam yang fluktuatif dan penuh tekanan. Menurut (Kaminsky *et al*., 2019), tingkat keberhasilan inokulum untuk bisa bertahan hidup, beradaptasi, dan memberikan manfaat fungsional sangat ditentukan oleh interaksi yang rumit antara tiga faktor, yakni: abiotik (lingkungan fisik/kimia), biotik (organisme lain), dan agronomis (pengelolaan lahan).

9.4.1 Aplikasi untuk Pupuk Hayati (*Biofertilizer*)

Kondisi fisik dan kimiawi di lapangan merupakan tantangan pertama yang langsung dihadapi oleh agen mikroba sesaat setelah diaplikasikan. Beberapa faktor utama yang memengaruhi kelangsungan hidup mereka meliputi:

- **Suhu dan Kelembaban:** Mikroba yang tidak mampu membentuk spora (seperti *Pseudomonas* dan *Rhizobium*) sangat rentan mati akibat kekeringan dan perubahan suhu yang ekstrem. Suhu tanah yang menembus 40°C pada siang hari dapat merusak protein di dalam sel mikroba. Oleh sebab itu, menjaga kelembapan tanah, misalnya melalui penggunaan mulsa organik, sangat penting untuk memastikan mikroba tetap hidup (Kumar Arora *et al*., 2020) .
- **Radiasi Ultraviolet (UV):** Paparan sinar matahari langsung, khususnya spektrum UV, sangat mematikan bagi sel mikroba aktif. Faktor ini wajib menjadi perhatian utama ketika melakukan teknik penyemprotan daun (*foliar spray*). Sebagai langkah

pencegahan, penyemprotan sangat dianjurkan untuk dilakukan pada sore hari atau menggunakan produk yang dilengkapi dengan formula pelindung UV (*UV-protectant*).

- **Karakteristik Tanah (pH dan Salinitas):** Tingkat keasaman (pH) tanah sangat memengaruhi keutuhan membran sel dan ketersediaan nutrisi bagi mikroba. Mayoritas bakteri pertanian tumbuh optimal pada pH netral (6,5–7,5). Oleh karena itu, inokulasi pada lahan masam seperti tanah gambut (pH < 5) berisiko tinggi mengalami kegagalan jika tidak didahului dengan proses pengapuran tanah (*ameliorasi*).

9.4.2 Faktor Biotik (Interaksi Ekologis)

Ketika pertama kali diaplikasikan ke lapangan, mikroba introduksi (pendatang) harus langsung beradaptasi dan bersaing untuk memperebutkan ruang hidup serta sumber nutrisi. Tantangan ekologis ini secara umum mencakup tiga hal utama:

- **Kompetisi dengan Mikroflora *Indigenous* (Asli):** Lahan pertanian merupakan ekosistem padat yang telah diisi oleh miliaran mikroba asli yang sangat adaptif terhadap lingkungannya. Mikroba pendatang ini harus mampu bersaing secara ketat untuk mendapatkan sumber karbon dari cairan akar tanaman (eksudat). Apabila jumlah awal inokulan yang diberikan terlalu rendah (di bawah 10^6 CFU/g tanah), mereka akan dengan mudah kalah bersaing dan tersingkir oleh populasi mikroba (Sessitsch *et al*., 2012).
- **Ancaman Pemangsaan (*Predasi*):** Kelangsungan hidup mikroba introduksi sering kali terancam oleh keberadaan pemangsa mikroskopis di dalam tanah.

Organisme predator seperti protozoa dan nematoda pemakan bakteri (*bacterivorous nematodes*) secara alami akan memangsa sel-sel bakteri tersebut untuk memenuhi kebutuhan energinya.

- **Kompabilitas dengan Tanaman Inang:** Kelangsungan hidup mikroba introduksi sering kali terancam oleh keberadaan pemangsa mikroskopis di dalam tanah. Organisme predator seperti protozoa dan nematoda pemakan bakteri (*bacterivorous nematodes*) secara alami akan memangsa sel-sel bakteri tersebut untuk memenuhi kebutuhan energinya.

9.4.3 Faktor Teknis dan Praktik Agronomis

Praktik budidaya yang dilakukan oleh manusia di lapangan (faktor antropogenik) sering kali menjadi penentu akhir dari kelangsungan hidup mikroba inokulan. Beberapa faktor teknis utama meliputi:

- **Kesesuaian dengan Bahan Kimia Pertanian (Agrokimia)**: Penggunaan bahan kimia sintetis tetap menjadi tantangan terbesar bagi efikasi inokulan di sektor agroindustri. Aplikasi simultan antara inokulan dengan pestisida (fungisida, bakterisida, herbisida) atau pupuk anorganik berkonsentrasi tinggi (seperti Urea dan KCl) seringkali bersifat antagonis. Bahan aktif dalam agrokimia dapat memicu stres oksidatif, gangguan metabolisme, hingga kerusakan integritas membran sel mikroba introduksi. Untuk memitigasi risiko kegagalan, diperlukan strategi jeda aplikasi (*application gap*) yang ketat. Praktik terbaik menyarankan pemberian selang waktu minimal 7 hingga 14 hari antara aplikasi bahan kimia dan produk hayati untuk memastikan residu kimia telah

terdegradasi ke tingkat yang aman bagi mikroorganisme (Mącik, 2020).

- **Kualitas Air Pelarut:** Kualitas air yang digunakan untuk membuat larutan inokulum (baik untuk disemprot maupun disiram) sangatlah krusial. Penggunaan air ledeng (PAM) tidak disarankan karena residu klorin di dalamnya dapat mematikan mikroba saat masih berada di dalam tangki semprot (*sprayer*). Sebagai pedoman praktis yang wajib dibiasakan, sangat dianjurkan untuk menggunakan air sumur, air hujan, atau air ledeng yang telah diendapkan semalaman sebelum dicampur dengan inokulum.

9.5 Evaluasi dan Indikator Keberhasilan Inokulasi

Pada skala industri pertanian yang besar, penerapan bioteknologi mutlak membutuhkan sistem pemantauan dan evaluasi yang ketat. Tolok ukur keberhasilan inokulasi tidak sebatas dinilai dari selesainya proses penyemprotan atau penaburan produk di lahan. Keberhasilan sejati harus dibuktikan secara empiris, yakni ketika mikroba terbukti mampu membentuk koloni dan memberikan manfaat yang dapat diukur secara nyata pada tanaman inang. Apabila indikator evaluasi ini tidak ditetapkan dengan jelas, perhitungan keuntungan finansial (*Return on Investment* / ROI) dari penggunaan produk hayati menjadi bias dan tidak akurat (Parnell *et al*., 2016). Secara umum, penilaian keberhasilan inokulasi ini dibagi menjadi dua pendekatan utama, yaitu pengamatan makroskopis secara langsung di lapangan dan analisis mikroskopis di laboratorium.

9.5.1 Faktor Teknis dan Agronomis

Indikator ini merujuk pada parameter fisik dan visual yang dapat diukur secara langsung di lahan pertanian untuk mengevaluasi respons tanaman pasca-inokulasi. Beberapa parameter utamanya meliputi:

- **Perkembangan Arsitektur Akar:** Parameter ini merupakan tolok ukur awal dan paling utama, khususnya dalam evaluasi pupuk hayati. Kesuksesan mikroba mendominasi area perakaran terlihat dari bertambahnya panjang akar, jumlah akar cabang (lateral), serta pertumbuhan rambut akar yang lebih lebat dibandingkan tanaman kontrol. Khusus pada famili legum (kacang-kacangan), keberhasilan inokulasi *Rhizobium* dinilai secara spesifik dari jumlah, ukuran, dan munculnya warna merah muda (kandungan leghemoglobin) pada bintil akar yang aktif (Vacheron *et al*., 2013).
- **Pertumbuhan Vegetatif dan Biomassa:** Parameter ini diukur melalui standar pertumbuhan fisik, seperti tinggi tanaman, diameter batang, luas daun, hingga bobot kering tajuk dan akar. Peningkatan angka yang signifikan pada indikator ini membuktikan bahwa mikroba telah bekerja efektif dalam membantu penyerapan nutrisi atau memproduksi hormon pertumbuhan tanaman, seperti IAA (*Indole-3-Acetic Acid*).
- **Komponen Hasil Panen (*Yield Component*):** Merupakan indikator evaluasi tahap akhir yang paling krusial bagi pelaku agroindustri. Kesuksesan dinilai dari total tonase panen per hektare, bobot buah atau biji, serta indeks panen secara keseluruhan.
- **Penurunan Tingkat Serangan Penyakit:** Indikator ini dikhususkan untuk mengevaluasi efektivitas agen biokontrol. Penilaian didasarkan

pada rumus Kejadian Penyakit (*Disease Incidence*) dan Indeks Keparahan Penyakit (*Disease Severity Index*). Berkurangnya persentase keparahan secara drastis pada tanaman yang diberi perlakuan, dibandingkan dengan tanaman kontrol, menjadi bukti nyata bahwa mikroba antagonis sukses menekan perkembangan patogen (Köhl *et al*., 2019).

9.5.2 Indikator Mikroskopis dan Laboratorium (Validasi Kolonisasi)

Pengamatan lapangan yang bersifat makroskopis rentan terhadap bias, mengingat perbaikan pertumbuhan tanaman dapat dipicu oleh variabel lingkungan lainnya, seperti intensitas curah hujan atau keberadaan residu pupuk dari masa tanam sebelumnya. Oleh sebab itu, diperlukan pembuktian melalui uji laboratorium untuk memvalidasi secara empiris bahwa peningkatan kualitas tanaman tersebut benar-benar merupakan hasil dari aktivitas mikroba yang diaplikasikan. Proses validasi laboratorium ini umumnya dilakukan melalui dua metode utama:

- **Reisolasi dan Pemantauan Dinamika Populasi:** Setelah inokulasi dilakukan (umumnya pada rentang waktu 7, 14, hingga 30 hari), sampel berupa tanah area perakaran (*rizosfer*), akar, maupun daun diambil untuk diuji. Sampel tersebut kemudian melalui tahapan pengenceran berseri dan dibiakkan pada media selektif di laboratorium guna mengukur fluktuasi kepadatan populasinya (dalam satuan CFU/g jaringan atau tanah). Proses inokulasi dinilai berhasil apabila kurva pertumbuhan populasi mikroba yang diaplikasikan menunjukkan tren yang stabil atau jumlahnya mampu melampaui populasi mikroba lokal (*indigenous*).

- **Pemanfaatan Penanda Molekuler:** Pada tingkatan industri agroteknologi modern, proses evaluasi memanfaatkan teknologi pelacakan galur spesifik melalui penanda genetik. Teknik yang lazim digunakan meliputi penyisipan gen pendarfluor (*Green Fluorescent Protein* / GFP) atau analisis *Quantitative PCR* (qPCR). Pendekatan mutakhir ini memfasilitasi para teknisi untuk melacak lokasi penempelan mikroba pada jaringan tanaman dengan tingkat presisi yang tinggi, serta membedakannya secara mutlak dari bakteri alami yang sudah menetap di dalam tanah (Parnell *et al*., 2016).

Proses inokulasi merupakan tahapan krusial yang menjembatani potensi bioteknologi mikroba dari laboratorium menuju realitas aplikasinya di lapangan. Keberhasilan dalam merancang dan mengeksekusi teknik inokulasi sangat menentukan kemampuan mikroba untuk bertahan hidup dalam menghadapi berbagai cekaman lingkungan abiotik maupun biotik yang ekstrem. Bagi sektor agroindustri, pemilihan metode aplikasi—seperti perlakuan benih (*seed treatment*), aplikasi langsung ke tanah (*soil application*), penyemprotan daun (*foliar spray*), hingga sistem fertigasi—harus dipertimbangkan secara matang. Metode yang dipilih wajib selaras dengan bentuk formulasi dan fungsi spesifik mikroba, serta harus mempertimbangkan efisiensi operasional dan kompatibilitasnya dengan praktik budidaya (agronomis) yang diterapkan.

Selanjutnya, penerapan inokulasi ini harus disertai dengan sistem evaluasi yang terstruktur untuk memastikan keberhasilan agen hayati dalam membentuk koloni. Evaluasi tersebut wajib dilakukan secara komprehensif dengan memadukan parameter makroskopis untuk melihat respons fisik tanaman di lapangan, serta divalidasi dengan analisis mikroskopis di laboratorium sebagai pembuktian empiris.

Pada akhirnya, penguasaan teknik inokulasi dan evaluasi yang menyeluruh ini akan memaksimalkan potensi fitomikrobiologi. Hal ini menjadi landasan penting untuk mewujudkan sistem pertanian dan agroindustri yang berpresisi tinggi, produktif secara ekonomi, sekaligus berkelanjutan secara ekologis.

DAFTAR PUSTAKA

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. https://doi.org/10.1007/s11104-013-1956-x

Berger, F., 1996. Effect of Pathogen Inoculum, Antagonist Density, and Plant Species on Biological Control of Phytophthora and Pythium Damping-off by *Bacillus subtilis* Cot1 in High-Humidity Fogging Glasshouses. Phytopathology 86, 428. https://doi.org/10.1094/Phyto-86-428

Berninger, T., González López, Ó., Bejarano, A., Preininger, C., Sessitsch, A., 2018. Maintenance and assessment of cell viability in formulation of non-sporulating bacterial inoculants. Microb. Biotechnol. 11, 277–301. https://doi.org/10.1111/1751-7915.12880

Bhattacharyya, P.N., Jha, D.K., 2012. Plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR): emergence in agriculture. World J. Microbiol. Biotechnol. 28, 1327–1350. https://doi.org/10.1007/s11274-011-0979-9

Brahmaprakash, G.P., Sahu, P., 2012. Biofertilizers for Sustainability. J. Indian Inst. Sci. 92, 37–62.

Compant, S., Clément, C., Sessitsch, A., 2010. Plant growth-promoting bacteria in the rhizo- and endosphere of plants: Their role, colonization, mechanisms involved and prospects for utilization. Soil Biol. Biochem. 42, 669–678. https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2009.11.024

Dal Cortivo, C., Barion, G., Visioli, G., Mattarozzi, M., Mosca, G., Vamerali, T., 2017. Increased root growth and

nitrogen accumulation in common wheat following PGPR inoculation: Assessment of plant-microbe interactions by ESEM. Agric. Ecosyst. Environ. 247, 396–408. https://doi.org/10.1016/j.agee.2017.07.006

Hardoim, P.R., van Overbeek, L.S., Berg, G., Pirttilä, A.M., Compant, S., Campisano, A., Döring, M., Sessitsch, A., 2015. The Hidden World within Plants: Ecological and Evolutionary Considerations for Defining Functioning of Microbial Endophytes. Microbiology and Molecular Biology Reviews 79, 293–320. https://doi.org/10.1128/MMBR.00050-14

Herrmann, L., Lesueur, D., 2013. Challenges of formulation and quality of biofertilizers for successful inoculation. Appl. Microbiol. Biotechnol. 97, 8859–8873. https://doi.org/10.1007/s00253-013-5228-8

Heydari, A., Pessarakli, M., 2010. A Review on Biological Control of Fungal Plant Pathogens Using Microbial Antagonists. Journal of Biological Sciences 10, 273–290. https://doi.org/10.3923/jbs.2010.273.290

Itelima, Bang, W.J., Onyimba, I.A., Sila, Egbere, O.J., 2018. Bio-fertilizers as key player in enhancing soil fertility and crop productivity: A Review 6, 73–83. https://doi.org/10.26765/DRJAFS.2018.4815

Kaminsky, L.M., Trexler, R. V., Malik, R.J., Hockett, K.L., Bell, T.H., 2019. The Inherent Conflicts in Developing Soil Microbial Inoculants. Trends Biotechnol. 37, 140–151. https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2018.11.011

Köhl, J., Kolnaar, R., Ravensberg, W.J., 2019. Mode of Action of Microbial Biological Control Agents Against Plant Diseases: Relevance Beyond Efficacy. Front. Plant Sci. 10. https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00845

Kumar Arora, N., Fatima, T., Mishra, J., Mishra, I., Verma, S., Verma, R., Verma, M., Bhattacharya, A., Verma, P., Mishra, P., Bharti, C., 2020. Halo-tolerant plant growth promoting rhizobacteria for improving productivity and remediation of saline soils. J. Adv. Res. 26, 69–82. https://doi.org/10.1016/j.jare.2020.07.003

Mącik, M., G.A. and F.M., 2020. Biofertilizers in agriculture: An overview on concepts, strategies and effects on soil microorganisms 31–87. https://doi.org/10.1016/bs.agron.2020.02.001

Malusá, E., Sas-Paszt, L., Ciesielska, J., 2012. Technologies for Beneficial Microorganisms Inocula Used as Biofertilizers. The Scientific World Journal 2012, 1–12. https://doi.org/10.1100/2012/491206

Mitter, B., Brader, G., Afzal, M., Compant, S., Naveed, M., Trognitz, F., Sessitsch, A., 2013. Advances in Elucidating Beneficial Interactions Between Plants, Soil, and Bacteria. pp. 381–445. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-407685-3.00007-4

O'Callaghan, M., 2016. Microbial inoculation of seed for improved crop performance: issues and opportunities. Appl. Microbiol. Biotechnol. 100, 5729–5746. https://doi.org/10.1007/s00253-016-7590-9

Parnell, J.J., Berka, R., Young, H.A., Sturino, J.M., Kang, Y., Barnhart, D.M., DiLeo, M. V., 2016. From the Lab to the Farm: An Industrial Perspective of Plant Beneficial Microorganisms. Front. Plant Sci. 7. https://doi.org/10.3389/fpls.2016.01110

Preininger, C., Sauer, U., Bejarano, A., Berninger, T., 2018. Concepts and applications of foliar spray for microbial inoculants. Appl. Microbiol. Biotechnol. 102, 7265–7282. https://doi.org/10.1007/s00253-018-9173-4

Rocha, I., Ma, Y., Vosatka, M., Freitas, H., Oliveira, R., 2019. Growth and nutrition of cowpea (Vigna unguiculata) under water deficit as influenced by microbial inoculation via seed coating. J. Agron. Crop Sci. 205. https://doi.org/10.1111/jac.12335

Schoebitz, M., López Belchí, M., Roldán, A., 2013. Bioencapsulation of microbial inoculants for better soil-plant fertilization. A review. Agron. Sustain. Dev. 33, 751–765. https://doi.org/10.1007/s13593-013-0142-0

Sessitsch, A., Hardoim, P., Döring, J., Weilharter, A., Krause, A., Woyke, T., Mitter, B., Hauberg-Lotte, L., Friedrich, F., Rahalkar, M., Hurek, T., Sarkar, A., Bodrossy, L., van Overbeek, L., Brar, D., van Elsas, J.D., Reinhold-Hurek, B., 2012. Functional Characteristics of an Endophyte Community Colonizing Rice Roots as Revealed by Metagenomic Analysis. Molecular Plant-Microbe Interactions® 25, 28–36. https://doi.org/10.1094/MPMI-08-11-0204

Vacheron, J., Desbrosses, G., Bouffaud, M.-L., Touraine, B., Moënne-Loccoz, Y., Muller, D., Legendre, L., Wisniewski-Dyé, F., Prigent-Combaret, C., 2013. Plant growth-promoting rhizobacteria and root system functioning. Front. Plant Sci. 4. https://doi.org/10.3389/fpls.2013.00356

Vassilev, N., Vassileva, M., Martos, V., Garcia del Moral, L.F., Kowalska, J., Tylkowski, B., Malusá, E., 2020. Formulation of Microbial Inoculants by Encapsulation in Natural Polysaccharides: Focus on Beneficial Properties of Carrier Additives and Derivatives. Front. Plant Sci. 11. https://doi.org/10.3389/fpls.2020.00270

BAB 10

MIKROORGANISME: FUNGI, BAKTERI, DAN VIRUS YANG BERPERAN SEBAGAI PATOGEN TANAMAN

Oleh Abdul Sahid

10.1 Peran Mikroorganisme dalam Ekosistem Tanaman

Mikroorganisme memiliki peran penting dalam menjaga keseimbangan ekosistem tanaman, meskipun ukurannya sangat kecil dan sering tidak terlihat oleh mata manusia (Berg *et al*., 2016; van der Heijden *et al*., 2008). Mikroorganisme seperti bakteri, fungi, dan alga hidup di dalam tanah, di permukaan akar, maupun di dalam jaringan tanaman (Compant *et al*., 2010). Mereka berperan dalam menyediakan nutrisi, menguraikan bahan organik, melindungi tanaman dari patogen, serta menjaga keseimbangan lingkungan (Lugtenberg & Kamilova, 2009).

Mikroorganisme membantu tanaman memperoleh unsur hara penting seperti nitrogen, fosfor, dan kalium yang dibutuhkan untuk pertumbuhan (Richardson *et al*., 2009). Tanpa peran ini, kesuburan tanah akan menurun karena daur ulang nutrisi tidak berjalan optimal (Bardgett & van der Putten, 2014). Selain itu, mikroorganisme menguraikan bahan organik seperti daun kering dan sisa tanaman menjadi

senyawa yang lebih sederhana sehingga dapat dimanfaatkan sebagai sumber nutrisi (Paul, 2015). Proses ini juga berkontribusi dalam memperbaiki struktur tanah agar lebih gembur dan mampu menyimpan air, sehingga mendukung pertumbuhan akar tanaman (Six *et al*., 2004; Brady & Weil, 2016).

Selain mendukung pertumbuhan, mikroorganisme juga melindungi tanaman dari serangan penyakit (Lugtenberg & Kamilova, 2009). Beberapa bakteri dan fungi berfungsi sebagai agen hayati yang dapat menghambat pertumbuhan patogen melalui produksi senyawa antibakteri atau antifungi (Haas & Défago, 2005). Keberadaan mikroorganisme ini memperkuat sistem pertahanan alami tanaman dan mendukung praktik pertanian berkelanjutan yang mengurangi penggunaan pestisida sintetis (Compant *et al*., 2005). Mikroorganisme juga dapat merangsang sistem imun tanaman sehingga lebih tahan terhadap stres lingkungan seperti kekeringan dan perubahan suhu (Pieterse *et al*., 2014).

Interaksi antara tanaman dan mikroorganisme sering berupa hubungan simbiosis yang saling menguntungkan (Smith & Read, 2008). Contohnya adalah mikoriza, yaitu fungi yang hidup pada akar tanaman dan membantu penyerapan air serta nutrisi, sementara tanaman menyediakan makanan bagi fungi tersebut (Smith & Read, 2008). Hal ini menunjukkan bahwa mikroorganisme merupakan mitra penting bagi tanaman, bukan sekadar penghuni tanah.

Peran mikroorganisme juga terlihat dalam siklus biogeokimia, terutama dalam ketersediaan unsur hara (Falkowski *et al*., 2008). Dalam siklus nitrogen, mikroorganisme mengubah nitrogen dari udara menjadi bentuk yang dapat diserap tanaman melalui proses fiksasi nitrogen, seperti yang dilakukan oleh bakteri *Rhizobium* sp. pada akar tanaman kacang-kacangan (Masson-Boivin *et al*.,

2009). Selain itu, mikroorganisme juga berperan dalam siklus karbon dan fosfor dengan menguraikan bahan organik serta melarutkan fosfor agar tersedia bagi tanaman (Kuzyakov & Blagodatskaya, 2015; Richardson *et al*., 2009).

Meskipun demikian, tidak semua mikroorganisme menguntungkan. Beberapa dapat menyebabkan penyakit dan menurunkan hasil panen (Agrios, 2005). Namun, dalam ekosistem yang seimbang, mikroorganisme berbahaya umumnya dapat dikendalikan secara alami melalui kompetisi dengan mikroorganisme yang menguntungkan (Harman *et al*., 2004). Oleh karena itu, menjaga keseimbangan mikroorganisme dalam tanah sangat penting. Praktik pertanian seperti penggunaan pupuk organik dan rotasi tanaman dapat meningkatkan populasi mikroorganisme menguntungkan, sedangkan penggunaan bahan kimia sintetis berlebihan justru dapat merusak keseimbangan tersebut (Bender *et al*., 2016; Tilman *et al*., 2002).

10.2 Mikroorganisme sebagai Patogen Tanaman

Patogen tanaman merupakan organisme atau agen biotik yang mampu menyebabkan penyakit pada tanaman dengan mengganggu proses fisiologis normalnya (Agrios, 2005). Kehadiran patogen tanaman sering kali tidak langsung terlihat, namun dampaknya dapat menurunkan kualitas dan kuantitas hasil pertanian secara signifikan (Strange & Scott, 2005). Patogen tanaman meliputi bakteri, fungi, dan virus yang dapat menyebabkan berbagai penyakit pada tanaman (Schumann & D'Arcy, 2010). Keberadaan patogen sering menimbulkan kerugian ekonomi yang signifikan karena infeksi dapat mengganggu proses fisiologis seperti fotosintesis dan penyerapan nutrisi serta merusak jaringan tanaman sehingga menghambat pertumbuhan (Agrios, 2005).

Penyebaran penyakit tanaman sangat dipengaruhi oleh kondisi lingkungan, terutama suhu dan kelembapan (Coakley *et al*., 1999). Lingkungan yang lembap umumnya mendukung perkembangan fungi, sedangkan bakteri lebih mudah menyebar melalui air dan jaringan tanaman yang terluka (Agrios, 2005). Sementara itu, virus tanaman biasanya ditularkan oleh vektor seperti serangga (Ng & Falk, 2006).

Mikroorganisme patogen memiliki mekanisme infeksi yang beragam (Agrios, 2005). Fungi menginfeksi tanaman melalui spora yang berkembang pada kondisi lingkungan yang sesuai dan sering menyebabkan penyakit seperti bercak daun serta busuk akar (Schumann & D'Arcy, 2010). Bakteri menyerang melalui stomata atau luka pada jaringan, kemudian menghasilkan enzim dan toksin yang merusak sel tanaman (Gnanamanickam, 2006). Virus tidak dapat hidup mandiri dan bergantung pada sel inang untuk bereplikasi, sehingga infeksinya sering menimbulkan gejala seperti mosaik dan klorosis (Hull, 2014).

Proses infeksi melibatkan interaksi kompleks antara patogen dan tanaman (Jones & Dangl, 2006). Patogen dapat menghindari atau melemahkan sistem pertahanan tanaman, sementara tanaman merespons dengan membentuk mekanisme perlindungan seperti produksi senyawa antimikroba (Dodds & Rathjen, 2010). Namun, dalam beberapa kasus, patogen tetap mampu mengatasi pertahanan tanaman tersebut dan menyebabkan penyakit (Agrios, 2005).

10.3 Dampak Penyakit Tanaman terhadap Hasil Pertanian dan Ekonomi

Penyakit tanaman merupakan salah satu faktor utama yang memengaruhi produktivitas pertanian di berbagai belahan dunia (Strange & Scott, 2005). Setiap tanaman memiliki kerentanan terhadap patogen tertentu yang dapat

menurunkan kualitas dan kuantitas hasil panen (Agrios, 2005). Serangan fungi, bakteri, dan virus dapat merusak jaringan tanaman serta mengganggu proses fisiologis sehingga pertumbuhan tidak optimal dan hasil panen menurun (Schumann & D'Arcy, 2010). Dalam kondisi parah, penyakit bahkan dapat menyebabkan gagal panen, terutama jika tidak dilakukan pengendalian yang tepat (Strange & Scott, 2005). Perubahan iklim juga memperburuk situasi karena dapat meningkatkan penyebaran patogen, terutama pada kondisi lingkungan yang lembap dan suhu tertentu (Coakley *et al*., 1999; Chakraborty & Newton, 2011).

Dampak penyakit tanaman tidak hanya menurunkan hasil, tetapi juga memengaruhi kualitas produk pertanian (Agrios, 2005). Tanaman yang terinfeksi sering mengalami perubahan bentuk, warna, dan kandungan nutrisi sehingga nilai jualnya menurun (Schumann & D'Arcy, 2010). Dalam beberapa kasus, hasil panen bahkan tidak layak dikonsumsi (Strange & Scott, 2005). Kondisi ini menyebabkan kerugian ekonomi bagi petani, ditambah dengan biaya pengendalian seperti penggunaan pestisida sintetis yang tidak sedikit (Oerke, 2006). Jika pengendalian tidak efektif, biaya yang dikeluarkan tidak sebanding dengan hasil yang diperoleh (Oerke, 2006). Oleh karena itu, diperlukan strategi pengendalian yang efisien dan berkelanjutan agar kerugian dapat ditekan (Barker & Pilbeam, 2015).

Secara lebih luas, penyakit tanaman juga berdampak pada ketahanan pangan (Strange & Scott, 2005). Penurunan produksi dapat menyebabkan berkurangnya pasokan di pasar dan memicu kenaikan harga pangan (FAO, 2011). Kondisi ini berpotensi meningkatkan inflasi serta menurunkan daya beli masyarakat (World Bank, 2022). Negara yang bergantung pada impor pangan menjadi lebih rentan terhadap fluktuasi harga global (FAO, 2011). Selain itu, kualitas produk yang tidak memenuhi standar dapat

menghambat ekspor dan menurunkan devisa negara (FAO, 2011; Oerke, 2006).

Dari sisi sosial, dampak penyakit tanaman turut dirasakan oleh masyarakat pedesaan yang bergantung pada sektor pertanian (IFAD, 2016). Penurunan hasil panen dapat mengurangi pendapatan rumah tangga petani dan meningkatkan risiko kemiskinan (World Bank, 2022). Ketidakpastian produksi juga dapat mendorong perpindahan tenaga kerja ke daerah perkotaan, yang pada akhirnya mempengaruhi struktur sosial masyarakat (IFAD, 2016). Selain itu, berkurangnya pendapatan berdampak pada akses terhadap pendidikan dan layanan kesehatan (UNDP, 2020). Dalam jangka panjang, kondisi ini dapat menghambat pembangunan ekonomi daerah (World Bank, 2022).

10.4 Konsep Dasar Patogen Tanaman

10.4.1 Proses Infeksi dan Perkembangan Penyakit Tanaman

Proses infeksi penyakit tanaman diawali ketika patogen mencapai permukaan tanaman dan menemukan kondisi lingkungan yang sesuai untuk berkembang (Agrios, 2005). Tahap ini dikenal sebagai inokulasi, yaitu keberadaan propagul patogen seperti spora, sel bakteri, atau partikel virus pada permukaan tanaman (Schumann & D'Arcy, 2010). Keberhasilannya dipengaruhi oleh faktor lingkungan seperti kelembapan, suhu, dan ketersediaan air (Coakley *et al*., 1999). Setelah itu, patogen harus mampu melekat dan bertahan dari pengaruh eksternal, misalnya sinar ultraviolet dan kekeringan (Agrios, 2005). Patogen kemudian masuk ke dalam jaringan tanaman melalui luka atau bukaan alami seperti stomata, atau dengan bantuan struktur khusus yang mendukung penetrasi (Schumann & D'Arcy, 2010).

Jika pertahanan awal tanaman tidak mampu menghambatnya, proses infeksi akan berlanjut (Jones & Dangl, 2006).

Setelah berhasil masuk, patogen mulai berkembang dan menyebar di dalam jaringan tanaman (Agrios, 2005). Fungi membentuk hifa yang menjalar di antara atau menembus sel, bakteri berkembang di ruang antar sel sambil menghasilkan enzim perusak, sedangkan virus memanfaatkan sistem sel tanaman untuk bereplikasi dan menyebar ke sel lain (Hull, 2014; Gnanamanickam, 2006). Selama proses ini, patogen menghasilkan enzim dan toksin yang mempercepat kerusakan jaringan tanaman (Agrios, 2005). Tanaman merespons dengan mengaktifkan sistem pertahanan seperti produksi senyawa antimikroba, namun beberapa patogen mampu menghindari atau menekan respons tersebut (Dodds & Rathjen, 2010). Interaksi ini menentukan tingkat keberhasilan infeksi oleh patogen tanaman (Jones & Dangl, 2006).

Tahap selanjutnya ditandai dengan munculnya gejala penyakit seperti perubahan warna daun, klorosis, nekrosis, atau deformasi jaringan (Agrios, 2005). Gejala ini muncul akibat terganggunya proses fisiologis tanaman, termasuk fotosintesis dan distribusi nutrisi (Schumann & D'Arcy, 2010). Dalam beberapa kasus, patogen dapat menyebar secara sistemik melalui jaringan pembuluh sehingga gejala tidak hanya muncul di titik awal infeksi tetapi juga pada bagian lain tanaman (Hull, 2014). Jika tidak dikendalikan, patogen dapat berkembang cepat dan menyebabkan kerusakan luas bahkan kematian tanaman (Strange & Scott, 2005).

Siklus penyakit berlanjut melalui reproduksi dan penyebaran patogen ke tanaman lain (Agrios, 2005). Patogen menghasilkan struktur reproduktif seperti

spora atau propagul lain yang dapat menyebar melalui angin, air, serangga, maupun aktivitas manusia (Schumann & D'Arcy, 2010). Tanaman yang terinfeksi menjadi sumber penularan baru, terutama jika kondisi lingkungan mendukung perkembangan patogen (Coakley *et al*., 1999). Dalam skala luas, penyebaran ini dapat memicu wabah penyakit dan menimbulkan kerugian besar (Strange & Scott, 2005; Madden *et al*., 2007).

10.4.2 Faktor yang Mempengaruhi Virulensi Patogen

Virulensi adalah tingkat kemampuan patogen dalam menimbulkan kerusakan atau penyakit yang serius (Madigan *et al*., 2021). Salah satu faktor utama yang mempengaruhi virulensi adalah kemampuan adhesi patogen terhadap sel inang, yang memungkinkan mikroorganisme menempel dan mulai menginfeksi jaringan (Finlay & Falkow, 1997). Proses adhesi dimediasi oleh struktur khusus seperti pili, fimbriae, atau protein permukaan yang berfungsi sebagai perekat biologis (Kline *et al*., 2010). Selain itu, kemampuan invasi juga menjadi faktor penting, dimana patogen mampu menembus jaringan inang dan menyebar ke bagian tubuh lainnya (Casadevall & Pirofski, 2001). Mekanisme invasi ini sering kali melibatkan enzim seperti hialuronidase dan kolagenase yang merusak matriks ekstraseluler (Schaechter *et al*., 2013).

Faktor lain yang tidak kalah penting adalah kemampuan patogen untuk menghindari sistem imun inang (Casadevall & Pirofski, 2001). Beberapa patogen memiliki kapsul atau mampu memodifikasi antigen permukaannya sehingga tidak mudah dikenali oleh sistem imun (Moxon & Kroll, 1990). Selain itu, produksi toksin juga berperan besar dalam meningkatkan virulensi, baik berupa eksotoksin maupun endotoksin

(Madigan *et al*., 2021). Eksotoksin biasanya sangat spesifik dan kuat dalam merusak sel, sedangkan endotoksin memicu respons inflamasi yang luas (Ryan & Ray, 2014).

Virulensi patogen juga dipengaruhi oleh faktor genetik yang menentukan kemampuan adaptasi mikroorganisme terhadap lingkungan inang (Finlay & Falkow, 1997). Gen-gen virulensi biasanya terletak pada kromosom atau plasmid yang dapat berpindah antar bakteri melalui mekanisme transfer gen horizontal (Frost *et al*., 2005). Proses ini memungkinkan patogen memperoleh sifat baru seperti resistensi antibiotik atau peningkatan kemampuan infeksi (Davies & Davies, 2010). Selain itu, regulasi ekspresi gen virulensi juga sangat penting dalam menentukan kapan dan bagaimana faktor virulensi diaktifkan (Sharma & Anand, 2002). Beberapa patogen menggunakan sistem quorum sensing untuk mengatur ekspresi gen berdasarkan kepadatan populasi mereka (Miller & Bassler, 2001). Dengan mekanisme ini, patogen dapat mengoptimalkan serangan terhadap inang ketika jumlah mereka cukup besar (Miller & Bassler, 2001). Faktor lingkungan seperti suhu, pH, dan ketersediaan nutrisi juga dapat memicu perubahan ekspresi gen virulensi (Storz & Hengge-Aronis, 2000). Misalnya, beberapa bakteri hanya mengekspresikan toksin tertentu ketika berada dalam tubuh inang (Schaechter *et al*., 2013). Selain itu, mutasi genetik juga dapat meningkatkan atau menurunkan virulensi patogen (Andersson & Hughes, 2010). Mutasi ini dapat terjadi secara alami atau akibat tekanan seleksi seperti penggunaan antibiotik (Davies & Davies, 2010). Oleh karena itu, faktor genetik memainkan peran penting dalam evolusi dan dinamika virulensi patogen (Madigan *et al*., 2021).

Interaksi antara patogen dan sistem imun inang juga menjadi faktor kunci yang mempengaruhi tingkat virulensi (Casadevall & Pirofski, 2001). Sistem imun memiliki berbagai mekanisme pertahanan seperti fagositosis, produksi antibodi, dan aktivasi sel T untuk melawan infeksi (Janeway *et al*., 2017). Namun, patogen yang virulen biasanya memiliki strategi khusus untuk menghindari atau menekan respons imun ini (Finlay & McFadden, 2006). Misalnya, beberapa bakteri mampu bertahan hidup di dalam sel fagosit dengan menghambat proses penghancuran (Hornef *et al*., 2002). Selain itu, virus dapat menginfeksi dan merusak sel imun secara langsung sehingga melemahkan sistem pertahanan tubuh (Virgin *et al*., 2009).

Patogen juga dapat menghasilkan molekul yang menghambat sinyal imun sehingga respons tubuh menjadi tidak efektif (Finlay & McFadden, 2006). Variasi antigenik juga merupakan strategi penting yang digunakan oleh patogen untuk menghindari deteksi imun (Deitsch *et al*., 2009). Dengan mengubah struktur antigen permukaan, patogen dapat terus menginfeksi meskipun tubuh telah membentuk antibodi (Janeway *et al*., 2017). Selain itu, kondisi kesehatan inang juga mempengaruhi tingkat virulensi yang dirasakan (Casadevall & Pirofski, 2003). Inang dengan sistem imun yang lemah cenderung lebih rentan terhadap infeksi yang parah (Medzhitov, 2007). Oleh karena itu, virulensi tidak hanya ditentukan oleh patogen, tetapi juga oleh kondisi inang (Casadevall & Pirofski, 2003).

Faktor lingkungan eksternal juga berperan penting dalam menentukan virulensi patogen (Casadevall, 2004). Lingkungan yang mendukung pertumbuhan mikroorganisme dapat meningkatkan peluang patogen untuk berkembang dan menyebar (WHO, 2020). Misalnya, suhu yang optimal dapat mempercepat

replikasi patogen dan meningkatkan produksi faktor virulensi (Patz *et al*., 2005).

10.5 Fungi sebagai Patogen Tanaman

10.5.1 Karakteristik Umum Fungi Patogen

Fungi patogen merupakan kelompok organisme eukariotik yang memiliki kemampuan untuk menyebabkan penyakit pada manusia, hewan, maupun tumbuhan (McGinnis & Tyring, 1996). Secara umum, fungi memiliki struktur sel yang kompleks dengan dinding sel yang tersusun atas kitin, glukan, dan manan yang membedakannya dari bakteri maupun sel inang (McGinnis & Tyring, 1996). Fungi patogen dapat berbentuk uniseluler seperti ragi atau multiseluler seperti kapang, dan beberapa spesies menunjukkan dimorfisme tergantung kondisi lingkungan (McGinnis & Tyring, 1996). Kemampuan dimorfik ini memungkinkan fungi beradaptasi dengan suhu tubuh inang sehingga meningkatkan virulensinya (Nemecek *et al*., 2007). Fungi patogen juga memiliki metabolisme heterotrofik yang bergantung pada bahan organik dari inang untuk bertahan hidup (McGinnis & Tyring, 1996). Kemampuan untuk menghasilkan enzim ekstraseluler seperti protease dan lipase membantu fungi dalam menembus jaringan inang (Kwon-Chung & Bennett, 1992). Selain itu, beberapa fungi memiliki kapsul atau lapisan pelindung yang membantu menghindari sistem imun inang (McGinnis & Tyring, 1996).

Infeksi fungi dapat bersifat superfisial, kutan, subkutan, hingga sistemik tergantung pada lokasi infeksi (McGinnis & Tyring, 1996). Fungi oportunistik seperti Candida dan *Aspergillus* sp. umumnya menyerang individu dengan sistem imun yang lemah (Ryan *et al*.,

2022). Sebaliknya, fungi patogen primer dapat menginfeksi individu sehat tanpa kondisi predisposisi tertentu (Jawetz, Melnick, & Adelberg, 2019). Penularan fungi dapat terjadi melalui inhalasi spora, kontak langsung, atau melalui luka pada kulit (McGinnis & Tyring, 1996). Faktor lingkungan seperti kelembapan dan suhu berperan besar dalam pertumbuhan dan penyebaran fungi (Nemecek *et al*., 2007). Selain itu, perubahan iklim global juga berkontribusi terhadap peningkatan kasus infeksi fungi di berbagai wilayah (Garcia-Solache & Casadevall, 2010).

10.5.2 Struktur dan Morfologi Fungi

Struktur dasar fungi terdiri dari elemen mikroskopis yang berperan penting dalam pertumbuhan dan kelangsungan hidupnya, yaitu hifa (Alexopoulos *et al*., 1996). Hifa merupakan filamen panjang berbentuk tabung yang menjadi unit struktural utama pada sebagian besar fungi multiseluler (Deacon, 2006). Dinding sel hifa tersusun atas kitin yang memberikan kekuatan dan perlindungan terhadap tekanan lingkungan (Carlile *et al*., 2001). Hifa dapat berseptat atau tidak bersekat tergantung pada kelompok fungi (Webster & Weber, 2007). Hifa septat memiliki sekat yang membagi sel-sel, sementara hifa aseptat tidak memiliki pembatas internal (Moore *et al*., 2011). Struktur ini memungkinkan distribusi nutrisi yang efisien di sepanjang tubuh fungi (Deacon, 2006). Hifa tumbuh melalui ujungnya yang aktif membelah, proses ini disebut pertumbuhan apikal (Carlile *et al*., 2001). Pertumbuhan ini memungkinkan fungi untuk menjelajah substrat dan memperoleh nutrisi secara optimal (Webster & Weber, 2007). Selain itu, hifa juga dapat berdiferensiasi menjadi struktur khusus seperti haustorium untuk menyerap nutrisi dari inang

(Alexopoulos *et al*., 1996). Kemampuan adaptasi hifa ini menjadi salah satu faktor utama keberhasilan fungi sebagai organisme heterotrof (Moore *et al*., 2011).

Kumpulan hifa yang saling berjalin membentuk struktur yang disebut miselium (Deacon, 2006). Miselium merupakan massa jaringan yang menjadi tubuh vegetatif utama fungi (Webster & Weber, 2007). Struktur miselium memungkinkan fungi untuk memperluas area penyerapan nutrisi secara signifikan (Carlile *et al*., 2001). Miselium dapat tumbuh di berbagai substrat seperti tanah, jaringan organisme, maupun bahan organik mati (Moore *et al*., 2011). Pertumbuhan miselium dipengaruhi oleh faktor lingkungan seperti suhu, pH, dan ketersediaan nutrisi (Deacon, 2006). Miselium juga berperan dalam reproduksi dengan membentuk struktur khusus penghasil spora (Alexopoulos *et al*., 1996). Pada beberapa fungi, miselium dapat membentuk jaringan padat yang disebut sklerotium untuk bertahan dalam kondisi ekstrem (Webster & Weber, 2007). Selain itu, miselium memiliki kemampuan komunikasi internal melalui aliran sitoplasma, hal ini memungkinkan distribusi nutrisi dan sinyal kimia secara efisien (Moore *et al*., 2011). Oleh karena itu, miselium menjadi komponen penting dalam pertumbuhan dan kelangsungan hidup fungi (Carlile *et al*., 2001).

Spora merupakan struktur reproduktif utama pada fungi yang berperan dalam penyebaran, nutrisi, dan kelangsungan spesies (Alexopoulos *et al*., 1996). Spora dapat dihasilkan secara aseksual maupun seksual tergantung jenis fungi (Webster & Weber, 2007). Spora aseksual seperti konidia terbentuk melalui mitosis dan memiliki fungsi utama dalam penyebaran cepat (Deacon, 2006). Sebaliknya, spora seksual seperti askospora dan basidiospora terbentuk melalui proses meiosis (Carlile

et al., 2001). Spora memiliki dinding yang tebal sehingga mampu bertahan dalam kondisi lingkungan yang ekstrem (Moore *et al*., 2011). Spora dapat tersebar melalui udara, air, maupun perantara organisme lain (Webster & Weber, 2007).

Hifa, miselium, dan spora saling berkaitan dalam membentuk sistem morfologi fungi yang kompleks (Deacon, 2006). Hifa sebagai unit dasar akan berkembang membentuk miselium sebagai struktur utama (Alexopoulos *et al*., 1996). Miselium kemudian menghasilkan spora sebagai bagian dari siklus reproduksi (Carlile *et al*., 2001). Interaksi ketiga struktur ini memungkinkan fungi untuk tumbuh, berkembang, dan menyebar secara efektif (Moore *et al*., 2011).

10.5.3 Cara Reproduksi Fungi

Fungi merupakan organisme eukariotik yang memiliki cara reproduksi yang beragam dan unik dibandingkan makhluk hidup lainnya (Alexopoulos *et al*., 1996). Reproduksi pada fungi dapat berlangsung secara seksual maupun aseksual tergantung pada kondisi lingkungan dan jenis spesiesnya (Deacon, 2006). Secara umum, reproduksi aseksual pada fungi lebih sering terjadi karena lebih cepat dan efisien (Carlile, Watkinson, & Gooday, 2001). Reproduksi aseksual pada fungi dapat terjadi melalui beberapa mekanisme seperti pembelahan, tunas, dan pembentukan spora (Webster & Weber, 2007). Pada ragi, reproduksi aseksual sering terjadi melalui proses tunas atau budding (Moore *et al*., 2011). Dalam proses ini, sel induk membentuk tonjolan kecil yang kemudian berkembang menjadi individu baru (Carlile *et al*., 2001). Selain itu, beberapa fungi melakukan fragmentasi, yaitu pemutusan bagian hifa yang kemudian tumbuh menjadi organisme baru (Deacon, 2006). Pembentukan spora aseksual

merupakan metode yang paling umum ditemukan (Alexopoulos *et al*., 1996). Spora ini biasanya dihasilkan dalam jumlah besar untuk meningkatkan peluang penyebaran (Webster & Weber, 2007). Keunggulan reproduksi aseksual adalah kecepatannya dalam menghasilkan keturunan (Moore *et al*., 2011). Namun, kelemahannya adalah kurangnya variasi genetik (Carlile *et al*., 2001). Hal ini membuat fungi lebih rentan terhadap perubahan lingkungan (Deacon, 2006). Meskipun demikian, strategi ini tetap efektif dalam kondisi stabil (Alexopoulos *et al*., 1996). Reproduksi aseksual memungkinkan fungi berkembangbiak tanpa memerlukan pasangan (Webster & Weber, 2007). Reproduksi aseksual juga memiliki variasi bentuk spora seperti konidia dan sporangiospora (Carlile *et al*., 2001). Perbedaan ini menunjukkan keragaman strategi reproduksi pada fungi (Moore *et al*., 2011). Selain itu, faktor lingkungan seperti suhu, kelembapan, dan nutrisi sangat memengaruhi jenis reproduksi yang terjadi (Deacon, 2006). Fungi dapat beralih antara reproduksi seksual dan aseksual sesuai kondisi lingkungan (Alexopoulos *et al*., 1996).

Reproduksi seksual terjadi ketika dua hifa dari individu berbeda bergabung (Webster & Weber, 2007). Proses ini menghasilkan variasi genetik yang lebih tinggi (Moore *et al*., 2011). Variasi ini penting untuk meningkatkan kemampuan adaptasi fungi terhadap lingkungan (Carlile *et al*., 2001). Reproduksi seksual pada fungi melibatkan beberapa tahap kompleks yang berbeda dari organisme lain (Deacon, 2006). Tahap pertama adalah plasmogami, yaitu peleburan sitoplasma dari dua sel hifa yang berbeda (Alexopoulos *et al*., 1996). Setelah itu, terjadi tahap dikariotik dimana dua inti sel hidup berdampingan tanpa langsung menyatu (Webster & Weber, 2007). Tahap berikutnya adalah kariogami,

yaitu peleburan inti sel menjadi satu (Carlile *et al*., 2001). Proses ini menghasilkan inti diploid yang kemudian mengalami meiosis (Moore *et al*., 2011). Meiosis menghasilkan spora seksual yang memiliki variasi genetik (Deacon, 2006). Spora seksual ini dapat berkembang menjadi individu baru ketika kondisi lingkungan sesuai (Alexopoulos *et al*., 1996). Reproduksi seksual biasanya terjadi saat kondisi lingkungan tidak menguntungkan (Webster & Weber, 2007). Hal ini karena variasi genetik dapat meningkatkan peluang bertahan hidup (Carlile *et al*., 2001). Jenis spora seksual pada fungi berbeda-beda tergantung pada kelompoknya (Moore *et al*., 2011). Pada Ascomycota, spora seksual disebut askospora yang terbentuk dalam askus (Alexopoulos *et al*., 1996). Pada Basidiomycota, spora seksual disebut basidiospora yang terbentuk pada basidium (Webster & Weber, 2007). Sementara itu, Zygomycota menghasilkan zigospora sebagai hasil reproduksi seksual (Deacon, 2006).

10.5.4 Habitat dan Penyebaran Fungi

Fungi merupakan organisme yang memiliki kemampuan hidup di berbagai jenis habitat di seluruh dunia (Alexopoulos *et al*., 1996). Fungi dapat ditemukan di lingkungan darat maupun perairan, mulai dari hutan tropis hingga daerah kutub (Deacon, 2006). Sebagian besar fungi hidup di tanah yang kaya bahan organik (Carlile *et al*., 2001). Tanah menyediakan nutrisi yang dibutuhkan fungi untuk tumbuh dan berkembang (Webster & Weber, 2007). Selain itu, fungi juga sering ditemukan pada sisa-sisa bahan organisme mati seperti daun dan kayu (Moore *et al*., 2011). Peran fungi sebagai dekomposer sangat penting dalam ekosistem (Deacon, 2006). Mereka membantu menguraikan bahan organik menjadi zat sederhana yang dapat digunakan kembali

oleh organisme lain (Carlile *et al*., 2001). Fungi juga dapat hidup sebagai parasit pada organisme lain (Alexopoulos *et al*., 1996). Dalam kondisi tertentu, fungi bahkan dapat hidup dalam hubungan simbiosis (Webster & Weber, 2007).

Fungi memiliki kemampuan beradaptasi dengan berbagai kondisi lingkungan (Moore *et al*., 2011). Mereka dapat hidup pada suhu yang sangat rendah maupun tinggi (Deacon, 2006). Beberapa fungi bahkan mampu bertahan di lingkungan ekstrem seperti gurun dan daerah bersalju (Carlile *et al*., 2001). Kelembapan merupakan faktor penting yang memengaruhi pertumbuhan fungi (Webster & Weber, 2007). Lingkungan yang lembap sangat mendukung perkembangan spora fungi (Alexopoulos *et al*., 1996). Selain itu, ketersediaan nutrisi juga menentukan keberhasilan kolonisasi fungi (Moore *et al*., 2011). Fungi dapat memanfaatkan berbagai sumber nutrisi, termasuk bahan organik kompleks (Deacon, 2006). Kemampuan ini membuat fungi dapat bertahan di berbagai habitat (Carlile *et al*., 2001). Fungi juga dapat hidup di dalam tubuh organisme lain sebagai endofit (Webster & Weber, 2007). Penyebaran fungi sangat dipengaruhi oleh mekanisme reproduksi dan produksi spora (Alexopoulos *et al*., 1996). Spora fungi dapat tersebar melalui udara dengan bantuan angin, air, hewan, dan manusia (Moore *et al*., 2011).

10.5.5 Mekanisme Infeksi Fungi

Mekanisme infeksi fungi pada tumbuhan merupakan proses kompleks yang melibatkan interaksi antara patogen dan inang pada tingkat seluler maupun molekuler (Agrios, 2005). Fungi patogen memiliki kemampuan untuk menginvasi jaringan tanaman melalui beberapa jalur utama, yaitu penetrasi langsung

dan penetrasi melalui bukaan alami atau luka (Deacon, 2006). Penetrasi langsung terjadi ketika hifa fungi mampu menembus permukaan kutikula dan dinding sel tanaman tanpa memanfaatkan celah yang sudah ada (Mendgen & Hahn, 2002). Proses ini biasanya melibatkan pembentukan struktur khusus seperti appressorium yang menghasilkan tekanan mekanik tinggi (Howard & Valent, 1996). Sebaliknya, infeksi melalui stomata atau luka memanfaatkan celah alami yang lebih lemah dalam pertahanan tanaman (Agrios, 2005). Stomata merupakan pintu masuk alami yang sering digunakan oleh patogen karena tidak memerlukan tekanan penetrasi yang besar (Marschner, 2012). Luka pada jaringan tanaman juga menjadi titik masuk yang rentan akibat kerusakan mekanik atau serangan organisme lain (Deacon, 2006).

Penetrasi langsung oleh fungi dimulai dengan adhesi spora pada permukaan tanaman yang dipengaruhi oleh kondisi lingkungan seperti kelembapan dan suhu (Agrios, 2005). Setelah melekat, spora akan berkecambah dan membentuk hifa yang berkembang menjadi appressorium (Mendgen & Hahn, 2002). Appressorium berfungsi sebagai struktur infeksi yang mampu menghasilkan tekanan turgor tinggi untuk menembus kutikula tanaman (Howard & Valent, 1996). Selain tekanan mekanik, fungi juga menghasilkan enzim seperti kutinase dan selulase untuk melunakkan dinding sel tanaman (Deising *et al*., 2000). Kombinasi antara tekanan fisik dan aktivitas enzimatik memungkinkan penetrasi yang efektif (Agrios, 2005). Setelah berhasil menembus, hifa akan berkembang di dalam jaringan inang dan mulai mengambil nutrisi (Deacon, 2006). Proses ini sering disertai dengan pembentukan haustorium pada beberapa jenis fungi biotrof (Mendgen & Hahn, 2002). Haustorium memungkinkan transfer

nutrisi tanpa langsung membunuh sel inang (Howard & Valent, 1996). Penetrasi langsung biasanya ditemukan pada patogen obligat seperti karat dan embun tepung (Agrios, 2005).

Infeksi melalui stomata merupakan strategi yang umum digunakan oleh fungi yang tidak memiliki kemampuan penetrasi mekanik yang kuat (Marschner, 2012). Stomata menyediakan akses langsung ke jaringan internal tanaman tanpa harus merusak kutikula (Deacon, 2006). Spora fungi yang jatuh di permukaan daun dapat berkecambah dan mengarahkan pertumbuhan hifa menuju stomata melalui respons terhadap sinyal kimia atau topografi (Mendgen & Hahn, 2002). Setelah mencapai stomata, hifa akan masuk ke ruang substomatal dan berkembang di jaringan mesofil (Agrios, 2005). Proses ini sering terjadi pada kondisi lingkungan yang mendukung pembukaan stomata seperti kelembapan tinggi (Marschner, 2012). Beberapa tanaman memiliki mekanisme pertahanan dengan menutup stomata saat mendeteksi patogen (Melotto *et al*., 2008). Namun, beberapa fungi mampu mengatasi pertahanan ini dengan memproduksi molekul efektor (Deising *et al*., 2000). Infeksi melalui stomata umumnya lebih cepat dibandingkan penetrasi langsung karena tidak memerlukan pembentukan tekanan tinggi (Howard & Valent, 1996). Contoh patogen yang menggunakan jalur ini termasuk beberapa spesies karat dan bercak daun (Agrios, 2005).

Infeksi melalui luka terjadi ketika jaringan tanaman mengalami kerusakan akibat faktor mekanik, serangga, atau kondisi lingkungan (Agrios, 2005). Luka ini menghilangkan lapisan pelindung seperti kutikula sehingga memudahkan patogen masuk (Deacon, 2006). Fungi oportunistik sering memanfaatkan luka sebagai jalur utama infeksi (Mendgen & Hahn, 2002). Spora fungi

yang berada di lingkungan dapat dengan mudah masuk dan berkecambah pada area yang terluka (Agrios, 2005). Keberhasilan infeksi tetap bergantung pada kemampuan patogen dalam mengatasi respons imun tanaman (Melotto *et al*., 2008). Luka juga dapat menyebabkan pelepasan senyawa nutrisi yang menarik patogen (Marschner, 2012). Selain itu, jaringan yang rusak biasanya memiliki pertahanan yang lebih lemah (Deacon, 2006).

Fungi patogen tanaman memiliki kemampuan untuk menghasilkan berbagai enzim dan toksin yang berperan penting dalam proses infeksi dan kolonisasi jaringan inang (Deising *et al*., 2000). Produksi enzim ekstraseluler memungkinkan patogen untuk mendegradasi komponen struktural dinding sel tanaman seperti selulosa, hemiselulosa, dan pektin (Agrios, 2005). Enzim-enzim ini, termasuk selulase, pektinase, dan ligninase, bekerja secara sinergis untuk melemahkan pertahanan fisik tanaman (Kubicek *et al*., 2014). Selain enzim, fungi juga menghasilkan toksin yang dapat merusak sel tanaman dan mengganggu fungsi fisiologisnya (Bennett & Klich, 2003). Toksin ini dapat bersifat spesifik terhadap inang atau non-spesifik tergantung pada jenis patogen (Walton, 1996).

Salah satu kelompok enzim penting adalah enzim pektinolitik yang berperan dalam degradasi pektin pada lamela tengah dinding sel tanaman (Prade *et al*., 1999). Degradasi ini menyebabkan sel-sel tanaman terpisah dan memudahkan penyebaran patogen (Agrios, 2005). Selain itu, enzim selulase membantu menghancurkan kerangka utama dinding sel yang tersusun dari selulosa (Kubicek *et al*., 2014). Ligninase juga berperan dalam menguraikan lignin yang merupakan komponen penting dalam jaringan kayu (Deacon, 2006). Beberapa fungi juga menghasilkan kutinase untuk menembus lapisan

kutikula tanaman (Deising *et al*., 2000). Produksi enzim ini biasanya diinduksi oleh keberadaan substrat tertentu pada jaringan inang (Prade *et al*., 1999). Aktivitas enzimatik ini tidak hanya memfasilitasi penetrasi tetapi juga menyediakan sumber nutrisi bagi fungi (Agrios, 2005).

Selain enzim, toksin yang dihasilkan oleh fungi patogen juga memiliki peran penting dalam patogenesis (Bennett & Klich, 2003). Toksin dapat menyebabkan nekrosis jaringan tanaman dan memfasilitasi penyebaran patogen (Walton, 1996). Toksin spesifik inang hanya mempengaruhi tanaman tertentu yang memiliki kerentanan genetik (Agrios, 2005). Sebaliknya, toksin non-spesifik dapat menyerang berbagai jenis tanaman (Deacon, 2006). Contoh toksin penting termasuk aflatoksin, fumonisin, dan trichothecene yang dihasilkan oleh berbagai spesies fungi (Bennett & Klich, 2003). Toksin ini dapat mengganggu metabolisme sel tanaman dengan menghambat sintesis protein atau merusak membran sel (Walton, 1996). Selain berdampak pada tanaman, beberapa toksin juga berbahaya bagi manusia dan hewan (Bennett & Klich, 2003).

10.5.6 Gejala Umum Infeksi Fungi

Infeksi fungi pada tanaman umumnya menimbulkan berbagai gejala visual yang dapat diamati pada organ tanaman (Agrios, 2005). Gejala ini merupakan hasil interaksi antara aktivitas patogen dan respons fisiologis tanaman (Strange, 2003). Gejala umum yang sering dijumpai adalah nekrosis, klorosis, bercak daun, pembusukan jaringan, dan pertumbuhan abnormal (Lucas, 1998). Gejala-gejala ini dapat muncul secara bersamaan atau terpisah tergantung pada jenis patogen (Agrios, 2005).

Nekrosis merupakan salah satu gejala utama infeksi fungi yang menunjukkan kematian sel atau jaringan tanaman (Strange, 2003). Gejala ini biasanya disebabkan oleh produksi enzim dan toksin oleh patogen yang merusak sel tanaman (Bennett & Klich, 2003). Nekrosis dapat terjadi secara lokal maupun menyebar tergantung pada tingkat infeksi (Agrios, 2005). Pada tahap awal, jaringan yang terinfeksi mungkin tampak layu sebelum akhirnya mengering dan mati (Lucas, 1998). Warna jaringan yang mengalami nekrosis sering berubah menjadi cokelat gelap atau hitam (Strange, 2003). Patogen nekrotrof biasanya memicu nekrosis untuk memperoleh nutrisi dari jaringan yang mati (Mendgen & Hahn, 2002). Selain itu, nekrosis juga dapat terjadi sebagai respons hipersensitif tanaman terhadap patogen (Heath, 2000). Respons ini bertujuan untuk membatasi penyebaran patogen ke jaringan lain (Agrios, 2005). Namun, dalam beberapa kasus, nekrosis justru mempercepat perkembangan penyakit (Strange, 2003).

Klorosis merupakan gejala yang ditandai dengan perubahan warna daun menjadi kuning akibat berkurangnya klorofil (Lucas, 1998). Infeksi fungi dapat mengganggu proses fotosintesis sehingga menyebabkan klorosis (Agrios, 2005). Gangguan ini sering disebabkan oleh kerusakan kloroplas atau hambatan dalam sintesis klorofil (Strange, 2003). Klorosis dapat muncul di sekitar area infeksi atau menyebar ke seluruh daun (Lucas, 1998). Beberapa patogen menghasilkan toksin yang secara langsung merusak jaringan fotosintetik (Bennett & Klich, 2003). Selain itu, infeksi juga dapat mengganggu transportasi nutrisi dalam tanaman (Agrios, 2005). Kekurangan unsur hara akibat infeksi dapat memperparah gejala klorosis (Marschner, 2012). Pada tahap lanjut, klorosis sering diikuti oleh nekrosis (Strange, 2003). Gejala ini dapat mengurangi

kemampuan tanaman dalam menghasilkan energi (Lucas, 1998).

Bercak daun merupakan gejala khas infeksi fungi yang ditandai dengan munculnya lesi pada permukaan daun (Agrios, 2005). Lesi ini dapat berbentuk bulat, oval, atau tidak beraturan tergantung pada jenis patogen (Strange, 2003). Warna bercak biasanya bervariasi dari cokelat, hitam, hingga kekuningan (Lucas, 1998). Bercak daun sering kali memiliki tepi yang jelas dan pusat yang berbeda warna (Agrios, 2005). Gejala ini disebabkan oleh kematian jaringan lokal akibat aktivitas patogen (Mendgen & Hahn, 2002). Pada beberapa kasus, bercak daun dapat menyatu dan menyebabkan kerusakan luas pada daun (Strange, 2003).

Pembusukan jaringan tanaman merupakan salah satu gejala umum infeksi fungi yang sering ditemukan pada berbagai jenis tanaman budidaya (Agrios, 2005). Gejala ini ditandai dengan pelunakan jaringan yang diikuti oleh perubahan warna dan bau tidak sedap (Strange, 2003). Pembusukan biasanya terjadi akibat aktivitas enzimatik dan toksin yang merusak struktur dinding sel tanaman (Bennett & Klich, 2003). Fungi patogen menghasilkan enzim seperti pektinase dan selulase yang menyebabkan degradasi jaringan (Kubicek, Starr, & Glass, 2014). Proses ini mengakibatkan jaringan tanaman kehilangan kekuatan strukturalnya (Prade *et al*., 1999). Pembusukan dapat terjadi pada berbagai bagian tanaman seperti akar, batang, buah, dan daun (Agrios, 2005).

Pertumbuhan abnormal merupakan gangguan pada proses fisiologis dan morfologis tanaman seperti pembesaran jaringan, pembentukan gall, pemanjangan organ, atau deformasi struktur tanaman (Lucas, 1998). Perubahan ini sering disebabkan oleh interaksi

kompleks antara patogen dan sistem regulasi hormon tanaman (Strange, 2003). Fungi patogen mampu memodifikasi keseimbangan hormon seperti auksin dan sitokinin (Agrios, 2005). Ketidakseimbangan hormon ini mengakibatkan pertumbuhan yang tidak terkendali (Taiz & Zeiger, 2010). Selain itu, infeksi juga dapat mengganggu pembelahan dan diferensiasi sel (Lucas, 1998). Gejala pertumbuhan abnormal sering kali spesifik terhadap jenis patogen tertentu (Strange, 2003).

Salah satu bentuk pertumbuhan abnormal adalah pembentukan gall (tumor) pada jaringan tanaman (Agrios, 2005). Gall terbentuk akibat proliferasi sel yang tidak terkendali di lokasi infeksi (Lucas, 1998). Fungi patogen dapat merangsang pembentukan gall melalui produksi zat pengatur tumbuh (Taiz & Zeiger, 2010). Senyawa seperti auksin dan sitokinin berperan dalam merangsang pembelahan sel (Davies, 2010). Pembentukan gall sering menyebabkan perubahan bentuk organ tanaman dan mengganggu aliran nutrisi dalam jaringan tanaman sehingga dapat menyebabkan penurunan pertumbuhan secara keseluruhan (Strange, 2003).

Pertumbuhan abnormal juga dapat berupa pemanjangan atau pemendekan organ tanaman (Agrios, 2005). Gejala ini sering terjadi akibat gangguan keseimbangan hormon pertumbuhan (Taiz & Zeiger, 2010). Fungi patogen dapat menghasilkan senyawa yang dapat meniru atau menghambat hormon tanaman (Davies, 2010). Akibatnya, pertumbuhan batang atau akar menjadi tidak normal (Lucas, 1998). Pemanjangan berlebihan dapat menyebabkan tanaman menjadi lemah dan mudah rebah (Strange, 2003). Sebaliknya, pertumbuhan terhambat dapat mengurangi ukuran tanaman (Agrios, 2005). Selain itu, deformasi daun juga merupakan bentuk pertumbuhan abnormal (Lucas,

1998). Daun dapat menjadi keriting, menggulung, atau berubah bentuk (Strange, 2003).

10.5.7 Penyakit yang Disebabkan oleh Fungi

a. Penyakit Layu Fusarium yang Disebabkan oleh *Fusarium* spp.

Penyakit layu Fusarium merupakan salah satu penyakit penting pada tanaman yang disebabkan oleh fungi patogen dari genus Fusarium (Agrios, 2005; Michielse & Rep, 2009). Patogen ini termasuk kelompok fungi tanah yang mampu bertahan lama di dalam tanah dalam bentuk klamidospora (Leslie & Summerell, 2006). Infeksi biasanya dimulai dari akar tanaman yang luka atau akar yang aktif tumbuh, kemudian patogen masuk ke jaringan pembuluh xilem (Agrios, 2005). Setelah masuk, fungi berkembang dan menghambat aliran air serta nutrisi sehingga tanaman mulai menunjukkan gejala layu (Michielse & Rep, 2009).

Gejala awal penyakit ini ditandai dengan menguningnya daun bagian bawah yang kemudian diikuti oleh layunya seluruh tanaman meskipun tanah masih cukup air (Agrios, 2005). Gejala khas lainnya adalah perubahan warna pembuluh batang menjadi cokelat akibat kolonisasi fungi di jaringan xilem (Michielse & Rep, 2009). Pada kondisi parah, tanaman akan mati secara perlahan karena sistem transportasi air terganggu (Agrios, 2005). Hal ini membuat penyakit layu Fusarium sangat merugikan pada tanaman hortikultura dan perkebunan (Ploetz, 2006).

Salah satu spesies yang paling terkenal adalah *Fusarium oxysporum* yang menyerang berbagai tanaman seperti tomat, cabai, pisang, dan semangka

dengan gejala utama berupa layu pembuluh (Michielse & Rep, 2009). Spesies ini sangat luas distribusinya karena mampu bertahan lama di dalam tanah dalam bentuk klamidospora (Leslie & Summerell, 2006). *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense* secara spesifik menyerang tanaman pisang dan menyebabkan penyakit Layu Panama yang sangat merusak perkebunan pisang di seluruh dunia (Ploetz, 2006). Patogen ini menginfeksi sistem pembuluh xilem sehingga menghambat aliran air dan nutrisi ke seluruh bagian tanaman, akibatnya tanaman pisang mengalami layu permanen dan akhirnya mati (Agrios, 2005).

Spesies lain seperti *Fusarium oxysporum* f. sp. *lycopersici* menyerang tanaman tomat dan menyebabkan penyakit layu Fusarium yang ditandai dengan menguningnya daun dan layu bertahap (Michielse & Rep, 2009). *Fusarium solani* lebih banyak menyerang tanaman kacang-kacangan, kentang, dan mentimun dengan gejala busuk akar dan busuk pangkal batang (Summerell *et al*., 2010). *Fusarium graminearum* menyerang tanaman serealia seperti gandum dan jagung, menyebabkan penyakit hawar bunga dan busuk tongkol yang menurunkan kualitas hasil panen (Goswami & Kistler, 2004). *Fusarium verticillioides* juga umum ditemukan pada jagung dan menyebabkan busuk batang serta akumulasi mikotoksin yang berbahaya (Bennett & Klich, 2003).

b. Penyakit Karat Daun yang Disebabkan oleh *Puccinia* spp.

Penyakit karat daun merupakan salah satu penyakit penting pada tanaman yang disebabkan oleh fungi patogen dari genus *Puccinia* spp. yang

termasuk kelompok fungi obligat parasit (Agrios, 2005; Kolmer, 2005). Patogen ini hanya dapat hidup dan berkembang biak pada jaringan tanaman hidup, sehingga sangat bergantung pada keberadaan inang untuk menyelesaikan siklus hidupnya (Hansen, 2008). Infeksi biasanya terjadi melalui spora yang terbawa angin kemudian menempel pada permukaan daun tanaman dan berkecambah, selanjutnya masuk ke jaringan tanaman melalui stomata (Agrios, 2005).

Gejala awal penyakit karat daun ditandai dengan munculnya bercak kecil berwarna kuning hingga oranye pada permukaan daun (Hansen, 2008). Seiring perkembangan infeksi, bercak tersebut berubah menjadi pustula yang mengandung serbuk spora berwarna karat yang mudah menyebar (Kolmer, 2005). Pustula ini dapat muncul di bagian bawah atau atas daun tergantung spesies Puccinia yang menyerang (Agrios, 2005). Akibat serangan ini, daun menjadi kering, menguning, dan akhirnya gugur sebelum waktunya (Hansen, 2008).

Patogen *Puccinia* spp. memiliki siklus hidup yang kompleks dengan beberapa tahap perkembangan spora seperti urediniospora, teliospora, basidiospora, dan aeciospora (Kolmer, 2005). Siklus hidup yang kompleks ini memungkinkan patogen bertahan dalam berbagai kondisi lingkungan dan menyebar dengan cepat (Hansen, 2008). Penyebaran spora terutama dibantu oleh angin sehingga penyakit ini dapat menyebar dalam jarak yang jauh (Agrios, 2005).

Puccinia graminis menyerang tanaman gandum dan menyebabkan penyakit karat batang yang dapat

menurunkan hasil panen secara signifikan (Leonard & Szabo, 2005). Infeksi patogen ini terjadi melalui spora yang terbawa angin dan menginfeksi jaringan daun serta batang tanaman inang (Agrios, 2005). *Puccinia striiformis* merupakan spesies yang menyerang gandum dan barley dengan gejala khas berupa garis-garis kuning pada daun yang disebut karat garis (stripe rust) (Chen, 2005). Penyakit ini berkembang cepat pada kondisi lingkungan yang lembap dan bersuhu sedang sehingga sering menjadi masalah serius di daerah pertanian gandum (Chen, 2005). Infeksi yang berat dapat menyebabkan daun mengering sebelum waktunya dan menurunkan produktivitas tanaman (Leonard & Szabo, 2005).

Spesies lain yaitu *Puccinia triticina* menyerang tanaman gandum dan menyebabkan penyakit karat daun yang ditandai dengan munculnya pustula berwarna cokelat kemerahan pada permukaan daun (Huerta-Espino *et al*., 2011). Pustula ini berisi spora yang mudah tersebar oleh angin sehingga mempercepat penyebaran penyakit di lapangan (Agrios, 2005). Infeksi yang terus berlangsung akan mengurangi kemampuan fotosintesis tanaman secara drastis (Hansen, 2008). Selain pada serealia, beberapa spesies Puccinia juga dapat menyerang tanaman lain seperti jagung dan rumput-rumputan tertentu, meskipun inang utamanya tetap tanaman keluarga Poaceae (Kolmer, 2005).

c. Penyakit Antraknosa yang Disebabkan oleh *Colletotrichum* spp.

Genus Colletotrichum merupakan kelompok fungi patogen penting yang menyebabkan penyakit antraknosa pada berbagai tanaman budidaya di

seluruh dunia (Dean *et al*., 2012). Patogen ini umumnya menyerang jaringan tanaman yang masih hidup maupun yang sudah mulai menua dengan cara menginfeksi permukaan buah, daun, dan batang (Prusky *et al*., 2000). Infeksi biasanya dimulai dari spora yang menempel pada permukaan tanaman dan kemudian berkecambah pada kondisi lembap (Bailey *et al*., 1992).

Salah satu spesies yang paling sering dilaporkan adalah *Colletotrichum gloeosporioides* yang menyerang tanaman mangga, pepaya, alpukat, dan cabai dengan gejala khas berupa bercak hitam cekung pada buah (Perfect *et al*., 1999). Selain itu, spesies ini juga dapat menyerang daun dan bunga sehingga menyebabkan gugurnya organ generatif dan penurunan hasil panen (Cannon *et al*., 2012). Penyebaran patogen ini sangat cepat karena spora dapat terbawa oleh air hujan, angin, dan aktivitas manusia di lahan pertanian (Bailey *et al*., 1992). Kondisi ini membuat penyakit antraknosa menjadi salah satu ancaman serius bagi produksi tanaman hortikultura dan buah-buahan tropis (Prusky *et al*., 2000).

Colletotrichum acutatum merupakan patogen lain yang juga menyebabkan penyakit antraknosa pada tanaman stroberi, jeruk, cabai, dan berbagai tanaman hortikultura lainnya (Freeman *et al*., 2001). Gejala yang ditimbulkan berupa bercak nekrotik berwarna cokelat hingga hitam yang dapat meluas pada buah dan daun (Peres *et al*., 2005). Tanaman stroberi yang terinfeksi sering mengalami pembusukan sebelum panen sehingga menyebabkan kerugian ekonomi yang signifikan (Freeman *et al*., 2001). Pada tanaman jeruk dan cabai, infeksi ini juga menurunkan kualitas hasil

panen karena munculnya bercak hitam yang tidak dapat diperbaiki (Peres *et al*., 2005).

Colletotrichum capsici menyerang tanaman cabai dan menyebabkan penyakit antraknosa pada buah yang ditandai dengan bercak cekung berwarna gelap (Than *et al*., 2008). Gejala ini sering muncul pada buah yang masih muda maupun yang sudah matang sehingga menurunkan kualitas dan daya jual cabai di pasar (Than *et al*., 2008). Infeksi dimulai dari spora yang tersebar melalui percikan air hujan atau kontak langsung antar buah di lapangan (Bailey *et al*., 1992). Setelah masuk ke jaringan, fungi berkembang dan menyebabkan pembusukan yang meluas pada permukaan buah cabai (Than *et al*., 2008). Pada kondisi serangan berat, buah cabai dapat mengalami kerusakan total sebelum dipanen sehingga menyebabkan kerugian besar bagi petani (Prusky *et al*., 2000). Sumber infeksi juga dapat bertahan pada sisa tanaman yang terserang patogen ini di lahan yang kemudian menjadi sumber inokulum pada musim tanam berikutnya (Bailey *et al*., 1992).

10.6 Bakteri sebagai Patogen Tanaman

Bakteri merupakan salah satu kelompok mikroorganisme yang berperan sebagai patogen penting pada tanaman (Mansfield *et al*., 2012). Bakteri memasuki tanaman melalui luka alami atau bukaan seperti stomata dan lentisel (Agrios, 2005). Setelah masuk, bakteri berkembangbiak di ruang antar sel dan jaringan vaskular (Ryan *et al*., 2011). Proses infeksi sering melibatkan produksi enzim dan senyawa virulensi (Buttner & Bonas, 2010). Bakteri patogen juga dapat mengganggu metabolisme tanaman (Jones & Dangl, 2006).

Bakteri patogen tanaman memiliki berbagai mekanisme untuk menginfeksi dan mengkolonisasi jaringan inang (Mansfield *et al*., 2012). Salah satu mekanisme utama adalah produksi enzim yang mampu merusak dinding sel tanaman (Agrios, 2005). Enzim seperti pektinase dan selulase berperan dalam melunakkan jaringan tanaman (Collmer & Keen, 1986). Selain itu, bakteri juga menghasilkan toksin yang dapat merusak sel tanaman (Buttner & Bonas, 2010). Toksin ini dapat mengganggu fungsi membran dan metabolisme sel (Ryan *et al*., 2011). Beberapa bakteri menggunakan sistem sekresi khusus untuk mengirimkan efektor ke dalam sel tanaman (Alfano & Collmer, 2004). Efektor ini berfungsi untuk menekan sistem pertahanan tanaman (Jones & Dangl, 2006). Keberhasilan infeksi sangat bergantung pada kemampuan bakteri dalam mengatasi respons imun tanaman (Mansfield *et al*., 2012).

Gejala penyakit yang disebabkan oleh bakteri pada tanaman sangat beragam (Agrios, 2005). Gejala umum meliputi bercak daun, layu, nekrosis, dan pembusukan jaringan (Jones & Dangl, 2006). Bercak daun biasanya muncul sebagai lesi kecil yang berkembang menjadi area nekrotik (Mansfield *et al*., 2012). Layu bakteri terjadi akibat gangguan sistem vaskular tanaman (Agrios, 2005). Bakteri yang menginfeksi xilem dapat menghambat aliran air dan nutrisi (Ryan *et al*., 2011). Pembusukan jaringan sering disebabkan oleh degradasi dinding sel oleh enzim bakteri (Collmer & Keen, 1986). Selain itu, beberapa bakteri menyebabkan pembentukan gall atau tumor (Buttner & Bonas, 2010). Gejala ini sering dikaitkan dengan produksi hormon oleh bakteri (Agrios, 2005).

10.6.1 Struktur Sel Bakteri

Bakteri patogen tanaman merupakan mikroorganisme prokariotik yang memiliki struktur sel sederhana namun sangat efisien dalam menjalankan

fungsi biologisnya (Madigan *et al*., 2018). Struktur sel bakteri tidak memiliki membran inti sejati sehingga materi genetiknya berada dalam nukleoid (Alberts *et al*., 2014). Dinding sel merupakan komponen utama yang memberikan bentuk dan perlindungan terhadap tekanan lingkungan (Silhavy *et al*., 2010). Pada bakteri patogen tanaman, dinding sel umumnya tersusun dari peptidoglikan yang memberikan kekuatan struktural dan memiliki peran penting dalam menentukan sifat patogenisitasnya (Vollmer *et al*., 2008). Berdasarkan struktur dinding sel, bakteri dapat dibedakan menjadi Gram Positif dan Gram Negatif (Madigan *et al*., 2018). Bakteri Gram Negatif memiliki lapisan membran luar tambahan yang mengandung lipopolisakarida (Raetz & Whitfield, 2002). Struktur ini berperan penting dalam interaksi dengan tanaman inang (Silhavy *et al*., 2010). Selain itu, membran plasma berfungsi sebagai pengatur transportasi zat masuk dan keluar sel (Alberts *et al*., 2014). Sitoplasma bakteri mengandung berbagai enzim dan ribosom untuk sintesis protein (Madigan *et al*., 2018).

Pada bakteri Gram Negatif, terdapat membran luar yang mengandung lipopolisakarida yang berfungsi sebagai faktor virulensi (Raetz & Whitfield, 2002). Lipopolisakarida dapat memicu respons imun pada tanaman (Jones & Dangl, 2006). Selain itu, dinding sel juga berfungsi sebagai tempat melekatnya struktur tambahan seperti flagela dan pili (Bono *et al*., 1991). Flagela berperan dalam pergerakan bakteri menuju sumber nutrisi (lokasi infeksi) (Madigan *et al*., 2018). Pili (fimbriae) berfungsi dalam adhesi pada permukaan tanaman (Bono *et al*., 1991). Struktur ini memungkinkan bakteri untuk menempel dengan kuat pada jaringan inang (Silhavy *et al*., 2010).

Membran plasma pada bakteri patogen tanaman memiliki fungsi penting dalam menjaga homeostasis sel (Alberts *et al*., 2014). Membran ini terdiri dari lapisan fosfolipid dan protein yang berperan dalam transportasi zat dan berbagai reaksi metabolik penting (Madigan *et al*., 2018). Pada bakteri patogen, membran plasma terlibat dalam sekresi enzim dan toksin (Green & Mecsas, 2016). Sistem sekresi ini memungkinkan bakteri mengirimkan molekul virulensi ke dalam sel tanaman (Alfano & Collmer, 2004). Membran plasma juga berperan dalam mendeteksi sinyal lingkungan yang memungkinkan bakteri beradaptasi dengan kondisi inang dan produksi energi melalui proses respirasi (Jones & Dangl, 2006; Madigan *et al*., 2018).

Sitoplasma bakteri patogen tanaman mengandung berbagai komponen penting untuk aktivitas seluler (Alberts *et al*., 2014). Ribosom dalam sitoplasma berfungsi dalam sintesis protein yang diperlukan untuk pertumbuhan dan virulensi (Madigan *et al*., 2018). Selain itu, nukleoid mengandung DNA yang mengatur aktivitas genetik bakteri (Alberts *et al*., 2014). DNA ini tidak terbungkus membran inti seperti pada sel eukariotik (Silhavy *et al*., 2010). Bakteri juga dapat memiliki plasmid yang membawa gen tambahan termasuk gen resistensi dan virulensi (Thomas & Nielsen, 2005). Plasmid ini dapat ditransfer antar bakteri melalui mekanisme tertentu (Madigan *et al*., 2018). Selain itu, sitoplasma mengandung enzim yang berperan dalam metabolisme (Alberts *et al*., 2014). Granula penyimpanan juga dapat ditemukan sebagai cadangan nutrisi yang memungkinkan bakteri bertahan dalam kondisi lingkungan yang tidak menguntungkan (Madigan *et al*., 2018).

Struktur tambahan pada bakteri patogen tanaman juga berperan penting dalam proses infeksi (Silhavy *et al*., 2010). Flagela memungkinkan bakteri bergerak menuju jaringan tanaman yang rentan (Madigan *et al*., 2018). Pili (fimbriae) membantu bakteri menempel pada permukaan tanaman (Bono *et al*., 1991). Selain itu, beberapa bakteri memiliki kapsul yang melindungi dari sistem pertahanan tanaman dan membantu dalam adhesi serta pembentukan biofilm (Ramey *et al*., 2004). Biofilm memungkinkan bakteri bertahan dalam lingkungan yang tidak menguntungkan (Flemming & Wingender, 2010). Struktur ini juga meningkatkan resistensi terhadap agen antimikroba (Hall-Stoodley *et al*., 2004).

10.6.2 Pergerakan (*Flagel*)

Pergerakan merupakan salah satu karakteristik penting bakteri patogen tanaman yang memungkinkan mereka mencapai lokasi infeksi pada inang (Josenhans & Suerbaum, 2002). Salah satu struktur utama yang berperan dalam pergerakan bakteri adalah flagel (Macnab, 2003). Flagel adalah struktur seperti benang yang memanjang dari permukaan sel bakteri yang tersusun dari protein flagelin yang membentuk filamen panjang (Berg, 2003). Pergerakan menggunakan flagel memungkinkan bakteri berenang dalam lapisan tipis air pada permukaan tanaman (Armitage, 1999). Hal ini sangat penting karena banyak bakteri patogen membutuhkan air untuk mobilitasnya (Suslow *et al*., 1982). Pergerakan ini juga memungkinkan bakteri mendekati stomata atau luka pada tanaman (Beattie, 2011). Selain itu, kemampuan bergerak meningkatkan peluang bakteri untuk bertahan hidup di lingkungan yang dinamis (Josenhans & Suerbaum, 2002). Tanpa

kemampuan bergerak, bakteri akan kesulitan menemukan sumber nutrisi (Macnab, 2003).

Struktur flagel bakteri terdiri dari tiga bagian utama yaitu filamen, hook, dan badan basal (Macnab, 2003). Filamen merupakan bagian luar yang berfungsi sebagai alat gerak utama (Prescott *et al*., 2002). Hook berfungsi sebagai penghubung antara filamen dan badan basal (Berg, 2003). Badan basal tertanam dalam membran sel dan berfungsi sebagai motor penggerak (Macnab, 2003). Energi untuk pergerakan flagel berasal dari gradien proton melintasi membran (Berg, 2003). Rotasi flagel menghasilkan gerakan yang memungkinkan bakteri bergerak maju atau berputar (Josenhans & Suerbaum, 2002). Kecepatan dan arah gerakan dapat diatur oleh sistem sensor internal (Armitage, 1999). Sistem ini memungkinkan bakteri merespons perubahan lingkungan (Macnab, 2003).

Pergerakan bakteri menggunakan flagel sering dikaitkan dengan fenomena kemotaksis yaitu kemampuan bakteri untuk bergerak menuju atau menjauhi rangsangan kimia tertentu (Adler, 1975). Bakteri patogen tanaman dapat bergerak menuju sumber nutrisi yang dilepaskan oleh jaringan inang, dan bakteri juga dapat menghindari senyawa toksik di lingkungan (Beattie, 2011). Kemotaksis memainkan peran penting dalam tahap awal infeksi (Josenhans & Suerbaum, 2002). Sistem kemotaksis melibatkan reseptor yang mendeteksi perubahan konsentrasi zat kimia (Armitage, 1999). Informasi ini kemudian diteruskan ke motor flagel untuk mengatur arah gerakan (Adler, 1975). Kemampuan ini meningkatkan efisiensi bakteri dalam menemukan lokasi infeksi (Beattie, 2011). Tanpa kemotaksis, pergerakan bakteri menjadi acak dan kurang efektif (Josenhans & Suerbaum, 2002).

Peran flagel dalam patogenesis tidak hanya terbatas pada pergerakan tetapi juga dalam interaksi dengan tanaman inang (Chaban *et al*., 2015). Protein flagel dapat dikenali oleh sistem imun tanaman sebagai molekul asing (Gómez *et al*., 2000). Pengenalan ini dapat memicu respons pertahanan tanaman (Boller & Felix, 2009). Namun, beberapa bakteri mampu memodifikasi flagel untuk menghindari deteksi oleh tanaman (Chaban *et al*., 2015). Selain itu, flagel juga berperan dalam adhesi awal pada permukaan tanaman (Beattie, 2011). Pergerakan yang aktif memungkinkan bakteri membentuk koloni pada lokasi yang sesuai (Josenhans & Suerbaum, 2002). Dalam beberapa kasus, flagel berkontribusi pada pembentukan biofilm (Belas, 2014).

10.6.3 Cara Hidup dan Penyebaran Bakteri Patogen Tanaman

Bakteri patogen tanaman memiliki cara hidup yang sangat adaptif untuk bertahan dan berkembang dalam berbagai kondisi lingkungan (Mansfield *et al*., 2012). Sebagian besar bakteri patogen bersifat heterotrof dan memperoleh nutrisi dari jaringan tanaman inang (Agrios, 2005). Bakteri ini dapat hidup sebagai parasit yang bergantung pada tanaman hidup atau sebagai saprofit pada jaringan mati (López *et al*., 2010). Dalam kondisi tertentu, bakteri dapat bertahan di tanah, air, atau sisa-sisa tanaman (Hirano & Upper, 2000). Kemampuan bertahan ini memungkinkan bakteri menjadi sumber inokulum untuk infeksi berikutnya (Mansfield *et al*., 2012). Bakteri juga dapat hidup secara epifit pada permukaan tanaman tanpa langsung menyebabkan penyakit (Lindow & Brandl, 2003). Pada fase ini, bakteri memanfaatkan nutrisi dari eksudat tanaman (Lindow & Brandl, 2003).

Bakteri patogen tanaman dapat berkembang biak dengan cepat melalui pembelahan biner (Madigan *et al*., 2018). Proses ini memungkinkan peningkatan populasi dalam waktu singkat (Alberts *et al*., 2014). Dalam jaringan tanaman, bakteri dapat menyebar melalui ruang antar sel atau sistem vaskular (Agrios, 2005). Penyebaran melalui xilem sering menyebabkan gejala layu pada tanaman (Ryan *et al*., 2011). Selain itu, bakteri dapat membentuk koloni pada permukaan tanaman sebelum masuk ke jaringan (Lindow & Brandl, 2003).

Penyebaran bakteri patogen tanaman dapat terjadi melalui berbagai media lingkungan (Mansfield *et al*., 2012). Air merupakan salah satu faktor utama dalam penyebaran bakteri (Hirano & Upper, 2000). Hujan dan percikan air dapat memindahkan bakteri dari satu tanaman ke tanaman lain (Beattie, 2011). Selain itu, angin juga dapat membawa partikel air yang mengandung bakteri (Hirano & Upper, 2000). Serangga berperan sebagai vektor yang dapat memindahkan bakteri secara langsung (Perilla-Henao & Dicke, 2020). Aktivitas manusia seperti penggunaan alat pertanian juga dapat menyebarkan bakteri (Mansfield *et al*., 2012). Biji dan bahan tanam yang terinfeksi merupakan sumber penyebaran yang penting (Agrios, 2005). Tanah juga dapat menjadi reservoir bagi bakteri patogen (Hirano & Upper, 2000). Penyebaran melalui sistem irigasi sering terjadi pada pertanian intensif (Beattie, 2011).

10.6.4 Mekanisme Infeksi Bakteri

Infeksi bakteri pada tanaman umumnya terjadi melalui dua jalur utama, yaitu melalui luka dan bukaan alami seperti stomata, hidatoda, serta lentisel (Agrios, 2005). Luka pada tanaman dapat disebabkan oleh faktor mekanik, serangga, alat pertanian, atau kondisi lingkungan ekstrem (Mansfield *et al*., 2012). Bukaan alami seperti stomata menyediakan akses

langsung bagi bakteri untuk memasuki jaringan internal tanaman tanpa perlu merusak struktur pelindung secara aktif (Beattie, 2011). Bakteri patogen memanfaatkan kondisi ini untuk menghindari hambatan fisik seperti kutikula dan dinding sel epidermis (Jones & Dangl, 2006). Setelah masuk, bakteri dapat berkembang biak di ruang antar sel atau sistem vaskular tanaman (Ryan *et al*., 2011). Proses infeksi ini sangat dipengaruhi oleh kelembapan lingkungan yang mendukung mobilitas bakteri (Hirano & Upper, 2000). Selain itu, keberadaan air pada permukaan tanaman sangat penting dalam proses penetrasi awal (Beattie, 2011). Tanaman yang mengalami stres atau kerusakan lebih rentan terhadap infeksi bakteri (Mansfield *et al*., 2012).

Masuknya bakteri melalui luka merupakan salah satu mekanisme infeksi yang paling umum pada tanaman (Agrios, 2005). Luka menyediakan jalur langsung menuju jaringan internal tanpa perlu aktivitas penetrasi yang kompleks (Jones & Dangl, 2006). Bakteri dapat dengan mudah mencapai jaringan parenkim melalui area yang rusak (Ryan *et al*., 2011). Setelah masuk, bakteri mulai berkembang biak dengan cepat menggunakan nutrisi dari jaringan inang (Mansfield *et al*., 2012). Luka juga sering mengeluarkan eksudat yang kaya nutrisi sehingga menarik bakteri (Lindow & Brandl, 2003). Selain itu, luka mengurangi efektivitas sistem pertahanan fisik tanaman (Jones & Dangl, 2006). Beberapa bakteri memiliki kemampuan untuk memperluas kerusakan jaringan melalui produksi enzim pektinase (Collmer & Keen, 1986).

Bukaan alami seperti stomata juga merupakan jalur penting bagi masuknya bakteri patogen (Beattie, 2011). Stomata merupakan pori-pori kecil pada permukaan daun yang berfungsi dalam pertukaran gas (Agrios, 2005). Bakteri dapat masuk melalui stomata terutama ketika pori terbuka akibat kondisi lingkungan tertentu (Hirano & Upper, 2000). Kelembapan tinggi biasanya meningkatkan peluang infeksi melalui stomata (Beattie, 2011). Setelah masuk, bakteri

bergerak ke ruang substomatal dan menyebar ke jaringan mesofil (Ryan *et al*., 2011). Beberapa bakteri juga dapat mengeluarkan senyawa yang mempengaruhi pembukaan stomata (Jones & Dangl, 2006). Hal ini membantu bakteri mempertahankan akses ke jaringan internal tanaman (Beattie, 2011). Infeksi melalui stomata sering terjadi pada permukaan daun yang basah (Hirano & Upper, 2000).

Setelah berhasil masuk melalui luka atau stomata, bakteri mulai melakukan kolonisasi jaringan tanaman (Mansfield *et al*., 2012). Kolonisasi ini dapat terjadi di ruang antar sel atau dalam sistem pembuluh (Ryan *et al*., 2011). Bakteri memanfaatkan nutrisi dari jaringan tanaman untuk berkembang biak (Lindow & Brandl, 2003). Selain itu, bakteri menghasilkan enzim dan toksin yang membantu penyebaran dalam jaringan (Buttner & Bonas, 2010). Beberapa bakteri mampu mengganggu sistem pertahanan tanaman dengan menyuntikkan efektor ke dalam sel inang (Alfano & Collmer, 2004). Efektor ini membantu bakteri menghindari deteksi oleh sistem imun tanaman (Jones & Dangl, 2006).

Mekanisme infeksi bakteri pada tanaman sering melibatkan produksi enzim yang mampu merusak dinding sel inang sebagai langkah awal kolonisasi jaringan (Collmer & Keen, 1986). Dinding sel tanaman yang tersusun dari pektin, selulosa, dan hemiselulosa menjadi target utama enzim bakteri (Agrios, 2005). Enzim utama yang dihasilkan bakteri patogen adalah pektinase yang berfungsi mendegradasi pektin pada lamela tengah (Collmer & Keen, 1986). Pektinase menyebabkan sel-sel tanaman kehilangan adhesi sehingga jaringan menjadi lunak (Jones & Dangl, 2006). Selain pektinase, bakteri juga menghasilkan selulase yang merusak struktur selulosa pada dinding sel (Agrios, 2005). Hemiselulase juga berperan dalam degradasi komponen hemiselulosa (Collmer & Keen, 1986). Kombinasi enzim ini memungkinkan kerusakan jaringan tanaman secara cepat dan luas (Mansfield *et al*., 2012). Produksi enzim biasanya

diinduksi oleh keberadaan substrat dinding sel tanaman (Buttner & Bonas, 2010).

10.6.5 Gejala Infeksi Bakteri

Gejala infeksi bakteri terdiri dari lesi basah (water-soaked), lendir bakteri (ooze), dan layu cepat tanpa klorosis awal (Agrios, 2005; Mansfield *et al*., 2012). Gejala awal infeksi bakteri pada tanaman sering ditandai dengan munculnya lesi basah yang terlihat seperti jaringan tanaman menjadi jenuh air dan lebih gelap dari area sehat (Beattie, 2011). Kondisi ini terjadi karena bakteri masuk ke jaringan tanaman dan merusak struktur sel sehingga cairan sel keluar dan mengisi ruang antar sel (Ryan *et al*., 2011). Lesi basah biasanya tampak transparan atau berminyak terutama pada daun muda yang masih lunak (Agrios, 2005). Perubahan warna ini merupakan indikasi awal bahwa patogen bakteri mulai berkembang di dalam jaringan tanaman (Mansfield *et al*., 2012).

Lesi basah sering berkembang dengan cepat menjadi bercak nekrotik ketika infeksi semakin parah dan jaringan mulai mati (Jones & Dangl, 2006). Pada tahap ini, area yang terinfeksi akan terlihat mengilap dan lembek sebelum akhirnya mengering atau membusuk (Agrios, 2005). Selain pada daun, lesi basah juga dapat muncul pada batang, buah, dan bagian tanaman lainnya tergantung jenis patogen yang menyerang (Mansfield *et al*., 2012). Gejala ini sering disertai dengan keluarnya eksudat bakteri yang tampak seperti lendir berwarna putih atau kekuningan (Hirano & Upper, 2000). Eksudat tersebut mengandung koloni bakteri yang aktif dan dapat menjadi sumber penularan ke tanaman lain (Lindow & Brandl, 2003). Dalam kondisi tertentu, jaringan yang terinfeksi akan menjadi lunak dan mudah hancur ketika disentuh (Agrios, 2005).

Lendir bakteri merupakan salah satu gejala khas pada tanaman yang terinfeksi oleh bakteri patogen dan sering digunakan sebagai indikator awal dalam diagnosis penyakit tanaman (Mansfield *et al*., 2012). Pada gejala ini muncul cairan kental yang keluar dari jaringan tanaman, terutama pada bagian batang, daun, atau buah yang mengalami luka atau tekanan (Beattie, 2011). Lendir tersebut terbentuk akibat aktivitas bakteri yang berkembang biak di dalam jaringan tanaman dan menghasilkan senyawa ekstraseluler (Ryan *et al*., 2011). Dalam kondisi lingkungan yang lembap, lendir bakteri menjadi lebih mudah terlihat karena adanya peningkatan kadar air di permukaan jaringan tanaman (Hirano & Upper, 2000). Warna lendir dapat bervariasi, mulai dari putih susu hingga kekuningan, tergantung pada jenis bakteri penyebab infeksi (Agrios, 2005).

Pembentukan lendir bakteri berkaitan erat dengan produksi eksopolisakarida yang dihasilkan oleh bakteri patogen selama proses infeksi (Sutherland, 2001). Senyawa ini berfungsi sebagai pelindung bagi bakteri dari kondisi lingkungan yang tidak menguntungkan, seperti kekeringan atau serangan sistem pertahanan tanaman (Mansfield *et al*., 2012). Selain itu, eksopolisakarida membantu bakteri melekat pada permukaan jaringan tanaman sehingga mempermudah kolonisasi (Lindow & Brandl, 2003). Ketika populasi bakteri meningkat secara signifikan, akumulasi senyawa tersebut membentuk lendir yang terlihat secara kasat mata (Sutherland, 2001). Lendir ini juga dapat menghambat respons pertahanan tanaman dengan mengganggu sinyal biokimia yang diperlukan untuk melawan patogen (Jones & Dangl, 2006).

Gejala layu cepat ditandai dengan perubahan kondisi tanaman yang tiba-tiba layu meskipun warna daun masih tampak hijau pada tahap awal infeksi

(Agrios, 2005). Kondisi tersebut menunjukkan bahwa gangguan utama terjadi pada sistem transportasi air di dalam tanaman, bukan pada proses fotosintesis secara langsung (Ryan *et al*., 2011). Bakteri patogen biasanya masuk melalui luka atau akar dan kemudian berkembang biak di jaringan pembuluh tanaman (Mansfield *et al*., 2012). Setelah berada di dalam xilem, bakteri akan mengganggu aliran air dengan cara memperbanyak diri dan menghasilkan senyawa tertentu (Beattie, 2011). Akibatnya, tanaman mengalami kekurangan air secara internal meskipun kondisi tanah cukup lembap (Hirano & Upper, 2000).

Mekanisme terjadinya layu cepat tanpa klorosis awal berkaitan erat dengan aktivitas bakteri di dalam jaringan pembuluh xilem tanaman (Ryan *et al*., 2011). Bakteri yang masuk ke dalam sistem vaskular akan berkembang biak dengan cepat dan membentuk koloni yang padat (Mansfield *et al*., 2012). Selain itu, bakteri juga menghasilkan eksopolisakarida yang dapat menyumbat pembuluh xilem (Sutherland, 2001). Penyumbatan ini menyebabkan aliran air dari akar ke daun terganggu secara signifikan (Beattie, 2011). Akibatnya, daun kehilangan tekanan turgor dan mengalami layu meskipun masih berwarna hijau (Agrios, 2005). Tidak adanya klorosis awal menunjukkan bahwa klorofil belum mengalami degradasi pada tahap awal infeksi (Jones & Dangl, 2006). Hal ini membedakan infeksi bakteri dengan beberapa penyakit lain yang biasanya diawali dengan perubahan warna daun (Mansfield *et al*., 2012). Selain penyumbatan fisik, bakteri juga dapat menghasilkan enzim yang merusak jaringan tanaman (Ryan *et al*., 2011). Kerusakan ini memperparah gangguan distribusi air dan nutrisi di dalam tanaman (Agrios, 2005). Dalam waktu singkat,

seluruh bagian tanaman dapat menunjukkan gejala layu yang menyeluruh (Mansfield *et al*., 2012).

10.6.6 Penyakit yang Disebabkan oleh Bakteri

a. Penyakit Hawar Daun yang Disebabkan oleh *Xanthomonas* spp.

Penyakit hawar daun yang disebabkan oleh patogen *Xanthomonas* spp. merupakan salah satu penyakit bakteri penting yang menyerang berbagai tanaman budidaya di daerah tropis dan subtropis (Mansfield *et al*., 2012; Ryan *et al*., 2011). Patogen ini termasuk bakteri Gram Negatif yang mampu menginfeksi jaringan tanaman melalui stomata atau luka kecil pada permukaan daun (Agrios, 2005). Setelah masuk ke dalam jaringan tanaman, bakteri akan berkembang biak di ruang antar sel dan menyebabkan kerusakan jaringan secara progresif (Ryan *et al*., 2011).

Gejala penyakit hawar daun akibat *Xanthomonas* spp. biasanya dimulai dengan munculnya bercak kecil berwarna kuning kehijauan atau kebasahan pada permukaan daun (Agrios, 2005). Bercak ini kemudian berkembang menjadi lesi berwarna cokelat atau kehitaman yang menyatu sehingga menyebabkan jaringan daun mati secara luas (Mansfield *et al*., 2012). Pada kondisi serangan berat, seluruh permukaan daun dapat mengering dan tampak seperti terbakar (Ryan *et al*., 2011). Gejala ini sangat mengganggu proses fotosintesis tanaman karena luas permukaan daun yang aktif berkurang drastis (Jones & Dangl, 2006). Selain pada daun, beberapa spesies Xanthomonas juga dapat menyerang batang dan buah tergantung jenis tanaman inangnya (Mansfield *et al*., 2012).

Xanthomonas oryzae merupakan salah satu patogen penting yang menyerang tanaman padi dan menyebabkan penyakit hawar daun bakteri (bacterial leaf blight) (Nino-Liu *et al*., 2006). Penyakit ini dapat menyebabkan kerugian besar pada produksi padi karena mengurangi kemampuan tanaman dalam menghasilkan bulir secara optimal (Mew, 1987). Patogen ini menyebar melalui air irigasi, hujan, dan kontak antar tanaman yang terinfeksi, serta melalui luka pada daun akibat angin atau serangga (Beattie, 2011; Nino-Liu *et al*., 2006). Kondisi sawah yang tergenang air sangat mendukung perkembangan dan penyebaran penyakit ini di lapangan (Beattie, 2011).

b. Penyakit Layu Bakteri yang Disebabkan oleh *Ralstonia solanacearum*

Penyakit layu bakteri yang disebabkan oleh *Ralstonia solanacearum* merupakan salah satu penyakit tanaman yang sangat merugikan di berbagai wilayah pertanian tropis dan subtropis (Hayward, 1991; Mansfield *et al*., 2012). Infeksi biasanya dimulai dari akar tanaman yang mengalami luka atau kontak langsung dengan bakteri di dalam tanah (Agrios, 2005). Setelah masuk ke dalam jaringan akar, bakteri bergerak menuju sistem pembuluh xilem dan berkembangbiak di dalamnya (Genin & Denny, 2012). Perkembangan bakteri ini menyebabkan penyumbatan pembuluh sehingga aliran air dan nutrisi ke bagian atas tanaman terganggu (Vasse *et al*., 1995).

Gejala awal penyakit layu bakteri ditandai dengan layunya daun bagian atas pada siang hari meskipun tanah masih cukup lembap (Agrios,

2005). Gejala ini kemudian berkembang menjadi layu permanen yang tidak dapat pulih meskipun tanaman disiram air (Mansfield *et al*., 2012). Pada bagian batang, jika dipotong akan terlihat cairan berlendir berwarna putih susu yang keluar dari jaringan pembuluh (Hayward, 1991). Gejala lain yang khas adalah perubahan warna pembuluh menjadi cokelat kehitaman akibat kolonisasi bakteri (Genin & Denny, 2012). Tanaman yang terinfeksi berat akan mengalami kematian secara cepat karena sistem transportasi air benar-benar terganggu (Agrios, 2005).

Ralstonia solanacearum memiliki rentang inang yang sangat luas dan dapat menyerang berbagai tanaman penting seperti tomat, kentang, cabai, terong, pisang, dan tembakau (Hayward, 1991; Mansfield *et al*., 2012). Patogen ini menyebar melalui tanah yang terkontaminasi, air irigasi, alat pertanian, dan bahan tanam yang tidak sehat (Elphinstone, 2005). Selain itu, keberadaan gulma juga dapat menjadi inang alternatif yang membantu mempertahankan populasi patogen di alam (Hayward, 1991).

c. Penyakit Busuk Lunak yang Disebabkan oleh *Erwinia* spp.

Penyakit busuk lunak yang disebabkan oleh patogen *Erwinia* spp. merupakan salah satu penyakit bakteri penting yang menyerang berbagai tanaman hortikultura dan sayuran di seluruh dunia (Pérombelon, 2002; Mansfield *et al*., 2012). Patogen ini umumnya dikenal sebagai bakteri Gram Negatif yang memiliki kemampuan menghasilkan enzim pektinase yang dapat melarutkan dinding sel tanaman (Collmer & Keen, 1986). Infeksi biasanya

dimulai melalui luka pada jaringan tanaman yang disebabkan oleh serangga, alat pertanian, atau kerusakan mekanis (Agrios, 2005). Setelah masuk, bakteri berkembang dengan cepat di jaringan inang dan menghancurkan struktur sel tanaman (Pérombelon, 2002).

Gejala awal penyakit busuk lunak akibat *Erwinia* spp. ditandai dengan munculnya bercak basah kecil pada bagian buah, batang, atau umbi tanaman (Agrios, 2005). Bercak ini kemudian berkembang dengan cepat menjadi area lunak yang berair dan berbau tidak sedap akibat aktivitas bakteri (Pérombelon, 2002). Jaringan yang terinfeksi akan mengalami degradasi cepat sehingga berubah menjadi massa berlendir yang mudah runtuh ketika disentuh (Mansfield *et al*., 2012). Gejala ini sangat khas karena disertai dengan bau busuk yang menyengat akibat proses pembusukan jaringan tanaman (Agrios, 2005).

Erwinia carotovora (sekarang *Pectobacterium carotovorum*) merupakan salah satu patogen utama penyebab busuk lunak pada berbagai tanaman seperti kentang, wortel, kol, tomat, dan bawang (Charkowski, 2018). Patogen ini dapat bertahan di tanah, sisa tanaman, dan air irigasi sehingga menjadi sumber inokulum utama di lapangan (Pérombelon, 2002). Penyebaran bakteri terjadi melalui percikan air, alat pertanian, serta serangga yang membawa bakteri dari satu tanaman ke tanaman lain (Agrios, 2005).

10.7 Virus sebagai Patogen Tanaman

10.7.1 Karakteristik Umum Virus Patogen Tanaman

Virus patogen tanaman merupakan agen infeksius berukuran sangat kecil yang hanya dapat berkembang biak di dalam sel inang hidup (Hull, 2014; Scholthof *et al*., 2011). Virus tidak memiliki struktur seluler lengkap sehingga bergantung sepenuhnya pada metabolisme sel tanaman untuk replikasi (Agrios, 2005). Secara umum, virus tersusun atas materi genetik berupa RNA atau DNA yang dilindungi oleh kapsid protein (Hull, 2014). Sebagian besar virus tanaman memiliki genom RNA untai tunggal yang bersifat positif (Scholthof *et al*., 2011). Ukuran virus yang sangat kecil menyebabkan virus tidak dapat diamati dengan mikroskop cahaya biasa (Agrios, 2005). Virus tanaman menunjukkan spesifisitas inang yang tinggi meskipun beberapa mampu menginfeksi berbagai jenis tanaman (Hull, 2014). Infeksi virus sering kali menyebabkan perubahan fisiologis yang signifikan pada tanaman dengan gejala berupa mosaik, klorosis, nekrosis, hingga deformasi jaringan (Scholthof *et al*., 2011).

Virus tanaman memiliki struktur yang relatif sederhana dibandingkan dengan mikroorganisme lain seperti bakteri dan fungi (Hull, 2014). Kapsid protein yang melindungi materi genetik virus tersusun atas subunit yang disebut kapsomer (Agrios, 2005). Bentuk virus tanaman bervariasi, mulai dari batang (rod-shaped) hingga bulat (isometric) (Hull, 2014). Struktur ini berperan penting dalam menentukan cara virus menginfeksi sel inang (Scholthof *et al*., 2011). Virus tidak memiliki organel seperti mitokondria atau ribosom sehingga tidak dapat melakukan metabolisme sendiri (Agrios, 2005). Replikasi virus terjadi dengan memanfaatkan sistem enzimatik sel tanaman (Hull,

2014). Setelah masuk ke dalam sel, virus akan melepaskan materi genetiknya untuk memulai proses replikasi (Scholthof *et al*., 2011). Proses ini sering kali menyebabkan gangguan fungsi normal sel tanaman (Agrios, 2005). Selain itu, virus dapat bergerak antar sel melalui plasmodesmata (Hull, 2014). Penyebaran sistemik dalam tanaman terjadi melalui jaringan vaskular (Scholthof *et al*., 2011). Penularan virus tanaman umumnya melibatkan vektor biologis seperti serangga penghisap seperti kutu daun dan wereng (Nault, 1997). Virus dapat ditularkan secara persisten maupun non-persisten tergantung pada interaksi dengan vektor, bahan tanam terinfeksi, dan luka (Hull, 2014).

10.7.2 Struktur Virus Patogen Tanaman

Virus patogen tanaman memiliki struktur yang sangat sederhana karena hanya tersusun atas materi genetik dan selubung protein (Hull, 2014; Scholthof *et al*., 2011). Materi genetik virus dapat berupa RNA atau DNA yang membawa informasi untuk replikasi (Agrios, 2005). Sebagian besar virus tanaman diketahui memiliki genom RNA dibandingkan DNA (Hull, 2014). RNA virus umumnya berupa untai tunggal yang bersifat positif sehingga dapat langsung berfungsi sebagai mRNA (Scholthof *et al*., 2011). Sementara itu, virus DNA pada tanaman jumlahnya relatif lebih sedikit dan memiliki mekanisme replikasi yang berbeda (Agrios, 2005). Kapsid protein berfungsi melindungi materi genetik virus dari kerusakan lingkungan dan membantu virus masuk ke dalam sel inang selama proses infeksi (Hull, 2014).

Materi genetik virus tanaman merupakan komponen utama yang menentukan sifat biologis virus (Scholthof *et al*., 2011). RNA virus biasanya terdiri atas

beberapa gen yang mengkode protein struktural dan nonstruktural (Hull, 2014). Protein nonstruktural berperan dalam replikasi dan pergerakan virus di dalam tanaman (Scholthof *et al*., 2011). RNA virus memiliki tingkat mutasi yang tinggi karena tidak adanya mekanisme proofreading (Hull, 2014). Hal ini menyebabkan virus tanaman mudah beradaptasi terhadap perubahan lingkungan (Agrios, 2005). Pada virus DNA, materi genetik biasanya lebih stabil dibandingkan RNA (Hull, 2014). Namun demikian, virus DNA tetap bergantung pada enzim sel inang untuk replikasi (Agrios, 2005).

Kapsid merupakan struktur protein yang menyelubungi materi genetik virus dan memberikan bentuk khas pada virus (Hull, 2014). Kapsid tersusun atas subunit protein yang disebut kapsomer (Agrios, 2005). Susunan kapsomer ini dapat membentuk berbagai bentuk virus seperti batang atau bulat (Hull, 2014). Kapsid berfungsi sebagai pelindung, berperan dalam proses infeksi, memfasilitasi masuknya virus ke jaringan tanaman, serta menjaga stabilitas virus di lingkungan luar (Scholthof *et al*., 2011). Beberapa virus memiliki kapsid yang sangat tahan terhadap kondisi ekstrem (Hull, 2014). Ketahanan ini memungkinkan virus bertahan di sisa tanaman atau tanah (Agrios, 2005). Struktur kapsid juga menentukan cara virus ditularkan oleh vektor (Hull, 2014).

Interaksi antara materi genetik dan kapsid sangat penting dalam menentukan fungsi virus (Scholthof *et al*., 2011). Kedua komponen ini bekerja sama dalam proses infeksi dan replikasi di dalam sel inang (Hull, 2014). Setelah virus masuk ke dalam sel, kapsid akan terlepas untuk melepaskan materi genetik (Agrios, 2005). Proses ini disebut uncoating dan merupakan tahap awal infeksi (Scholthof *et al*., 2011). Materi genetik kemudian

mengarahkan sintesis protein virus menggunakan mesin sel inang (Hull, 2014). Protein kapsid baru akan disintesis untuk membentuk partikel virus baru (Agrios, 2005). Struktur sederhana virus patogen tanaman memberikan keuntungan dalam hal reproduksi dan penyebaran (Scholthof *et al*., 2011). Virus dapat dengan cepat memperbanyak diri di dalam sel tanaman tanpa memerlukan energi sendiri (Hull, 2014). Hal ini menyebabkan infeksi virus sering berkembang dengan cepat (Agrios, 2005).

10.7.3 Sistem Metabolisme Virus Patogen Tanaman

Virus patogen tanaman merupakan organisme submikroskopis yang tidak memiliki sistem metabolisme sendiri sehingga sepenuhnya bergantung pada sel inang untuk menjalankan siklus hidupnya (Hull, 2014; Agrios, 2005). Tanpa keberadaan sel inang, virus tidak dapat melakukan sintesis protein maupun replikasi genom (Scholthof *et al*., 2011). Oleh karena itu, virus dikategorikan sebagai parasit obligat yang hanya aktif di dalam sel hidup (Hull, 2014). Ketika virus memasuki sel tanaman, ia akan mengambil alih sistem metabolisme sel tersebut untuk kepentingannya sendiri (Agrios, 2005). Proses ini melibatkan penggunaan ribosom inang untuk menerjemahkan informasi genetik virus menjadi protein (Scholthof *et al*., 2011). Selain itu, virus juga memanfaatkan energi dalam bentuk ATP yang dihasilkan oleh sel tanaman (Hull, 2014). Ketergantungan total ini menjadikan virus sangat efisien dalam memanfaatkan sumber daya inang (Agrios, 2005).

Dalam proses infeksi, virus tanaman menunjukkan hubungan yang sangat erat dengan metabolisme sel inang yang dimanfaatkannya (Scholthof *et al*., 2011). Setelah memasuki sel, virus akan mengalami proses uncoating untuk melepaskan materi genetiknya (Hull,

2014). Materi genetik tersebut kemudian mengendalikan aktivitas sel untuk memproduksi komponen virus baru (Agrios, 2005). Virus menggunakan enzim dan sistem translasi milik sel untuk mensintesis protein struktural dan nonstruktural (Scholthof *et al*., 2011). Selain itu, replikasi genom virus juga sepenuhnya bergantung pada enzim yang tersedia dalam sel inang (Hull, 2014). Proses ini sering kali mengganggu fungsi normal sel tanaman (Agrios, 2005). Gangguan tersebut dapat menyebabkan perubahan fisiologis yang memunculkan gejala penyakit (Scholthof *et al*., 2011). Dalam beberapa kasus, sel yang terinfeksi dapat mengalami kematian akibat eksploitasi oleh virus (Hull, 2014). Ketergantungan virus pada sel inang juga menjelaskan mengapa virus tidak dapat dikultur pada media buatan seperti fungi dan bakteri (Agrios, 2005).

10.7.4 Cara Penularan Virus

Penularan virus tanaman dapat terjadi melalui vektor serangga, secara mekanis, melalui benih, dan perbanyakan vegetatif (Nault, 1997; Hull, 2014). Serangga seperti aphid dan whitefly berperan penting sebagai pembawa virus dari tanaman terinfeksi ke tanaman sehat (Ng & Falk, 2006). Aphid dikenal sebagai vektor yang mampu menularkan virus secara non-persisten maupun persisten (Ng & Falk, 2006). Dalam penularan non-persisten, virus hanya menempel pada alat mulut serangga dalam waktu singkat (Hull, 2014). Sebaliknya, pada penularan persisten, virus dapat bertahan lebih lama di dalam tubuh serangga (Nault, 1997). Whitefly sering dikaitkan dengan penularan virus secara persisten sirkulatif (Jones, 2003). Virus yang ditularkan melalui mekanisme ini biasanya memerlukan waktu inkubasi di dalam tubuh serangga (Ng & Falk,

2006). Setelah itu, serangga dapat menularkan virus selama sisa hidupnya (Hull, 2014).

Virus tanaman juga dapat ditularkan secara mekanis melalui kontak langsung antar tanaman (Agrios, 2005). Penularan mekanis biasanya terjadi ketika jaringan tanaman yang terluka bersentuhan dengan sumber virus (Hull, 2014). Kegiatan pertanian seperti pemangkasan, penyiangan, dan penggunaan alat yang terkontaminasi dapat menjadi media penularan virus (Agrios, 2005). Virus dapat masuk melalui luka kecil pada permukaan tanaman (Scholthof *et al*., 2011). Berbeda dengan penularan oleh serangga, penularan mekanis tidak memerlukan perantara biologis (Hull, 2014).

Penularan virus melalui benih dan perbanyakan vegetatif juga merupakan jalur penting dalam penyebaran penyakit tanaman (Agrios, 2005). Virus yang terbawa dalam benih dapat menginfeksi tanaman sejak tahap awal pertumbuhan (Hull, 2014). Hal ini menyebabkan tanaman yang tumbuh dari benih terinfeksi menjadi sumber inokulum bagi tanaman lain (Scholthof *et al*., 2011). Penularan melalui benih sering sulit dideteksi karena gejala tidak selalu muncul pada tahap awal (Agrios, 2005). Penularan virus melalui perbanyakan vegetatif terjadi ketika bagian tanaman seperti stek, umbi, rimpang, atau grafting digunakan sebagai bahan tanam yang membawa virus dari tanaman induk ke tanaman baru tanpa melalui proses generatif (Hull, 2014). Mekanisme ini sangat efisien bagi virus karena jaringan vegetatif biasanya sudah terinfeksi secara sistemik sehingga virus tersebar ke seluruh bagian tanaman termasuk organ yang digunakan untuk perbanyakan (Scholthof *et al*., 2011). Akibatnya, tanaman hasil perbanyakan vegetatif sering kali langsung menunjukkan gejala penyakit atau bahkan

tetap laten tanpa gejala tetapi menjadi sumber inokulum (Agrios, 2005).

10.7.5 Mekanisme Infeksi Virus pada Tanaman

Infeksi virus pada tanaman merupakan proses kompleks yang melibatkan interaksi antara partikel virus dan sel inang melalui berbagai tahapan biologis yang saling berkaitan (Hull, 2014; Scholthof *et al*., 2011). Proses ini mencakup replikasi di dalam sel, pergerakan antar sel, serta penyebaran sistemik ke seluruh jaringan tanaman (Agrios, 2005). Virus tanaman tidak dapat bereplikasi tanpa mesin sel inang sehingga sepenuhnya bergantung pada metabolisme sel untuk memperbanyak materi genetiknya (Hull, 2014). Setelah berhasil masuk ke sel, virus segera mengarahkan proses translasi dan replikasi untuk menghasilkan komponen virus baru (Scholthof *et al*., 2011). Tahapan infeksi awal biasanya dimulai dengan penetrasi melalui luka atau bantuan vektor seperti serangga yang membawa partikel virus ke jaringan tanaman (Nault, 1997). Begitu berada di dalam sel, virus akan melepaskan materi genetiknya yang kemudian digunakan untuk mengendalikan mesin seluler inang (Agrios, 2005). Replikasi virus berlangsung di sitoplasma atau inti tergantung jenis virus dengan memanfaatkan enzim dan ribosom inang (Hull, 2014). Selanjutnya, partikel virus yang baru terbentuk akan dipersiapkan untuk bergerak ke sel-sel lain melalui jalur khusus di jaringan tanaman (Scholthof *et al*., 2011). Pergerakan ini penting untuk memperluas infeksi dari titik awal ke seluruh bagian tanaman (Hull, 2014). Virus mampu memodifikasi struktur sel inang untuk memfasilitasi penyebaran antar sel (Agrios, 2005). Infeksi yang berhasil biasanya menghasilkan gejala seperti mosaik, klorosis, atau deformasi (Scholthof *et al*., 2011).

Replikasi virus dalam sel inang merupakan tahap kunci yang menentukan keberhasilan infeksi (Hull, 2014). Virus memanfaatkan enzim polimerase inang atau membawa enzim sendiri untuk menggandakan genomnya (Scholthof *et al*., 2011). Proses dimulai dengan pelepasan kapsid setelah penetrasi ke sitoplasma (Agrios, 2005). Materi genetik virus kemudian berinteraksi dengan ribosom inang untuk menghasilkan protein (Hull, 2014). Protein nonstruktural berfungsi mengatur replikasi dan menekan pertahanan tanaman (Scholthof *et al*., 2011). Virus RNA umumnya bereplikasi di sitoplasma, sedangkan virus DNA dapat masuk ke inti sel (Hull, 2014). Metabolisme sel dialihkan untuk mendukung produksi virus (Agrios, 2005). Akumulasi protein virus membentuk kompleks replikasi yang efisien (Scholthof *et al*., 2011). Virus juga menghambat mekanisme RNA silencing tanaman (Ding & Voinnet, 2007). Gangguan ini membuat sel kehilangan kemampuan melawan infeksi (Hull, 2014). Hasil akhir replikasi adalah ribuan partikel virus baru (Agrios, 2005).

Tahapan lanjutan replikasi melibatkan perakitan virion dari kapsid dan genom virus (Hull, 2014). Proses ini berlangsung dengan bantuan protein struktural virus (Scholthof *et al*., 2011). Genom dikemas ke dalam kapsid menjadi virion infektif (Agrios, 2005). Virus menggunakan sumber daya sel tanpa menghasilkan energi sendiri (Hull, 2014). Dalam beberapa kasus terbentuk inklusi tubuh di sitoplasma (Scholthof *et al*., 2011). Akumulasi partikel virus merusak struktur sel inang (Agrios, 2005). Kerusakan ini menurunkan fotosintesis dan metabolisme tanaman (Hull, 2014). Setelah terbentuk, virion berpindah ke sel tetangga (Scholthof *et al*., 2011).

Pergerakan antar sel terjadi melalui plasmodesmata (Lucas, 2006). Virus memanfaatkan movement protein untuk melewati saluran ini (Hull, 2014). Protein ini memperbesar ukuran ambang plasmodesmata (Scholthof *et al*., 2011). Struktur plasmodesmata dimodifikasi agar lebih permeabel (Lucas, 2006). Virus berpindah tanpa keluar ke ruang ekstraseluler (Agrios, 2005). Strategi ini menghindari deteksi sistem pertahanan tanaman (Scholthof *et al*., 2011). Perubahan ini terjadi melalui interaksi protein virus dan inang (Lucas, 2006). Hal ini memungkinkan pergerakan ribonukleoprotein virus (Hull, 2014). Pergerakan ini menjadi tahap awal infeksi sistemik (Agrios, 2005).

Penyebaran sistemik terjadi melalui floem (Hull, 2014). Virus bergerak ke daun, batang, dan akar (Scholthof *et al*., 2011). Infeksi menyebar cepat ke seluruh tanaman (Agrios, 2005). Virus mengikuti aliran fotosintat dalam floem (Lucas *et al*., 2009). Pergerakan sistemik terjadi setelah tahap antar sel (Hull, 2014). Gejala dapat muncul di seluruh tanaman (Scholthof *et al*., 2011). Beberapa virus dapat laten tergantung kondisi lingkungan (Agrios, 2005). Distribusi dalam floem sangat efisien tanpa energi virus (Hull, 2014).

10.7.6 Gejala Infeksi Virus

Infeksi virus pada tanaman sering ditandai oleh munculnya gejala visual khas seperti mosaik, klorosis, deformasi, dan pertumbuhan terhambat (Hull, 2014; Scholthof *et al*., 2011). Gejala mosaik merupakan pola warna daun tidak merata akibat gangguan pembentukan klorofil (Agrios, 2005). Gejala ini biasanya muncul pada tahap awal infeksi dan menjadi indikator penting gangguan fisiologis tanaman (Scholthof *et al*., 2011).

Gejala lain yang umum ditemukan adalah belang, yaitu pola garis atau bercak memanjang pada daun (Hull, 2014). Belang terjadi akibat distribusi infeksi virus yang mengikuti jaringan daun seperti tulang daun (Agrios, 2005). Pada tanaman hortikultura seperti cabai dan tomat, gejala ini sering menjadi tanda khas infeksi virus tertentu (Scholthof *et al*., 2011).

Klorosis merupakan gejala penting yang ditandai dengan menguningnya daun akibat penurunan klorofil (Agrios, 2005). Klorosis dapat terjadi sebagian atau menyeluruh tergantung jenis virus (Hull, 2014). Virus mengganggu kloroplas dan menurunkan efisiensi fotosintesis (Scholthof *et al*., 2011). Dampaknya adalah penurunan pertumbuhan dan hasil produksi tanaman (Agrios, 2005).

Gejala lain adalah daun keriting, yaitu deformasi akibat gangguan pertumbuhan jaringan (Hull, 2014). Gejala ini terjadi karena virus menyerang jaringan meristematik tanaman (Agrios, 2005). Akibatnya, perkembangan daun menjadi tidak simetris (Scholthof *et al*., 2011). Daun keriting juga berkaitan dengan gangguan hormon seperti auksin dan sitokinin (Taiz *et al*., 2015). Ketidakseimbangan hormon menyebabkan pertumbuhan tidak merata pada jaringan daun (Hull, 2014).

Infeksi virus juga menyebabkan pertumbuhan kerdil atau terhambat (Agrios, 2005). Hal ini terjadi karena gangguan pembelahan dan pemanjangan sel (Hull, 2014). Virus mengganggu proses fisiologis dasar tanaman sehingga ukuran tanaman tidak normal (Scholthof *et al*., 2011). Pertumbuhan kerdil juga terkait gangguan hormon seperti auksin, giberelin, dan sitokinin (Taiz *et al*., 2015). Virus dapat menghambat produksi

dan distribusi hormon tersebut sehingga pertumbuhan tidak optimal (Agrios, 2005).

10.7.7 Penyakit yang Disebabkan oleh Virus

a. Penyakit Mosaik Daun yang Disebabkan oleh *Tobacco Mosaic Virus* (TMV)

Penyakit mosaik daun oleh *Tobacco Mosaic Virus (TMV)* merupakan salah satu penyakit virus tanaman paling banyak diteliti dan berdampak luas pada tanaman Solanaceae seperti tembakau. *TMV* adalah virus RNA yang sangat stabil, mampu bertahan lama di lingkungan luar inang, dan menyebar melalui kontak mekanis serta luka kecil akibat aktivitas manusia atau alat pertanian. Setelah masuk ke sel tanaman, virus melepaskan materi genetiknya dan mengambil alih metabolisme sel inang untuk replikasi, yang kemudian mengganggu pembentukan klorofil dan memunculkan gejala mosaik pada daun (Scholthof, 2004; Zaitlin & Palukaitis, 2000; Hull, 2014).

Gejala utama *TMV* berupa pola mosaik hijau muda dan hijau tua akibat gangguan distribusi klorofil. Selain mosaik, infeksi juga menyebabkan deformasi daun seperti keriting, mengecil, serta penurunan kemampuan fotosintesis. Dampaknya adalah pertumbuhan terhambat, kerdil, dan penurunan hasil produksi tanaman secara signifikan (Scholthof, 2004; Agrios, 2005; Hull, 2014).

TMV memiliki inang utama Nicotiana tabacum, tetapi juga menyerang tomat, cabai, terong, dan tanaman hias lainnya. Virus ini dapat bertahan sangat lama pada sisa tanaman kering dan tanah, sehingga menjadi sumber inokulum yang sulit

dikendalikan. Ketahanannya terhadap lingkungan membuat *TMV* sangat stabil dan sulit dihilangkan di lapangan (Scholthof, 2004; Zaitlin & Palukaitis, 2000; Hull, 2014).

b. Penyakit Tungro Padi yang Disebabkan oleh *Rice Tungro Virus* (RTV)

Penyakit tungro padi yang disebabkan oleh *Rice Tungro Virus* merupakan salah satu penyakit virus terpenting pada tanaman *Oryza sativa* di Asia, termasuk Indonesia, karena menyebabkan penurunan hasil panen yang signifikan (Hibino, 1996; Azzam & Chancellor, 2002; Hull, 2014). Penyakit ini merupakan kompleks infeksi yang melibatkan *Rice Tungro Bacilliform Virus* dan *Rice Tungro Spherical Virus* yang bekerja secara sinergis (Hull, 2014; Hibino, 1996). Infeksi terjadi melalui vektor wereng hijau *Nephotettix* spp. yang membawa virus dari tanaman sakit ke tanaman sehat (Azzam & Chancellor, 2002; Hibino, 1996). Setelah masuk, virus bereplikasi dan menyebar melalui sistem pembuluh tanaman (Hull, 2014; Zaitlin & Palukaitis, 2000).

Gejala awal penyakit *Rice Tungro Virus* ditandai dengan perubahan warna daun menjadi kuning hingga oranye yang dimulai dari ujung daun dan menyebar ke seluruh helaian daun (Hibino, 1996; Azzam & Chancellor, 2002; Hull, 2014). Tanaman padi yang terinfeksi mengalami kerdil, jumlah anakan berkurang, dan produktivitas menurun drastis (Hibino, 1996; Ling, 1972; Azzam & Chancellor, 2002). Pada infeksi berat, tanaman dapat gagal membentuk malai sehingga tidak menghasilkan panen (Hibino, 1996; Hull, 2014). Gejala ini sering muncul berkelompok di lahan

pertanian karena sangat dipengaruhi oleh populasi vektor (Azzam & Chancellor, 2002; Hibino, 1996)

Oryza sativa merupakan inang utama *Rice Tungro Virus*, namun penyebarannya sangat bergantung pada vektor wereng hijau *Nephotettix* spp. yang aktif di lahan sawah (Hibino, 1996; Azzam & Chancellor, 2002). Vektor wereng hijau menghisap cairan dari tanaman terinfeksi dan kemudian menularkan virus ke tanaman sehat saat proses makan berikutnya (Azzam & Chancellor, 2002; Hull, 2014). Penyebaran penyakit ini berlangsung sangat cepat terutama pada musim tanam ketika populasi wereng tinggi (Hibino, 1996; Ling, 1972; Azzam & Chancellor, 2002).

c. Penyakit Mosaik yang Disebabkan oleh *Cucumber Mosaic Virus* (CMV)

Penyakit mosaik yang disebabkan oleh *Cucumber Mosaic Virus* (CMV) merupakan salah satu penyakit virus tanaman yang memiliki sebaran sangat luas dan menyerang berbagai jenis tanaman budidaya di seluruh dunia (Hull, 2014). *CMV* termasuk virus RNA dari famili Bromoviridae yang memiliki inang sangat luas mencakup lebih dari 1.000 spesies tanaman (Matthews, 1991). Infeksi biasanya terjadi melalui vektor serangga terutama kutu daun (aphid) yang menularkan virus secara non-persisten dari tanaman sakit ke tanaman sehat (Agrios, 2005). Setelah masuk ke dalam jaringan tanaman, virus akan bereplikasi di dalam sel dan menyebar melalui sistem pembuluh floem ke seluruh bagian tanaman (Hull, 2014).

Gejala penyakit mosaik akibat CMV ditandai dengan munculnya pola bercak hijau muda dan hijau tua pada permukaan daun yang tidak merata

(Matthews, 1991). Selain mosaik, daun juga dapat mengalami deformasi seperti keriting, menggulung, dan pengecilan ukuran (Agrios, 2005). Gejala lain yang sering muncul adalah klorosis yang menyebabkan penurunan kandungan klorofil pada daun sehingga menghambat proses fotosintesis (Hull, 2014). Pada tanaman yang terinfeksi berat, pertumbuhan menjadi terhambat dan tanaman tampak kerdil dibandingkan tanaman sehat (Matthews, 1991). Gejala ini sangat memengaruhi produktivitas tanaman karena mengurangi kemampuan tanaman dalam menghasilkan biomassa (Agrios, 2005).

CMV memiliki rentang inang yang sangat luas dan dapat menyerang berbagai tanaman hortikultura seperti cabai, mentimun, tomat, melon, dan tanaman hias (Hull, 2014). Penyebaran virus ini sangat bergantung pada aktivitas vektor kutu daun yang dapat memindahkan virus dalam waktu singkat saat menghisap cairan tanaman (Agrios, 2005). Selain itu, CMV juga dapat menyebar melalui benih, alat pertanian, dan kontak mekanis antar tanaman (Matthews, 1991).

1. Mikroorganisme (fungi, bakteri, dan virus) mempunyai karakteristik yang berbeda-beda yaitu struktur dan morfologi, cara reproduksi, habitat dan penyebaran, mekanisme infeksi, dan gejala infeksi.
2. Mikroorganisme memiliki peran yang sangat penting sebagai mikroba yang bersifat menguntungkan dan merugikan sebagai patogen tanaman.
3. Mikroorganisme yang berperan sebagai patogen tanaman dapat menurunkan kualitas dan kuantitas hasil tanaman bahkan dapat menyebabkan gagal panen.

DAFTAR PUSTAKA

Adler, J. 1975. Chemotaxis in bacteria. Annual Review of Biochemistry, 44: 341–356.

https://doi.org/10.1146/annurev.bi.44.070175.002013

Agrios, G. N. 2005. Plant Pathology (5th ed.). Burlington: Elsevier Academic Press.

Alberts, B. 2014. Molecular Biology of the Cell (6th ed.). Garland Science.

Alexopoulos, C. J., Mims, C. W., & Blackwell, M. 1996. Introductory Mycology (4th ed.). New York: John Wiley & Sons.

Alfano, J. R., & Collmer, A. 2004. Type III secretion system effector proteins: Double agents in bacterial disease and plant defense. Annual Review of Phytopathology, 42: 385–414.

https://doi.org/10.1146/annurev.phyto.42.040803.140623

Andersson, D. I., & Hughes, D. 2010. Antibiotic resistance and its cost: Is it possible to reverse resistance. Nature Reviews Microbiology, 8(4): 260–271.

https://doi.org/10.1038/nrmicro2319

Armitage, J. P. 1999. Bacterial taxis and chemotaxis. Nature Reviews Microbiology, 3: 190–199.

https://doi.org/10.1038/35101636

Azzam, O., & Chancellor, T. C. B. 2002. The biology, epidemiology, and management of rice tungro disease in Asia. Plant Disease, 86(2), 88–100. https://doi.org/10.1094/PDIS.2002.86.2.88

Bailey, J. A., Jeger, M. J., & Farrar, J. F. 1992. Colletotrichum: Biology, Pathology and Control. CAB International.

Bardgett, R. D., & van der Putten, W. H. 2014. Belowground biodiversity and ecosystem functioning. Nature, 515(7528): 505–511. https://doi.org/10.1038/nature13855

Barker, A. V., & Pilbeam, D. J. 2015. Handbook of plant nutrition. CRC Press.

Beattie, G. A. 2011. Water relations in the interaction of foliar bacterial pathogens with plants. Annual Review of Phytopathology, 49: 533–555.

https://doi.org/10.1146/annurev-phyto-072910-095452

Belas, R. 2014. Biofilms, flagella, and mechanosensing of surfaces by bacteria. Trends in Microbiology, 22(9): 517–527. https://doi.org/10.1016/j.tim.2014.05.002

Bender, S. F., Wagg, C., & van der Heijden, M. G. A. 2016. An underground revolution: Biodiversity and soil ecological engineering for agricultural sustainability. Trends in Ecology & Evolution, 31(6): 440–452. https://doi.org/10.1016/j.tree.2016.02.016

Bennett, J. W., & Klich, M. 2003. Mycotoxins. Clinical Microbiology Reviews, 16(3): 497–516.

DOI: https://doi.org/10.1128/CMR.16.3.497-516.2003

Berg, H. C. 2003. The rotary motor of bacterial flagella. Annual Review of Biochemistry, 72: 19–54.

https://doi.org/10.1146/annurev.biochem.72.121801.161737

Berg, G., Rybakova, D., Fischer, D., Cernava, T., Vergès, M. C. C., Charles, T., Chen, X., Cocolin, L., Eversole, K., Corral, G. H., Kazou, M., Reinhardt, R., Wakamatsu, T., & Schmidt, H. 2016. Microbiome definition re-visited: Old concepts and new challenges. Microbiome, 4: 1–12. https://doi.org/10.1186/s40168-016-0176-1

Brady, N. C., & Weil, R. R. 2016. The nature and properties of soils (15th ed.). Pearson.

Boller, T., & Felix, G. 2009. A renaissance of elicitors: perception of microbe-associated molecular patterns. Annual Review of Plant Biology, 60, 379–406.

https://doi.org/10.1146/annurev.arplant.57.032905.105346

Bono, J. L., *et al*. 1991. Fimbriae in plant-associated bacteria. Journal of Bacteriology, 173(10): 3216–3222. https://doi.org/10.1128/jb.173.10.3216-3222.1991

Buttner, D., & Bonas, U. 2010. Regulation and secretion of *Xanthomonas virulence* factors. FEMS Microbiology Reviews, 34(2): 107–133.

https://doi.org/10.1111/j.1574-6976.2009.00206.x

Cannon, P. F., Damm, U., Johnston, P. R., & Weir, B. S. 2012. Colletotrichum – current status and future directions. Studies in Mycology, 73: 181–213.

DOI: https://doi.org/10.3114/sim0014

Carlile, M. J., Watkinson, S. C., & Gooday, G. W. 2001. The Fungi (2nd ed.). London: Academic Press.

Casadevall, A. 2004. Evolution of intracellular pathogens. Annual Review of Microbiology, 58: 217–249. https://doi.org/10.1146/annurev.micro.58.030603.123620

Casadevall, A., & Pirofski, L. A. 2001. Host-pathogen interactions: Basic concepts of microbial commensalism, colonization, infection, and disease. Infection and Immunity, 68(12): 6511–6518. https://doi.org/10.1128/IAI.69.12.6511-6518.2001

Casadevall, A., & Pirofski, L. A. 2003. The damage-response framework of microbial pathogenesis. Nature Reviews Microbiology, 1(1): 17–24.

https://doi.org/10.1038/nrmicro732

Chaban, B., Hughes, H. V., & Beeby, M. 2015. The flagellum in bacterial pathogenesis. Current Opinion in Microbiology, 23: 1–8. https://doi.org/10.1016/j.mib.2014.11.003

Chakraborty, S., & Newton, A. C. 2011. Climate change, plant diseases and food security: An overview. Plant Pathology, 60(1): 2–14.https://doi.org/10.1111/j.1365-3059.2010.02411.x

Charkowski, A. O. 2018. The changing face of bacterial soft-rot diseases. Annual Review of Phytopathology, 56: 269–288. https://doi.org/10.1146/annurev-phyto-080417-045906

Chen, X. M. 2005. Epidemiology and control of stripe rust (*Puccinia striiformis* f. sp. *tritici*) on wheat. Canadian Journal of Plant Pathology, 27(3), 314–337.

DOI: https://doi.org/10.1080/07060660509507230

Coakley, S. M., Scherm, H., & Chakraborty, S. 1999. Climate change and plant disease management. Annual Review of Phytopathology, 37: 399–426.

https://doi.org/10.1146/annurev.phyto.37.1.399

Collmer, A., & Keen, N. T. 1986. The role of pectic enzymes in plant pathogenesis. Annual Review of Phytopathology, 24: 383–409. https://doi.org/10.1146/annurev.py.24.090186.002123

Compant, S., Clément, C., & Sessitsch, A. 2010. Plant growth-promoting bacteria in the rhizo- and endosphere of plants. Applied Soil Ecology, 61: 1–10.

https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2010.11.002

Compant, S., Duffy, B., Nowak, J., Clément, C., & Barka, E. A. 2005. Use of plant growth-promoting bacteria for biocontrol of plant diseases: Principles, mechanisms of action, and future prospects. Applied and Environmental Microbiology, 71(9): 4951–4959.

https://doi.org/10.1128/AEM.71.9.4951-4959.2005

Deacon, J. W. 2006. Fungal Biology (4th ed.). Oxford: Blackwell Publishing.

Dean, R., Van Kan, J. A. L., Pretorius, Z. A., Hammond-Kosack, K. E., Di Pietro, A., Spanu, P. D., & Foster, G. D. 2012. The Top 10 fungal pathogens in molecular plant pathology. Molecular Plant Pathology, 13(4): 414–430. DOI: https://doi.org/10.1111/j.1364-3703.2011.00783.x

Davies, P. J. 2010. Plant Hormones: Biosynthesis, Signal Transduction, Action (3rd ed.). Dordrecht: Springer.

Davies, J., & Davies, D. 2010. Origins and evolution of antibiotic resistance. Microbiology and Molecular Biology Reviews, 74(3): 417–433. https://doi.org/10.1128/MMBR.00016-10

Deising, H. B., Werner, S., & Wernitz, M. 2000. The role of fungal appressoria in plant infection. Microbes and Infection, 2(13), 1631–1641.

https://doi.org/10.1016/S1286-4579(00)01338-6

Deitsch, K. W., Lukehart, S. A., & Stringer, J. R. 2009. Antigenic variation in pathogens. Annual Review of Microbiology, 63: 53–70. https://doi.org/10.1146/annurev.micro.091208.073058

Ding, S. W., & Voinnet, O. 2007. Antiviral immunity directed by small RNAs. Cell, 130(3): 413–426.

https://doi.org/10.1016/j.cell.2007.07.039

Dodds, P. N., & Rathjen, J. P. 2010. Plant immunity: Towards an integrated view of plant–pathogen interactions. Nature Reviews Genetics, 11(8): 539–548. https://doi.org/10.1038/nrg2812

Falkowski, P. G., Fenchel, T., & Delong, E. F. 2008. The microbial engines that drive Earth's biogeochemical cycles. Science, 320(5879): 1034–1039.

https://doi.org/10.1126/science.1153213

Elphinstone, J. G. 2005. The current bacterial wilt situation: A global overview. Bacterial Wilt Disease and the *Ralstonia solanacearum* Species Complex.

https://doi.org/10.1094/9780890543195.001

FAO. 2011. Global food losses and food waste – Extent, causes and prevention. Food and Agriculture Organization of the United Nations. https://www.fao.org

Flemming, H. C., & Wingender, J. 2010. The biofilm matrix. Nature Reviews Microbiology, 8: 623–633. https://doi.org/10.1038/nrmicro2415

Finlay, B. B., & Falkow, S. 1997. Common themes in microbial pathogenicity revisited. Microbiology and Molecular Biology Reviews, 61(2): 136–169.

https://doi.org/10.1128/mmbr.61.2.136-169.1997

Finlay, B. B., & McFadden, G. 2006. Anti-immunology: Evasion of the host immune system by bacterial and viral pathogens. Cell, 124(4): 767–782.

https://doi.org/10.1016/j.cell.2006.01.034

Freeman, S., Minz, D., Maymon, M., Zveibil, A., Barbul, O., & Gal-On, A. 2001. Characterization of *Colletotrichum acutatum* causing anthracnose on strawberry and other hosts. Phytopathology, 91(6): 548–553. https://doi.org/10.1094/PHYTO.2001.91.6.548

Frost, L. S., Leplae, R., Summers, A. O., & Toussaint, A. 2005. Mobile genetic elements: The agents of opensource evolution. Nature Reviews Microbiology, 3(9): 722–732.

https://doi.org/10.1038/nrmicro1235

Garcia-Solache, M. A., & Casadevall, A. 2010. Global warming will bring new fungal diseases for mammals. mBio, 1(1): 1-10. https://doi.org/10.1128/mBio.00061-10

Genin, S., & Denny, T. P. 2012. Pathogenomics of the *Ralstonia solanacearum* species complex. Annual Review of Phytopathology, 50: 67–89.

https://doi.org/10.1146/annurev-phyto-081211-173000

Gnanamanickam, S. S. 2006. Plant-associated bacteria. Springer.

Gómez-Gómez, L., & Boller, T. 2000. FLS2: an LRR receptor-like kinase involved in flagellin perception. Plant Cell, 12(12): 2483–2494. https://doi.org/10.1105/tpc.12.12.2483

Goswami, R. S., & Kistler, H. C. 2004. Heading for disaster: *Fusarium graminearum* on cereal crops. Molecular Plant Pathology, 5(6): 515–525.

https://doi.org/10.1111/j.1364-3703.2004.00252.x

Green, E. R., & Mecsas, J. 2016. Bacterial secretion systems. Virulence, 7(5): 462–478.

https://doi.org/10.1080/21505594.2016.1184386

Haas, D., & Défago, G. 2005. Biological control of soil-borne pathogens by fluorescent pseudomonads. Nature Reviews Microbiology, 3(4): 307–319.

https://doi.org/10.1038/nrmicro1129

Hall-Stoodley, L., Costerton, J. W., & Stoodley, P. 2004. Bacterial biofilms. Nature Reviews Microbiology, 2: 95–108. https://doi.org/10.1038/nrmicro821

Hansen, J. 2008. Rust fungi and plant disease epidemiology. Annual Review of Phytopathology, 46: 251–277. https://doi.org/10.1146/annurev.phyto.46.081407.104200

Harman, G. E., Howell, C. R., Viterbo, A., Chet, I., & Lorito, M. 2004. *Trichoderma* species—opportunistic, avirulent plant symbionts. Nature Reviews Microbiology, 2(1): 43–56. https://doi.org/10.1038/nrmicro797

Hayward, A. C. 1991. Biology and epidemiology of bacterial wilt caused by *Pseudomonas solanacearum*. Annual Review of Phytopathology, 29: 65–87.

https://doi.org/10.1146/annurev.py.29.090191.000433

Heath, M. C. 2000. Hypersensitive response-related death. Plant Molecular Biology, 44: 321–334. https://doi.org/10.1023/A:1026592509060

Hibino, H. 1996. Biology and epidemiology of rice viruses. Annual Review of Phytopathology, 34: 249–274. https://doi.org/10.1146/annurev.phyto.34.1.249

Hirano, S. S., & Upper, C. D. 2000. Bacteria in the leaf ecosystem with emphasis on *Pseudomonas syringae*. Microbiology and Molecular Biology Reviews, 64(3): 624–653.

https://doi.org/10.1128/MMBR.64.3.624-653.2000

Hornef, M. W., Wick, M. J., Rhen, M., & Normark, S. 2002. Bacterial strategies for overcoming host immune responses. Nature Reviews Microbiology, 2(11): 873–886.

https://doi.org/10.1038/nrmicro1035

Howard, R. J., & Valent, B. 1996. Breaking and entering: Host penetration by the fungal rice blast pathogen *Magnaporthe grisea*. Annual Review of Microbiology, 50: 491–512.

https://doi.org/10.1146/annurev.micro.50.1.491

Huerta-Espino, J., Singh, R. P., German, S., McCallum, B. D., Park, R. F., Chen, W. Q., & Bhavani, S. 2011. Global status of wheat leaf rust caused by *Puccinia triticina*. Euphytica, 179: 143–160.

https://doi.org/10.1007/s10681-011-0361-x

Hull, R. 2014. Plant virology (5th ed.). Academic Press.

IFAD. 2016. Rural development report 2016: Fostering inclusive rural transformation. International Fund for Agricultural Development. https://www.ifad.org

Janeway, C. A., Travers, P., Walport, M., & Shlomchik, M. J. 2017. Immunobiology: The immune system in health and disease (9th ed.). Garland Science.

Jawetz, E., Melnick, J. L., & Adelberg, E. A. 2019. Medical Microbiology (28th ed.). New York: McGraw-Hill Education.

Jones, J. D. G., & Dangl, J. L. 2006. The plant immune system. Nature, 444(7117): 323–329. https://doi.org/10.1038/nature05286

Jones, D. R. (2003). Plant viruses transmitted by whiteflies. European Journal of Plant Pathology, 109: 195–219. https://doi.org/10.1023/A:1022853815454

Josenhans, C., & Suerbaum, S. 2002. The role of motility as a virulence factor in bacteria. International Journal of Medical Microbiology, 291(8): 605–614.

https://doi.org/10.1078/1438-4221-00150

Kline, K. A., Fälker, S., Dahlberg, S., Normark, S., & Henriques-Normark, B. 2010. Bacterial adhesins in host-microbe interactions. Cell Host & Microbe, 8(1): 1–14.

https://doi.org/10.1016/j.chom.2010.06.011

Kolmer, J. A. 2005. Tracking wheat rust on a continental scale. Current Opinion in Plant Biology, 8(4): 441–449. https://doi.org/10.1016/j.pbi.2005.05.004

Kubicek, C. P., Starr, T. L., & Glass, N. L. 2014. Plant cell wall–degrading enzymes and their secretion in plant-pathogenic fungi. Annual Review of Phytopathology, 52: 427–451.

https://doi.org/10.1146/annurev-phyto-102313-045831

Kuzyakov, Y., & Blagodatskaya, E. 2015. Microbial hotspots and hot moments in soil: Concept & review. Soil Biology and Biochemistry, 83: 184–199.

https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2015.01.025

Kwon-Chung, K. J., & Bennett, J. E. 1992. Medical Mycology. Philadelphia: Lea & Febiger.

Leonard, K. J., & Szabo, L. J. 2005. Stem rust of small grains and grasses caused by *Puccinia graminis.* Molecular Plant Pathology, 6(2): 99–111.

https://doi.org/10.1111/j.1364-3703.2005.00273.x

Leslie, J. F., & Summerell, B. A. 2006. The Fusarium Laboratory Manual. Blackwell Publishing.

(book record): https://doi.org/10.1002/9780470278376

Lindow, S. E., & Brandl, M. T. 2003. Microbiology of the phyllosphere. Applied and Environmental Microbiology, 69(4): 1875–1883. https://doi.org/10.1128/AEM.69.4.1875-1883

Ling, K. C. 1972. Rice tungro disease. International Rice Research Institute (IRRI).

López, M. M., *et al*. 2010. Biological control of plant diseases. Plant Pathology, 59(1): 1–8.

https://doi.org/10.1111/j.1365-3059.2009.02130.x

Lucas, J. A. 1998. Plant Pathology and Plant Pathogens (3rd ed.). Oxford: Blackwell Science.

Lucas, W. J. 2006. Plant viral movement proteins. Annual Review of Phytopathology, 44: 393–418.

https://doi.org/10.1146/annurev.phyto.44.070505.143343

Lucas, W. J., Ham, B. K., & Kim, J. Y. 2009. Plasmodesmata-bridging the gap between neighboring plant cells. Trends in Cell Biology, 19(10): 495–503.

https://doi.org/10.1016/j.tcb.2009.07.003

Lugtenberg, B., & Kamilova, F. 2009. Plant-growth-promoting rhizobacteria. Annual Review of Microbiology, 63: 541–556.
https://doi.org/10.1146/annurev.micro.62.081307.162918

Madden, L. V., Hughes, G., & van den Bosch, F. 2007. The study of plant disease epidemics. American Phytopathological Society Press.

Madigan, M. T., Bender, K. S., Buckley, D. H., Sattley, W. M., & Stahl, D. A. 2021. Brock biology of microorganisms (16th ed.). Pearson.

Macnab, R. M. 2003. How bacteria assemble flagella. Annual Review of Microbiology, 57: 77–100.

https://doi.org/10.1146/annurev.micro.57.030502.090832

Mansfield, J., Genin, S., Magori, S., Citovsky, V., Sriariyanum, M., Ronald, P., & Foster, G. D. (2012). Top 10 plant pathogenic bacteria in molecular plant pathology. Molecular Plant Pathology, 13(6): 614–629. https://doi.org/10.1111/j.1364-3703.2012.00804.x

Marschner, P. 2012. Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants (3rd ed.). London: Academic Press.

Masson-Boivin, C., Giraud, E., Perret, X., & Batut, J. 2009. Establishing nitrogen-fixing symbiosis: The Rhizobium–legume symbiosis. Annual Review of Genetics, 43: 335–363.

https://doi.org/10.1146/annurev-genet-102108-134235

McGinnis, M. R., & Tyring, S. K. 1996. General concepts of mycology. *dalam* S. Baron (Ed.), Medical Microbiology (4th ed.). Galveston, TX: University of Texas Medical Branch. Diakses dari NCBI Bookshelf.

Melotto, M., Underwood, W., & He, S. Y. 2008. Role of stomata in plant innate immunity and foliar bacterial diseases. Annual Review of Phytopathology, 46: 101–122.

https://doi.org/10.1146/annurev.phyto.45.062806.094346

Medzhitov, R. 2007. Recognition of microorganisms and activation of the immune response. Nature, 449(7164): 819–826. https://doi.org/10.1038/nature06246

Mendgen, K., & Hahn, M. 2002. Plant infection and the establishment of fungal biotrophy.

Trends in Plant Science, 7(8): 352–356. https://doi.org/10.1016/S1360-1385(02)02297-4

Mew, T. W. 1987. Current status and future prospects of research on bacterial blight of rice. Annual Review of Phytopathology, 25: 359–382.

https://doi.org/10.1146/annurev.py.25.090187.002043

Michielse, C. B., & Rep, M. 2009. Pathogen profile update: *Fusarium oxysporum*. Molecular Plant Pathology, 10(3): 311–324. https://doi.org/10.1111/j.1364-3703.2009.00538.x

Miller, M. B., & Bassler, B. L. 2001. Quorum sensing in bacteria. Annual Review of Microbiology, 55: 165–199. https://doi.org/10.1146/annurev.micro.55.1.165

Moore, D., Robson, G. D., & Trinci, A. P. J. 2011. 21st Century Guidebook to Fungi. Cambridge: Cambridge University Press.

Moxon, E. R., & Kroll, J. S. 1990. The role of bacterial polysaccharide capsules in disease. Annual Review of Microbiology, 44: 361–385.

https://doi.org/10.1146/annurev.mi.44.100190.002045

Nault, L. R. 1997. Arthropod transmission of plant viruses: A new synthesis. Annals of the Entomological Society of America, 90(5): 521–541. https://doi.org/10.1093/aesa/90.5.521

Nemecek, J. C., Wüthrich, M., & Klein, B. S. 2007. Dimorphism and virulence in fungi. Current Opinion in Microbiology, 10(4): 314–319. https://doi.org/10.1016/j.mib.2007.04.002

Ng, J. C. K., & Falk, B. W. 2006. Virus-vector interactions mediating nonpersistent and persistent transmission of plant viruses. Annual Review of Phytopathology, 44: 183–212.

https://doi.org/10.1146/annurev.phyto.44.070505.143325

Nino-Liu, D. O., Ronald, P. C., & Bogdanove, A. J. 2006. *Xanthomonas oryzae* pathovars: model pathogens of a model crop. Molecular Plant Pathology, 7(5): 303–324. https://doi.org/10.1111/j.1364-3703.2006.00344.x

Oerke, E. C. 2006. Crop losses to pests. Journal of Agricultural Science, 144(1): 31–43. https://doi.org/10.1017/S0021859605005708

Patz, J. A., Campbell-Lendrum, D., Holloway, T., & Foley, J. A. 2005. Impact of regional climate change on human health. Nature, 438(7066): 310–317. https://doi.org/10.1038/nature04188

Paul, E. A. (2015). Soil microbiology, ecology and biochemistry (4th ed.). Academic Press.

Pieterse, C. M. J., Zamioudis, C., Berendsen, R. L., Weller, D. M., Van Wees, S. C. M., & Bakker, P. A. H. M. 2014. Induced systemic resistance by beneficial microbes. Annual Review of Phytopathology, 52: 347–375. https://doi.org/10.1146/annurev-phyto-082712-102340

Peres, N. A., Timmer, L. W., Adaskaveg, J. E., & Correll, J. C. 2005. Lifestyles of *Colletotrichum* species and implications for plant disease management. Plant Disease, 89(6): 552–560. https://doi.org/10.1094/PD-89-0552

Perfect, S. E., Hughes, H. B., O'Connell, R. J., & Green, J. R. 1999. *Colletotrichum*: A model genus for studies on pathology and fungal-plant interactions. Fungal Genetics and Biology, 27(2): 186–198. https://doi.org/10.1006/fgbi.1999.1138

Perilla-Henao, L. M., & Dicke, M. 2020. Ecology of insect vectors of plant pathogens. Annual Review of Entomology, 65: 193–211. https://doi.org/10.1146/annurev-ento-011019-025037

Pérombelon, M. C. M. 2002. Potato diseases caused by soft rot Erwinia: An overview of pathogenesis. Plant Pathology, 51(3): 241–260.

https://doi.org/10.1046/j.0032-0862.2001.00589.x

Ploetz, R. C. 2006. Fusarium wilt of banana is caused by several pathogens referred to as *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense*. Phytopathology, 96(6): 653–656.

https://doi.org/10.1094/PHYTO-96-0653

Prade, R. A., Zhan, D., Ayoubi, P., & Mort, A. J. 1999. Pectins, pectinases and plant–microbe interactions. Biotechnology and Genetic Engineering Reviews, 16(1): 361–391.

https://doi.org/10.1080/02648725.1999.10647987

Prescott, L. M., Harley, J. P., & Klein, D. A. 2002. Microbiology (5th ed.). McGraw-Hill.

Prusky, D., Freeman, S., & Dickman, M. B. 2000. *Colletotrichum*: Host specificity, pathology, and plant disease management. Annual Review of Phytopathology, 38: 413–433.

https://doi.org/10.1146/annurev.phyto.38.1.413

Raetz, C. R. H., & Whitfield, C. 2002. Lipopolysaccharide endotoxins. Annual Review of Biochemistry, 71: 635–700. https://doi.org/10.1146/annurev.biochem.71.110601.135414

Richardson, A. E., Barea, J. M., Mc Neill, A. M., & Prigent-Combaret, C. 2009. Acquisition of phosphorus and nitrogen in the rhizosphere. Plant and Soil, 321: 305–339. https://doi.org/10.1007/s11104-009-9895-2

Ryan, K. J., & Ray, C. G. 2014. Sherris medical microbiology (6th ed.). McGraw-Hill Education.

Ryan, K. J., Ray, C. G., & Sherris, J. C. 2022. Sherris Medical Microbiology (8th ed.). New York: McGraw-Hill Education.

Ryan, R. P., Germaine, K., Franks, A., Ryan, D. J., & Dowling, D. N. 2011. Bacterial endophytes: Recent developments and applications. FEMS Microbiology Letters, 321(2): 153–161.

https://doi.org/10.1111/j.1574-6968.2011.02375.x

Schaechter, M., Engleberg, N. C., DiRita, V. J., & Dubnau, D. 2013. Mechanisms of microbial disease (5th ed.). Lippincott Williams & Wilkins.

Schumann, G. L., & D'Arcy, C. J. 2010. Essential plant pathology (2nd ed.). American Phytopathological Society Press.

Scholthof, K.-B. G. 2004. *Tobacco mosaic virus*: a model system for plant biology. Annual Review of Phytopathology, 42: 13–34. https://doi.org/10.1146/annurev.phyto.42.040803.140405

Scholthof, K.-B. G., Adkins, S., & Czosnek, H. 2011. Top 10 plant viruses in molecular plant pathology. Molecular Plant Pathology, 12(9): 938–954.

https://doi.org/10.1111/j.1364-3703.2011.00752.x

Sharma, C. M., & Anand, B. K. 2002. Quorum sensing and gene regulation in bacteria. Journal of Biosciences, 27(1): 1–12. https://doi.org/10.1007/BF02703675

Silhavy, T. J., Kahne, D., & Walker, S. 2010. The bacterial cell envelope. Cold Spring Harbor Perspectives in Biology, 2(5): a000414. https://doi.org/10.1101/cshperspect.a000414

Six, J., Bossuyt, H., Degryze, S., & Denef, K. 2004. A history of research on the link between (micro) aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics. Soil and Tillage Research, 79(1): 7–31. https://doi.org/10.1016/j.still.2004.03.008

Smith, S. E., & Read, D. J. 2008. Mycorrhizal symbiosis (3rd ed.). Academic Press.

Strange, R. N. 2003. Introduction to Plant Pathology. Chichester: John Wiley & Sons.

Strange, R. N., & Scott, P. R. 2005. Plant disease: A threat to global food security. Annual Review of Phytopathology, 43: 83–116. https://doi.org/10.1146/annurev.phyto.43.113004.133839

Storz, G., & Hengge-Aronis, R. 2000. Bacterial stress responses. ASM Press.

Summerell, B. A., Laurence, M. H., Liew, E. C. Y., & Leslie, J. F. 2010. Biogeography and phylogeography of Fusarium: A review. Fungal Biology Reviews, 24(3): 89–100. https://doi.org/10.1016/j.fbr.2010.11.001

Suslow, T. V., Schroth, M. N., & Isaka, M. 1982. Applications of bacterial ecology in plant disease management. Annual Review of Phytopathology, 20: 473–495.

https://doi.org/10.1146/annurev.py.20.090182.002353

Sutherland, I. W. 2001. Biofilm exopolysaccharides. Microbiology, 147(3): 467–479.

https://doi.org/10.1099/00221287-147-3-467

Taiz, L., & Zeiger, E. 2010. Plant Physiology (5th ed.). Sunderland: Sinauer Associates.

Taiz, L., Zeiger, E., Møller, I. M., & Murphy, A. 2015. Plant Physiology and Development (6th ed.). Sinauer Associates.

https://global.oup.com/academic/product/plant-physiology-and-development-9781605352558

Than, P. P., Jeewon, R., Hyde, K. D., Pongsupasamit, S., Mongkolporn, O., & Taylor, P. W. J. 2008. Characterization and pathogenicity of *Colletotrichum capsici* causing anthracnose on chili. Fungal Diversity, 31: 89–112. https://doi.org/10.1007/s11046-008-9136-4

Thomas, C. M., & Nielsen, K. M. 2005. Mechanisms of, and barriers to, horizontal gene transfer. Nature Reviews Microbiology, 3: 711–721. https://doi.org/10.1038/nrmicro1234

Tilman, D., Cassman, K. G., Matson, P. A., Naylor, R., & Polasky, S. 2002. Agricultural sustainability and intensive production practices. Nature, 418(6898): 671–677.

https://doi.org/10.1038/nature01014

UNDP. 2020. Human development report 2020. United Nations Development Programme. https://hdr.undp.org

van der Heijden, M. G. A., Bardgett, R. D., & van Straalen, N. M. (2008). The unseen majority: Soil microbes as drivers of plant diversity and productivity. Ecology Letters, 11(3): 296–310. https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2007.01139.x

Vasse, J., Frey, P., & Trigalet, A. 1995. Microscopic studies of intercellular infection and vascular colonization of tomato roots by *Pseudomonas solanacearum*. Molecular Plant-Microbe Interactions, 8(2): 241–251. https://doi.org/10.1094/MPMI-8-0241

Virgin, H. W., Wherry, E. J., & Ahmed, R. 2009. Redefining chronic viral infection. Cell, 138(1): 30–50. https://doi.org/10.1016/j.cell.2009.06.036

Vollmer, W., Blanot, D., & de Pedro, M. A. 2008. Peptidoglycan structure and architecture. FEMS Microbiology Reviews, 32(2): 149–167.

https://doi.org/10.1111/j.1574-6976.2007.00094.x

Walton, J. D. 1996. Host-selective toxins: Agents of compatibility. The Plant Cell, 8(10): 1723–1733. https://doi.org/10.1105/tpc.8.10.1723

Webster, J., & Weber, R. 2007. Introduction to Fungi (3rd ed.). Cambridge: Cambridge University Press.

World Bank. 2022. Global economic prospects. World Bank Group. https://www.worldbank.org

Zaitlin, M., & Palukaitis, P. 2000. Advances in understanding plant viruses and virus diseases. Annual Review of Phytopathology, 38: 117–143.

https://doi.org/10.1146/annurev.phyto.38.1.117

BIODATA PENULIS



Dr. Eka Pratiwi Tenriawaru, M.Pd.

Dosen Program Studi Biologi

Fakultas Sains Universitas Cokroaminoto Palopo

Penulis penyelesaikan pendidikan magister di bidang Pendidikan Biologi di Universitas Negeri Makassar pada tahun 2011 dan memperoleh gelar doktor dalam bidang Biologi (peminatan Mikrobiologi) dari Universitas Brawijaya pada tahun 2022. Saat ini penulis bertugas sebagai dosen tetap pada Program Studi Biologi, Fakultas Sains Universitas Cokroaminoto palopo. Penulis mengampu berbagai mata kuliah seperti Mikrobiologi, Manajemen Laboratorium, Mikrobiologi Industri, dan Biologi Molekuler. Selain mengajar, penulis aktif menulis artikel ilmiah, buku, *reviewer* jurnal nasional dan internasional, dan menjadi pembicara dalam berbagai seminar nasional dan internasional. Melalui karya tulis ini, penulis berupaya memperluas wawasan akademik serta memberikan inspirasi bagi praktisi, mahasiswa, dan masyarakat dalam memahami dinamika sains, khususnya Biologi dan Mikrobiologi. Penulis dapat dihubungi melalui email: epta86@gmail.com.

BIODATA PENULIS



Gallyndra Fatkhu Dinata, S.P., M.P.

Dosen Fitopatologi

Politeknik Negeri Jember

gallyndra.fatkhu@polije.ac.id

Penulis adalah dosen tetap pada Jurusan Produksi Pertanian, Politeknik Negeri Jember. Pendidikan sarjana ditempuh pada Program Studi Agroekoteknologi dengan minat Perlindungan Tanaman, kemudian melanjutkan studi magister pada bidang Patologi Tumbuhan (Fitopatologi), Jurusan Hama dan Penyakit Tanaman, Universitas Brawijaya.

Bidang keilmuan yang ditekuni penulis berfokus pada hama dan penyakit tanaman, terutama fitopatologi, dengan kajian utama meliputi bakteriologi tumbuhan, mikologi, serta pengendalian hayati. Saat ini penulis dipercaya sebagai Kepala Laboratorium Perlindungan Tanaman Politeknik Negeri Jember. Dalam kegiatan akademik, penulis mengampu berbagai mata kuliah, di antaranya Dasar-Dasar Perlindungan Tanaman, Ilmu Penyakit Tanaman, Ilmu Hama Tanaman, Perlindungan Tanaman, Pestisida dan Teknik Aplikasi,

Penulis aktif dalam kegiatan penelitian dan pengabdian kepada masyarakat, serta pengembangan bahan ajar di

bidang pertanian. Dalam beberapa tahun terakhir, penulis juga intensif membimbing mahasiswa pada berbagai kegiatan akademik dan kompetisi, seperti Program Kreativitas Mahasiswa (PKM), Pekan Ilmiah Mahasiswa Nasional (PIMNAS), dan berbagai kegiatan kemahasiswaan lainnya.

BIODATA PENULIS



Dr. Ir. Ni'matuljannah Akhsan., M.P.

Dosen Program Studi Magister Pertanian Tropika Basah

Fakultas Pertanian Universitas Mulawarman

Penulis kelahiran Makassar pada 17 Maret 1964. Pendidikan S1 selesai pada tahun 1988 di Fakultas Pertanian Universitas Lambung Mangkurat, Pendidikan S2 di Fakultas Pertanian Universitas Gajah Mada, selesai pada tahun 1998, S3 di Fakultas Kehutanan Universitas Mulawarman, selesai tahun 2013. Saat ini aktif sebagai dosen di Fakultas Pertanian, khususnya di bidang Hama dan Penyakit Tanaman (Proteksi Tanaman). Penulis aktif mengajar dan membimbing Mahasiswa di jenjang S1, S2 dan S3. Berbagai matakuliah yang diampu yang semuanya berkaitan dengan proteksi Tanaman di antaranya Proteksi Tanaman, Mikologi dan Bakteriologi, Ilmu Penyakit Tumbuhan, Epidemiologi Penyakit Tanaman, Pestisida dan Teknik aplikasi, Dasar-dasar Mikrobiologi di Program Studi Agroekoteknologi. Di Program Studi Magister Pertanian Tropika Basah mengajar Ketahanan tanaman, Mikologi lanjut dan Analisis Ekonomi Jasad Pengganggu Tanaman. Di Program Doktor Pertanian mengajar MK Interaksi Mikroba dan Tanaman. Penulis juga aktif menulis artikel hasil penelitian Jurnal nasional dan

Internasional. Menjadi anggota organisasi keilmuan seperti Perhimpunan Fitopatologi Indonesia (PFI), Perhimpunan Mikrobiologi Indonesia (PERMI), Perhimpunan Mikologi Indonesia (Mikoina) dan Himpunan Ilmu Gulma Indonesia (HIGI).

BIODATA PENULIS



Zurrrahmi Wirda, S.P., M.P.

Dosen Program Studi Agroekoteknologi

Jurusan Budidaya Pertanian

Fakultas Pertanian Universitas Malikussaleh

Penulis lahir pada tanggal 14 Oktober 1977 di Banda Aceh, Propinsi Aceh. Penulis menyelesaikan pendidikan SD, SMP dan SMP di Kota Banda Aceh. Pada awal tahun 2002 menyelesaikan pendidikan Strata 1 di Prodi Agronomi Fak. Pertanian Univ. Syiah Kuala Banda Aceh. Pada tahun 2009 alhamdulilllah berhasil gelar Magister Pertanian di Program Pascasarjana Univ. Lambung Mangkurat Banjarbaru Kalimantan Selatan. Sejak tahun 2003 penulis diangkat sebagai dosen PNS di Program Studi Agronomi (sekarang Agroekoteknologi) Fakultas Pertanian Univ. Malikussaleh sampai sekarang.

Penulis pernah mengajar beberapa mata kuliah seperti Sistem Pertanian Berkelanjutan, Kimia Pertanian, Botani, Biokimia Tanaman, TBT Umbi-umbian dan TBT Tebu dan Serat. Email penulis: zurrahmi.wirda@unimal.ac.id

BIODATA PENULIS



Resti Fajarfika, S.P., M.Sc.

Dosen Program Studi Agroteknologi

Fakultas Pertanian Universitas Garut

Penulis telah menyelesaikan Studi Program Magister, Fitopatologi UMG, Yogyakarta. Sebelumnya telah mengikuti Pendidikan program S1 di UNSOED, Purwokerto dengan jurusan Ilmu Hama dan Penyakit Tanaman. SI. Ia adalah dosen tetap di Program Studi Agroteknologi, Fakultas Pertanian, Universitas Garut. Beberapa buku telah ditulis penulis terkait bidang pertanian yang dapat dijadikan referensi. E-mail: fajarfikaresti@gmail.com.

BIODATA PENULIS



Anwar, S.P., M.P.

Dosen Program Studi Agroteknologi

Fakultas Pertanian Universitas Musamus

Penulis bernama lengkap Anwar, lahir di Desa Lahontohe, Kecamatan Tongkuno, Kabupaten Muna, Sulawesi Tenggara pada 12 September 1992, merupakan dosen Program Studi Agroteknologi, Fakultas Pertanian, Universitas Musamus Merauke. Penulis menyelesaikan pendidikan Sarjana dan Magister di Universitas Halu Oleo Kendari, dengan bidang keahlian hama dan penyakit tumbuhan. Penulis mulai berkarier sebagai dosen pada tahun 2022 samapai sekarang setelah lulus seleksi CPNS tahun 2021.

BIODATA PENULIS



Prof. Dr. Ir. Mieke Rochimi Setiawati, M.P.

Dosen Departemen Ilmu Tanah dan Sumberdaya Lahan

Fakultas Pertanian Universitas Padjadjaran

Penulis dilahirkan di Cirebon (Jawa Barat) pada tanggal 5 Mei 1962. Pendidikan yang telah dilalui penulis di S1 Teknologi Pertanian (1985), S2 Kesuburan Tanah dan Gizi Tanaman (1995), dan S3 Ilmu Pertanian (2004) semuanya diselesaikan di Fakultas Pertanian, Universitas Padjadjaran. Saat ini penulis aktif sebagai dosen di Departemen Ilmu Tanah dan Sumberdaya Lahan (Laboratorium Biologi Tanah) di Fakultas Pertanian Universitas Padjadjaran.

Beberapa matakuliah yang diampu penulis yaitu Mikrobiologi Pertanian, Bioteknologi Pertanian, Dasar Teknologi Produksi Tanaman, Metode Ilmiah dan Pelaporan, Biofertilisasi, Sistem Pertanian Berkelanjutan Organik, Pengantar Agrosains, Kualitas Tanah, Biologi Tanah, Enzim Tanah, Etika dan Integritas Akademik.

Penulis aktif menulis artikel hasil penelitian di jurnal nasional dan internasional. Disamping itu aktif mengikuti seminar yang diselenggarakan di dalam dan luar negeri. Penulis menjadi anggota organisasi keilmuan Himpunan Ilmu

Tanah Indonesia (HITI), Perhimpunan Mikrobiologi Indonesia (PERMI), Asosiasi Mikoriza Indonesia (AMI).

BIODATA PENULIS



Yonce Melyanus Killa, S.P., M.P.

Dosen Program Studi Agroteknologi

Fakultas Sains dan Teknologi

Universitas Kristen Wira Wacana Sumba

Penulis lahir di Padang tanggal 14 Mei 1988. Penulis adalah dosen tetap pada Program Studi Agroteknologi, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Kristen Wira Wacana Sumba. Menyelesaikan pendidikan S1 pada Program Studi Ilmu Hama dan Penyakit Tanaman, Jurusan Budidaya Tanaman Fakultas Pertanian Universitas Nusa Cendana tahun 2011 dan melanjutkan S2 pada Program Studi Magister Agroekoteknologi Fakultas Pertanian dan Bisnis Universitas Kristen Satya Wacana dan lulus pada tahun 2019. Penulis mulai menekuni bidang menulis baru pada 2022 dan buku chapter ini merupakan buku ke enam yang ditulis. Selain itu penulis aktif menulis artikel yang dipublikasikan dan sebagai pemakalah dalam beberapa seminar internasional.

BIODATA PENULIS



Kurniawan Shidiq Sutikno S.T.P., M.T.P.

Dosen Program Studi Sarjana Terapan (Diploma IV) Pengembangan Produk Agroindustri (PPA), Jurusan Teknologi Industri Pertanian, Politeknik Negeri Tanah Laut, Kalimantan Selatan

Penulis lahir di kota Bandar Lampung Provinsi Lampung pada tanggal 13 Maret 1996. Penulis adalah dosen tetap PNS pada Program Studi Sarjana Terapan (Diploma IV) Pengembangan Produk Agroindustri, Jurusan Teknologi Industri Pertanian, Politeknik Negeri Tanah Laut. Setelah lulus SMA pada tahun 2014, penulis menyelesaikan Pendidikan S1 pada Program Studi Teknologi Hasil Pertanian di Fakultas Pertanian Universitas Lampung pada tahun 2018. Kemudian melanjutkan pendidikan pada tahun 2019 di perguruan tinggi yang sama dan berhasil menyelesaikan S2 pada Program Studi Magister Teknologi Industri Pertanian Fakultas Pertanian Universitas Lampung pada tahun 2022.

Penulis mulai bekerja pada September 2019 sebagai Analis Laboratorium dan tim akreditasi ISO 17025 di UPT Laboratorium Terpadu dan Sentra Inovasi Universitas Lampung sampai dengan juni 2025. Selanjutnya pada Juli

2025, penulis diangkat menjadi Calon Pegawai Negeri Sipil (CPNS) dosen Asisten Ahli dan mulai aktif mengajar pada Juli 2025 sebagai dosen tetap pada program studi sarjana terapan (setara S1) atau Diploma IV Pengembangan Produk Agroindustri yang masih di bawah Jurusan Teknologi Industri Pertanian, Politeknik Negeri Tanah Laut hingga saat ini.

BIODATA PENULIS



Dr. Abdul Sahid, S.P., M.P.
Dosen Program Studi Agroekoteknologi
Fakultas Pertanian Universitas Mulawarman

Penulis lahir di Kandangan, Kalimantan Selatan, pada 15 Juni 1969. Saat ini, Penulis merupakan dosen tetap pada Program Studi Agroekoteknologi (minat Proteksi Tanaman), Fakultas Pertanian, Universitas Mulawarman. Pendidikan sarjana (S1) diselesaikan pada tahun 1997 di Jurusan/Program Studi Hama dan Penyakit Tumbuhan, Fakultas Pertanian, Universitas Lambung Mangkurat. Penulis melanjutkan studi magister (S2) pada Jurusan Ilmu-Ilmu Pertanian dengan minat Ilmu Hama Tumbuhan di Fakultas Pertanian, Universitas Gadjah Mada, dan lulus pada tahun 2003. Pendidikan doktor (S3) ditempuh di Jurusan Ilmu-Ilmu Pertanian dengan minat Ilmu Hama Tanaman, Fakultas Pertanian, Universitas Padjadjaran, dan berhasil diselesaikan pada tahun 2018. Selama menjalankan tugas sebagai dosen, Penulis mengampu berbagai mata kuliah yang berkaitan dengan proteksi tanaman, antara lain Entomologi, Pengendalian Hayati, Ilmu Hama Tumbuhan, Vertebrata Hama, serta Hama dan Penyakit Pascapanen, baik pada jenjang S1 maupun S2. Dalam bidang penelitian, Penulis

memiliki ketertarikan utama pada pengendalian hayati dan telah menghasilkan berbagai karya ilmiah yang dipublikasikan di jurnal nasional maupun internasional. Selain itu, Penulis juga aktif dalam kegiatan pengabdian kepada masyarakat melalui pelatihan dan penyuluhan, baik secara mandiri maupun bekerja sama dengan instansi pemerintah daerah. Kegiatan tersebut berfokus pada pengendalian organisme pengganggu tumbuhan (OPT) yang ramah lingkungan, seperti penggunaan pestisida nabati dan *Trichoderma* spp. Penulis juga merupakan anggota Perhimpunan Entomologi Indonesia (PEI) Cabang Kalimantan Timur–Kalimantan Utara serta Perhimpunan Fitopatologi Indonesia (PFI) Cabang Kalimantan Timur.