

BUKU AJAR



EPIDEMIOLOGI PENYAKIT TUMBUHAN



**Pendekatan Kuantitatif untuk
Pengelolaan Penyakit Tanaman
secara Efektif dan Berkelanjutan**



**Konsep Dasar
dan Ruang Lingkup**



**Analisis Kuantitatif
dan Pemodelan**



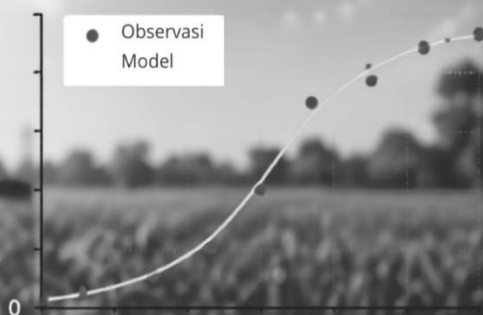
**Pemencaran Patogen
dan Pola Epidemi**



**Prakiraan, Kehilangan Hasil,
dan Pengendalian**



Intensitas Penyakit (X)



Dr. Haliatur Rahma, S.Si., MP.
Selviana Anggraini, SP., MP.

Buku Ajar

EPIDEMIOLOGI PENYAKIT TUMBUHAN

Penulis : Dr. Haliatur Rahmah, S.Si., MP.
Selviana Angraini, S.P., MP.
Editor : Khoirul Ngibad
Desain Cover : Muzammil Akbar
Ilustrasi : Gemini

Ukuran: 15.5 x 23 cm; Hal: xvi + 262 (278)

Cetakan I, Mei 2026

ISBN 978-634-7577-43-6



Penerbit

Insight Mediatama

Anggota IKAPI No. 338/JTI/2022

Watesnegoro No. 4 (61385) Mojokerto

Whatsapp 087762245559

www.insightmediatama.co.id

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

KATA PENGANTAR

Buku ajar ini disusun sebagai bahan pembelajaran untuk mata kuliah Epidemiologi Penyakit Tumbuhan yang dirancang berbasis Outcome-Based Education (OBE). Pendekatan ini menekankan pada pencapaian kemampuan mahasiswa secara nyata, tidak hanya memahami teori, tetapi juga mampu menerapkannya dalam kondisi lapangan. Oleh karena itu, materi dalam buku ini disusun secara sistematis dan mudah dipahami, sehingga dapat digunakan oleh mahasiswa maupun masyarakat yang tertarik pada bidang pertanian.

Epidemiologi Penyakit Tumbuhan merupakan ilmu yang mempelajari bagaimana penyakit berkembang, menyebar, dan memengaruhi tanaman dalam suatu populasi. Dalam buku ini, pembahasan tidak hanya berfokus pada konsep dasar, tetapi juga dilengkapi dengan pendekatan kuantitatif dan contoh aplikasi praktis di lapangan. Hal ini penting karena pengelolaan penyakit tanaman saat ini tidak dapat dilakukan hanya dengan pengalaman, tetapi harus didukung oleh analisis ilmiah yang tepat.

Materi yang disajikan mencakup hubungan antara patogen, inang, dan lingkungan sebagai satu kesatuan sistem yang saling memengaruhi. Dengan memahami interaksi tersebut, mahasiswa diharapkan mampu menganalisis penyebab terjadinya penyakit serta menentukan strategi pengendalian yang efektif dan berkelanjutan. Selain itu, buku ini juga menekankan pentingnya penggunaan teknologi dan data dalam memprediksi perkembangan penyakit.

Buku ajar ini diharapkan dapat menjadi sumber belajar yang bermanfaat, baik bagi mahasiswa, dosen, maupun praktisi pertanian. Penulis menyadari bahwa buku ini masih memiliki keterbatasan, sehingga saran dan masukan sangat diharapkan

untuk penyempurnaan di masa mendatang. Semoga buku ini dapat memberikan kontribusi dalam pengembangan ilmu pengetahuan, khususnya di bidang proteksi tanaman dan pertanian berkelanjutan.

Penulis

PRAKATA

Puji syukur ke hadirat Tuhan Yang Maha Esa, karena atas rahmat dan karunia-Nya buku ajar *Epidemiologi Penyakit Tumbuhan* ini dapat disusun dengan baik. Buku ini disusun sebagai salah satu bahan pembelajaran untuk mendukung proses perkuliahan, khususnya bagi mahasiswa Program Studi Proteksi Tanaman.

Penyusunan buku ini bertujuan untuk memberikan pemahaman yang lebih mudah dan terstruktur mengenai konsep Epidemiologi Penyakit Tumbuhan. Materi dalam buku ini disajikan dengan bahasa yang sederhana agar dapat dipahami tidak hanya oleh mahasiswa, tetapi juga oleh pembaca umum yang memiliki minat di bidang pertanian. Selain itu, isi buku ini juga disesuaikan dengan pendekatan pembelajaran berbasis Outcome-Based Education (OBE), sehingga diharapkan mampu membantu mahasiswa mencapai capaian pembelajaran yang telah ditetapkan.

Dalam buku ini dibahas berbagai topik penting, mulai dari konsep dasar epidemiologi, proses perkembangan penyakit, hingga penerapan model dan strategi pengendalian penyakit tanaman. Penjelasan diberikan secara bertahap, disertai dengan contoh sederhana agar lebih mudah dipahami. Dengan demikian, mahasiswa diharapkan tidak hanya memahami teori, tetapi juga mampu mengaplikasikan pengetahuan tersebut dalam kegiatan praktikum maupun di lapangan.

Penulis menyadari bahwa buku ajar ini masih memiliki kekurangan, baik dari segi isi maupun penyajian. Oleh karena itu, penulis sangat mengharapkan saran dan masukan yang membangun dari berbagai pihak untuk perbaikan di masa yang akan datang. Akhir kata, penulis berharap buku ini dapat memberikan manfaat dan menjadi salah satu sumber belajar yang

membantu meningkatkan pemahaman serta keterampilan mahasiswa dalam bidang Epidemiologi Penyakit Tumbuhan.

DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR.....	iii
PRAKATA.....	v
DAFTAR ISI.....	vii
DAFTAR GAMBAR.....	xi

BAB I

KONSEP DASAR EPIDEMIOLOGI PENYAKIT

TUMBUHAN.....	1
1.1 Pengertian Epidemiologi Penyakit Tumbuhan	1
1.2 Perbedaan Epidemi dan Epidemiologi.....	6
1.3 Sejarah Perkembangan Epidemiologi Penyakit Tumbuhan	11
1.4 Epidemiologi sebagai Sistem.....	15
1.5 Penutup	21
1.6 Ringkasan.....	21
1.7 Soal Evaluasi.....	21
1.8 Praktikum.....	22

BAB 2

PENYAKIT TUMBUHAN SEBAGAI POPULASI

DAN PROSES	23
2.1 Penyakit sebagai Populasi.....	23
2.2 Segitiga Penyakit (<i>Disease Triangle</i>)	27
2.3 Dinamika Epidemi	32
2.4 Integrasi Konsep Populasi dan Proses	36
2.5 Penutup	39
2.6 Ringkasan.....	39
2.7 Soal Evaluasi.....	40
2.8 Praktikum.....	40

BAB 3

ASPEK KUANTITATIF EPIDEMIOLOGI	41
3.1 Insidensi dan Intensitas Penyakit	41
3.2 Laju Perkembangan Penyakit	47
3.3 Analisis Data Epidemi	59
3.4 Integrasi Analisis Kuantitatif dalam Pengelolaan Penyakit.....	64
3.5 Penutup	68
3.6 Ringkasan.....	69
3.7 Soal Evaluasi.....	69
3.8 Praktikum.....	70

BAB 4

PEMODELAN EPIDEMI PENYAKIT	71
4.1 Konsep Model Epidemi	71
4.2 Jenis Model Epidemi.....	76
4.3 Fungsi Model dalam Epidemiologi.....	80
4.4 Integrasi Model dalam Sistem Pertanian Modern..	85
4.5 Tantangan dan Prospek Pemodelan Epidemi.....	90
4.6 Penutup	93
4.7 Ringkasan.....	94
4.8 Soal Evaluasi.....	94
4.9 Praktikum.....	95

BAB 5

EPIDEMI MONOSIKLIK DAN POLISIKLIK	96
5.1 Epidemi Monosiklik.....	96
5.2 Epidemi Polisiklik.....	101
5.3 Perbandingan Epidemi Monosiklik dan Polisiklik	105
5.4 Implikasi dalam Pengelolaan Penyakit	110
5.5 Peran dalam Pertanian Berkelanjutan	113
5.6 Penutup	116
5.7 Ringkasan.....	117

5.8	Soal Evaluasi.....	117
5.9	Praktikum.....	118

BAB 6

PEMENCARAN PATOGEN DAN POLA RUANG..... 119

6.1	Mekanisme Penyebaran Patogen	119
6.2	Pola Ruang Penyakit	125
6.3	Gradien Penyakit.....	129
6.4	Integrasi Pemencaran dan Pola Ruang dalam Epidemiologi Modern	133
6.5	Penutup	136
6.6	Ringkasan.....	137
6.7	Soal Evaluasi.....	137
6.8	Praktikum.....	138

BAB 7

KEHILANGAN HASIL AKIBAT PENYAKIT

TUMBUHAN..... 139

7.1	Konsep Kehilangan Hasil	139
7.2	Hubungan Penyakit dan Produksi.....	145
7.3	Ambang Ekonomi	150
7.4	Sintesis dan Implikasi	155
7.5	Penutup	160
7.6	Ringkasan.....	160
7.7	Soal Evaluasi.....	161
7.8	Praktikum.....	161

BAB 8

PEMODELAN KEHILANGAN HASIL 162

8.1	Model Empiris	162
8.2	Model Simulasi	168
8.3	Aplikasi Model Kehilangan Hasil.....	172
8.4	Tantangan dan Prospek	177

8.5	Penutup	181
8.6	Ringkasan.....	182
8.7	Soal Evaluasi.....	182
8.8	Praktikum.....	183

BAB 9

SIMULASI DAN PRAKIRAAN PENYAKIT..... 184

9.1	Konsep Prakiraan Penyakit	184
9.2	Sistem Peringatan Dini	190
9.3	Aplikasi di Lapangan	194
9.4	Penutup	199
9.5	Ringkasan.....	200
9.6	Soal Evaluasi.....	200
9.7	Praktikum.....	201

BAB 10

EPIDEMIOLOGI DALAM PENGELOLAAN

PENYAKIT..... 202

10.1	Konsep Pengelolaan Penyakit.....	202
10.2	Strategi Pengendalian.....	208
10.3	Integrasi dalam IPM (<i>Integrated Pest Management</i>)	213
10.4	Penutup	218
10.5	Ringkasan.....	219
10.6	Soal Evaluasi.....	219

GLOSARIUM..... 221

DAFTAR PUSTAKA 227

INDEKS 258

PROFIL PENULIS 261

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1.	Konsep sistem Epidemiologi Penyakit Tumbuhan yang menunjukkan bahwa perkembangan penyakit dipengaruhi oleh interaksi antara patogen, tanaman inang, lingkungan, dan waktu dalam suatu agroekosistem.....	3
Gambar 2.1.	Segitiga penyakit yang menunjukkan interaksi antara inang, patogen, dan lingkungan sebagai faktor utama terjadinya penyakit tanaman	27
Gambar 2.2.	Kurva perkembangan penyakit (kurva sigmoid) yang menunjukkan fase awal lambat, fase perkembangan cepat, dan fase stabil dalam suatu epidemi.	34
Gambar 3.1.	Kurva dinamika epidemi penyakit tumbuhan yang menunjukkan perubahan intensitas penyakit seiring waktu, mulai dari fase pra-epidemi, inisiasi, akselerasi, deselerasi, hingga pasca-epidemi.....	42
Gambar 3.2.	Kurva eksponensial perkembangan penyakit tanaman yang menunjukkan peningkatan intensitas penyakit ($X(t)$) secara cepat terhadap waktu (t). Kurva ini menggambarkan fase awal epidemi dimana laju perkembangan penyakit sebanding dengan jumlah penyakit yang telah ada dan belum dipengaruhi oleh faktor pembatas.....	49
Gambar 3.3.	Kurva sigmoid perkembangan penyakit tanaman yang menunjukkan fase awal (lag), fase peningkatan cepat (log), dan	

	fase melambat (stasioner) selama epidemi penyakit.....	54
Gambar 3.4.	Kurva model monomolekuler perkembangan penyakit tanaman yang menunjukkan hubungan antara waktu (t) dan intensitas penyakit (<i>disease incidence</i>).....	57
Gambar 4.1.	Model epidemi penyakit tumbuhan yang menggambarkan berbagai pola perkembangan penyakit, meliputi model monomolekuler, poligomolekuler, sigmoid (logistik), dan Gompertz berdasarkan perubahan intensitas penyakit terhadap waktu.	73
Gambar 5.1.	Perbandingan perkembangan penyakit monosiklik dan polisiklik yang menunjukkan perbedaan jumlah siklus infeksi, pola dinamika epidemi, serta sumber inokulum dalam satu musim tanam.....	97
Gambar 6.1.	Proses penyebaran patogen dalam epidemi penyakit tumbuhan yang mencakup jalur transmisi, tahapan perpindahan inokulum, serta faktor lingkungan dan biotik yang memengaruhi keberhasilan infeksi pada tanaman inang.....	120
Gambar 7.1.	Hubungan antara intensitas penyakit dan hasil tanaman yang menunjukkan bahwa peningkatan tingkat serangan penyakit berbanding terbalik dengan hasil produksi tanaman.....	140

Gambar 8.1.	Model kehilangan hasil (yield loss model) yang menggambarkan hubungan antara intensitas penyakit dan persentase kehilangan hasil, serta digunakan untuk memprediksi dampak penyakit terhadap produksi tanaman.....	163
Gambar 9.1.	Sistem prakiraan penyakit tumbuhan yang menggambarkan alur pengumpulan data, analisis epidemi, penilaian risiko, hingga pengambilan keputusan pengendalian secara tepat waktu dan efektif.	185
Gambar 10.1.	Konsep Integrated Pest Management (IPM) berbasis Epidemiologi Penyakit Tumbuhan yang mengintegrasikan pemantauan penyakit, analisis epidemi, ambang ekonomi, serta berbagai strategi pengendalian secara terpadu untuk menghasilkan pengelolaan penyakit yang efektif, efisien, dan berkelanjutan.....	203

PETA KOMPETENSI

Capaian Pembelajaran Mata Kuliah (CPMK) – Subbab

◆ CPMK 1

Memahami konsep dasar Epidemiologi Penyakit Tumbuhan

— Bab 1: Pendahuluan Epidemiologi Penyakit Tumbuhan

- Pengertian epidemi dan epidemiologi
- Ruang lingkup Epidemiologi Penyakit Tumbuhan
- Peran epidemiologi dalam pertanian modern
- Urgensi pengelolaan penyakit dan ketahanan pangan

— Bab 2: Penyakit Tumbuhan sebagai Populasi dan Proses

- Penyakit sebagai sistem biologis
- Konsep populasi patogen dan inang
- Dinamika penyakit dalam agroekosistem
- Interaksi patogen–inang–lingkungan

◆ CPMK 2

Menganalisis proses epidemi penyakit tumbuhan dan faktor yang memengaruhinya

— Bab 3: Aspek Kuantitatif Epidemiologi Penyakit Tumbuhan

- Insidensi dan intensitas penyakit
- Laju perkembangan penyakit
- Kurva epidemi (sigmoid)
- Analisis data epidemi

— Bab 4: Epidemi Monosiklik dan Polisiklik

- Pengertian epidemi monosiklik
- Pengertian epidemi polisiklik
- Perbandingan karakteristik epidemi
- Faktor yang memengaruhi perkembangan epidemi

◆ CPMK 3

Menggunakan pendekatan kuantitatif dan pemodelan dalam epidemiologi

— Bab 5: Dasar Pemodelan Epidemi Penyakit Tumbuhan

- Konsep dan fungsi model epidemi
- Jenis model epidemi (empiris & mekanistik)
- Interpretasi model epidemi
- Aplikasi model dalam pertanian

— Bab 6: Pemencaran Patogen dan Pola Ruang Penyakit

- Mekanisme penyebaran patogen
- Pola distribusi penyakit (acak, agregat, seragam)
- Gradien penyakit
- Analisis spasial sederhana

◆ CPMK 4

Mengevaluasi kehilangan hasil dan sistem prakiraan penyakit

— Bab 7: Kehilangan Hasil Akibat Penyakit Tumbuhan

- Konsep kehilangan hasil (kuantitas & kualitas)
- Hubungan penyakit dengan hasil tanaman
- Ambang ekonomi
- Dampak ekonomi penyakit

— Bab 8: Pemodelan Kehilangan Hasil

- Model hubungan penyakit–hasil
- Pendekatan kuantitatif kehilangan hasil
- Simulasi kehilangan hasil
- Interpretasi hasil model

└ **Bab 9: Simulasi dan Prakiraan Epidemi Penyakit**

- └ Konsep prakiraan penyakit
- └ Sistem peringatan dini
- └ Pemanfaatan data iklim
- └ Aplikasi prakiraan dalam pengendalian

◆ **CPMK 5**

Merancang strategi pengelolaan penyakit tumbuhan berbasis epidemiologi

|

└ **Bab 10: Epidemiologi dalam Pengelolaan Penyakit**

Tumbuhan

- └ Prinsip pengelolaan penyakit berbasis epidemiologi
- └ Strategi pengendalian penyakit (kultur teknis, biologis, kimia)
- └ Integrasi dalam sistem PHT (Pengendalian Hama Terpadu)
- └ Studi kasus pengendalian penyakit tanaman
- └ Sintesis dan refleksi kompetensi akhir

BAB 1

KONSEP DASAR EPIDEMIOLOGI PENYAKIT TUMBUHAN

Capaian Pembelajaran (CPMK-1)

Mahasiswa mampu menjelaskan konsep dasar dan perkembangan Epidemiologi Penyakit Tumbuhan.

1.1 Pengertian Epidemiologi Penyakit Tumbuhan

Epidemiologi Penyakit Tumbuhan merupakan cabang ilmu dalam bidang proteksi tanaman yang mempelajari bagaimana penyakit berkembang, menyebar, dan memengaruhi populasi tanaman dalam suatu lingkungan tertentu. Ilmu ini tidak hanya berfokus pada satu individu tanaman yang sakit, tetapi melihat penyakit sebagai suatu fenomena yang terjadi dalam skala populasi atau komunitas tanaman. Dengan kata lain, epidemiologi berusaha menjawab pertanyaan penting, seperti bagaimana penyakit muncul, mengapa dapat menyebar, dan faktor apa saja yang memengaruhi tingkat keparahannya dalam suatu sistem pertanian.

Dalam konteks pertanian modern, epidemiologi memiliki peran yang sangat penting karena penyakit tanaman sering kali tidak terjadi secara acak, melainkan mengikuti pola tertentu yang dapat dipelajari dan diprediksi. Penyakit dapat muncul secara perlahan, kemudian berkembang menjadi serangan yang luas apabila kondisi lingkungan mendukung. Oleh karena itu, pemahaman tentang epidemiologi sangat dibutuhkan untuk mengantisipasi dan mengendalikan penyakit sebelum mencapai tingkat yang merugikan secara ekonomi (Savary et al., 2022).

Secara umum, Epidemiologi Penyakit Tumbuhan mencakup tiga aspek utama, yaitu dinamika penyakit, faktor penyebab, dan interaksi dalam sistem agroekosistem. Dinamika

BAB 2

PENYAKIT TUMBUHAN SEBAGAI POPULASI DAN PROSES

CPMK-2

Mahasiswa mampu menganalisis penyakit sebagai proses epidemiologis.

2.1 Penyakit sebagai Populasi

Dalam Epidemiologi Penyakit Tumbuhan, penyakit tidak hanya dilihat sebagai kejadian pada satu tanaman, tetapi sebagai fenomena yang terjadi dalam suatu populasi. Artinya, perhatian utama bukan hanya pada satu individu tanaman yang sakit, tetapi pada bagaimana penyakit berkembang dalam sekelompok tanaman dalam suatu lahan. Pendekatan ini penting karena dalam praktik pertanian, penyakit hampir selalu menyerang banyak tanaman sekaligus, bukan hanya satu tanaman saja.

Konsep penyakit sebagai populasi membantu kita memahami bahwa setiap tanaman dalam suatu lahan memiliki kemungkinan berbeda untuk terserang penyakit. Ada tanaman yang sehat, ada yang mulai terinfeksi, dan ada yang sudah parah. Semua kondisi ini membentuk suatu populasi penyakit yang dinamis dan terus berubah dari waktu ke waktu (Milus & Kristensen, 2022).

Populasi Inang

Populasi inang adalah kumpulan tanaman yang berpotensi diserang oleh patogen. Dalam satu lahan, tanaman tidak selalu memiliki tingkat ketahanan yang sama. Beberapa tanaman mungkin lebih tahan terhadap penyakit, sementara yang lain lebih rentan. Variasi ini sangat memengaruhi bagaimana penyakit berkembang dalam suatu populasi.

BAB 3

ASPEK KUANTITATIF EPIDEMIOLOGI

CPMK-2

Mahasiswa mampu menganalisis penyakit sebagai proses epidemiologis.

3.1 Insidensi dan Intensitas Penyakit

Perkembangan penyakit pada tanaman tidak terjadi secara tiba-tiba, melainkan melalui tahapan yang berlangsung secara bertahap dan dinamis. Setiap fase perkembangan menunjukkan perubahan tingkat intensitas penyakit yang dipengaruhi oleh interaksi kompleks antara patogen, tanaman inang, dan kondisi lingkungan. Pada tahap awal, infeksi biasanya masih rendah dan sering tidak terdeteksi, kemudian berkembang seiring meningkatnya populasi patogen serta kondisi lingkungan yang mendukung. Oleh karena itu, pemahaman terhadap proses ini menjadi sangat penting agar peneliti maupun praktisi dapat mengidentifikasi fase kritis dalam perkembangan penyakit.

Pemahaman terhadap dinamika perkembangan penyakit juga berperan penting dalam menentukan waktu yang tepat untuk melakukan pengamatan dan tindakan pengendalian. Dengan memanfaatkan konsep kurva epidemi, perubahan intensitas penyakit dapat dianalisis secara sistematis berdasarkan waktu, sehingga memungkinkan pengambilan keputusan yang lebih tepat dan efisien. Kurva ini menggambarkan bagaimana penyakit berkembang dari fase awal, fase peningkatan cepat, hingga mencapai puncak dan akhirnya menurun. Interaksi dan tahapan perkembangan penyakit tersebut disajikan secara lebih jelas pada Gambar 3.1.

BAB 4

PEMODELAN EPIDEMI PENYAKIT

CPMK-3

Mahasiswa mampu menganalisis dan menerapkan model epidemi penyakit tumbuhan dalam pengambilan keputusan.

4.1 Konsep Model Epidemi

Pemodelan epidemi penyakit tumbuhan merupakan salah satu pendekatan penting dalam memahami dan mengelola penyakit tanaman secara ilmiah. Dalam epidemiologi, model diartikan sebagai representasi sederhana dari suatu sistem yang kompleks. Sistem ini melibatkan interaksi antara patogen, tanaman inang, dan lingkungan yang saling memengaruhi. Karena hubungan antar komponen tersebut sangat kompleks, model digunakan untuk menyederhanakan kondisi nyata agar lebih mudah dipahami, dianalisis, dan diprediksi.

Dalam praktiknya, penyakit tanaman tidak hanya dipengaruhi oleh satu faktor saja, tetapi merupakan hasil dari interaksi berbagai faktor dalam suatu sistem. Misalnya, keberadaan patogen saja tidak cukup untuk menyebabkan penyakit jika kondisi lingkungan tidak mendukung atau tanaman memiliki ketahanan tinggi. Oleh karena itu, pemodelan menjadi penting untuk menggambarkan interaksi tersebut dalam bentuk yang lebih terstruktur dan sistematis (Lannou, 2023).

Model epidemi digunakan untuk menjawab berbagai pertanyaan penting dalam Epidemiologi Penyakit Tumbuhan. Pertanyaan tersebut meliputi bagaimana penyakit berkembang, seberapa cepat penyebarannya, serta kapan tindakan pengendalian harus dilakukan. Dengan menggunakan model, data yang kompleks dapat diubah menjadi informasi yang lebih

BAB 5

EPIDEMI MONOSIKLIK DAN POLISIKLIK

CPMK-2

Mahasiswa mampu menganalisis penyakit sebagai proses epidemiologis berdasarkan tipe siklus infeksi.

5.1 Epidemi Monosiklik

keparahan, tetapi juga oleh jumlah siklus infeksi yang terjadi selama satu musim tanam. Berdasarkan karakter tersebut, penyakit dibedakan menjadi penyakit monosiklik dan polisiklik. Penyakit monosiklik umumnya hanya mengalami satu kali siklus infeksi dalam satu musim tanam, sehingga perkembangan penyakitnya cenderung lebih lambat dan sangat bergantung pada jumlah inokulum awal. Sebaliknya, penyakit polisiklik dapat mengalami beberapa siklus infeksi dalam satu musim, sehingga mampu berkembang dengan cepat karena adanya infeksi sekunder yang terus berulang.

Perbedaan mendasar antara kedua tipe penyakit ini terletak pada sumber inokulum, kecepatan perkembangan, serta pola dinamika epidemi yang dihasilkan. Penyakit monosiklik biasanya berasal dari inokulum primer yang terbatas, sehingga kurva perkembangan penyakitnya relatif landai. Sementara itu, penyakit polisiklik memiliki kemampuan menghasilkan inokulum sekunder dalam jumlah besar, yang menyebabkan peningkatan intensitas penyakit secara eksponensial. Oleh karena itu, pemahaman terhadap perbedaan ini sangat penting untuk memprediksi perkembangan penyakit serta menentukan strategi pengendalian yang efektif, sebagaimana diilustrasikan secara lebih jelas pada Gambar 5.1.

BAB 6

PEMENCARAN PATOGEN DAN POLA RUANG

CPMK-3

Mahasiswa mampu menganalisis mekanisme pemencaran patogen, pola distribusi penyakit dalam ruang, serta gradien penyakit untuk mendukung pengambilan keputusan dalam pengelolaan penyakit tanaman berbasis epidemiologi.

6.1 Mekanisme Penyebaran Patogen

Penyebaran patogen merupakan salah satu proses kunci dalam terjadinya epidemi penyakit tumbuhan. Setelah patogen terbentuk dan dilepaskan dari sumber inokulum, keberhasilannya dalam mencapai tanaman inang sangat ditentukan oleh berbagai mekanisme penyebaran. Patogen dapat berpindah melalui perantara lingkungan seperti angin dan air, melalui vektor biologis seperti serangga, maupun akibat aktivitas manusia dalam sistem budidaya, misalnya melalui alat pertanian, benih, atau bahan tanam yang terkontaminasi.

Proses penyebaran ini berlangsung melalui beberapa tahapan yang saling berkaitan, mulai dari pelepasan inokulum, transportasi, hingga deposisi pada permukaan inang yang sesuai. Setiap tahapan sangat dipengaruhi oleh kondisi lingkungan seperti suhu, kelembapan, dan arah angin, serta karakteristik patogen itu sendiri, termasuk ukuran, bentuk, dan kemampuan bertahan hidup. Pemahaman terhadap mekanisme ini sangat penting dalam mengidentifikasi titik kritis pengendalian penyakit, sebagaimana disajikan secara lebih jelas pada Gambar 6.1.

BAB 7

KEHILANGAN HASIL AKIBAT PENYAKIT TUMBUHAN

Capaian Pembelajaran (CPMK-4)

Mahasiswa mampu mengevaluasi kehilangan hasil akibat penyakit tumbuhan serta menentukan ambang ekonomi sebagai dasar pengambilan keputusan dalam pengendalian penyakit secara efektif dan berkelanjutan.

7.1 Konsep Kehilangan Hasil

Dalam epidemiologi penyakit tumbuhan, keberadaan penyakit tidak hanya berdampak pada kondisi fisiologis tanaman, tetapi juga berpengaruh langsung terhadap penurunan hasil produksi. Hubungan antara intensitas penyakit dan hasil tanaman bersifat dinamis, di mana peningkatan tingkat serangan penyakit umumnya diikuti oleh penurunan hasil panen. Hal ini terjadi karena patogen mengganggu proses fisiologis penting seperti fotosintesis, respirasi, dan penyerapan nutrisi, sehingga kemampuan tanaman dalam menghasilkan biomassa dan produk panen menjadi menurun.

Pemahaman terhadap hubungan antara intensitas penyakit dan hasil tanaman sangat penting dalam praktik budidaya, khususnya untuk menentukan ambang ekonomi dan memperkirakan potensi kerugian hasil. Dengan mengetahui tingkat serangan yang masih dapat ditoleransi sebelum menyebabkan kerugian signifikan, petani dapat merumuskan strategi pengendalian yang lebih efisien dan berkelanjutan. Oleh karena itu, analisis hubungan ini menjadi dasar penting dalam pengambilan keputusan pengendalian penyakit, sebagaimana disajikan secara lebih jelas pada Gambar 7.1.

BAB 8

PEMODELAN KEHILANGAN HASIL

CPMK-4

Mahasiswa mampu menganalisis dan menerapkan model kehilangan hasil akibat penyakit tanaman berbasis data empiris dan simulasi sebagai dasar pengambilan keputusan pengendalian penyakit.

8.1 Model Empiris

Dalam epidemiologi penyakit tumbuhan, analisis dampak penyakit tidak hanya berhenti pada pengamatan intensitas serangan, tetapi juga pada seberapa besar pengaruhnya terhadap penurunan hasil produksi. Oleh karena itu, diperlukan pendekatan kuantitatif yang mampu menggambarkan hubungan antara tingkat serangan penyakit dengan kehilangan hasil yang ditimbulkan. Pendekatan ini memungkinkan peneliti dan praktisi pertanian untuk memahami secara lebih objektif sejauh mana penyakit memengaruhi produktivitas tanaman.

Model kehilangan hasil digunakan untuk memprediksi besarnya penurunan hasil berdasarkan intensitas penyakit yang terjadi di lapangan. Dengan memanfaatkan model ini, keputusan pengendalian dapat dilakukan secara lebih tepat, efisien, dan berbasis data, terutama dalam menentukan waktu dan tingkat intervensi yang diperlukan. Selain itu, model ini juga berperan penting dalam analisis ambang ekonomi serta perencanaan strategi pengelolaan penyakit yang berkelanjutan, sebagaimana disajikan secara lebih jelas pada Gambar 8.1.

BAB 9

SIMULASI DAN PRAKIRAAN PENYAKIT

CPMK-4

Mahasiswa mampu menganalisis dan menerapkan konsep simulasi serta prakiraan penyakit tanaman berbasis data lingkungan sebagai dasar pengambilan keputusan pengendalian yang efektif dan berkelanjutan.

9.1 Konsep Prakiraan Penyakit

Dalam pengelolaan penyakit tumbuhan modern, pendekatan yang bersifat reaktif mulai ditinggalkan dan digantikan dengan pendekatan prediktif yang lebih efisien. Sistem prakiraan penyakit (disease forecasting) dikembangkan untuk memprediksi kemungkinan terjadinya dan perkembangan penyakit berdasarkan berbagai parameter penting, seperti kondisi lingkungan, keberadaan inokulum, serta tingkat kerentanan tanaman inang. Pendekatan ini memungkinkan petani dan praktisi pertanian untuk tidak hanya merespons serangan penyakit, tetapi juga mengantisipasinya sejak dini.

Dengan memanfaatkan data dan model epidemiologi, sistem prakiraan penyakit memungkinkan tindakan pengendalian dilakukan secara lebih tepat waktu sebelum penyakit mencapai tingkat yang merugikan. Hal ini tidak hanya meningkatkan efektivitas pengendalian, tetapi juga dapat mengurangi penggunaan pestisida secara berlebihan sehingga lebih ramah lingkungan dan ekonomis. Oleh karena itu, sistem ini menjadi komponen penting dalam pengelolaan penyakit terpadu, sebagaimana konsep dan alurnya disajikan secara lebih jelas pada Gambar 9.1.

BAB 10

EPIDEMIOLOGI DALAM PENGELOLAAN PENYAKIT

CPMK-5

Mahasiswa mampu menganalisis dan menerapkan konsep epidemiologi dalam pengelolaan penyakit tanaman secara terpadu dan berkelanjutan.

10.1 Konsep Pengelolaan Penyakit

Pengendalian penyakit tumbuhan yang efektif memerlukan pendekatan yang tidak hanya bersifat reaktif, tetapi juga berbasis pada pemahaman dinamika epidemi penyakit. Dalam konteks ini, konsep *Integrated Pest Management* (IPM) berbasis epidemiologi menekankan pentingnya pengambilan keputusan yang didasarkan pada data hasil pemantauan lapangan, analisis risiko penyakit, serta pertimbangan ambang ekonomi. Pendekatan ini memungkinkan pengelolaan penyakit dilakukan secara lebih rasional dan terencana, sehingga tidak hanya berfokus pada pengendalian saat terjadi serangan, tetapi juga pada upaya pencegahan sejak dini.

Melalui integrasi berbagai metode pengendalian, seperti penggunaan varietas tahan, pengelolaan lingkungan, teknik budidaya yang tepat, pengendalian hayati, serta penggunaan pestisida secara bijak, IPM berbasis epidemiologi mampu meningkatkan efektivitas dan efisiensi pengendalian penyakit. Pendekatan ini juga mendukung prinsip keberlanjutan dengan meminimalkan dampak negatif terhadap lingkungan dan kesehatan manusia. Oleh karena itu, penerapan IPM menjadi strategi penting dalam sistem pertanian modern, sebagaimana konsepnya disajikan secara lebih jelas pada Gambar 10.1.

GLOSARIUM

A

Agroekosistem

Sistem ekologi dalam pertanian yang melibatkan interaksi antara tanaman, patogen, manusia, dan lingkungan.

Ambang Ekonomi (Economic Threshold)

Tingkat serangan penyakit di mana tindakan pengendalian mulai memberikan keuntungan ekonomi.

Analisis Epidemi

Proses pengolahan data penyakit untuk memahami pola dan faktor penyebab epidemi.

Analisis Kehilangan Hasil

Pendekatan kuantitatif untuk mengukur dampak penyakit terhadap produksi.

B

Biopestisida

Agen pengendali penyakit berbasis organisme hidup atau senyawa alami.

Biokontrol (Pengendalian Hayati)

Pengendalian penyakit menggunakan organisme antagonis untuk menekan patogen.

C

Curah Hujan

Jumlah presipitasi yang memengaruhi kelembaban dan penyebaran patogen.

D

Dinamika Epidemi

Perubahan perkembangan penyakit dalam populasi tanaman sepanjang waktu.

Distribusi Penyakit

Pola penyebaran penyakit dalam ruang (acak, agregat, seragam).

Disease Forecasting (Prakiraan Penyakit)

Sistem prediksi perkembangan penyakit berdasarkan data lingkungan dan epidemi.

E

Epidemi

Peningkatan kejadian penyakit dalam populasi tanaman secara signifikan.

Epidemiologi

Ilmu yang mempelajari pola, penyebab, dan dinamika penyakit tanaman dalam populasi.

Epidemi Monosiklik

Epidemi dengan satu siklus infeksi dalam satu musim tanam.

Epidemi Polisiklik

Epidemi dengan banyak siklus infeksi dalam satu musim tanam.

F

Faktor Biotik

Faktor hidup seperti patogen, inang, dan organisme lain yang memengaruhi penyakit.

Faktor Abiotik

Faktor lingkungan non-hidup seperti suhu, cahaya, dan kelembaban.

G

Gradien Penyakit

Perubahan tingkat penyakit berdasarkan jarak dari sumber infeksi.

H

Host (Inang)

Tanaman yang menjadi tempat berkembangnya patogen.

I

Infeksi

Masuk dan berkembangnya patogen dalam jaringan tanaman.

Insidensi Penyakit

Persentase tanaman yang terserang penyakit dalam suatu populasi.

Intensitas Penyakit

Tingkat keparahan kerusakan akibat penyakit pada tanaman.

Inokulum

Unit patogen yang dapat menyebabkan infeksi.

K

Kehilangan Hasil (Yield Loss)

Penurunan produksi akibat serangan penyakit, baik kuantitas maupun kualitas.

Ketahanan Tanaman

Kemampuan tanaman untuk menahan atau mengurangi serangan patogen.

Kurva Epidemi (Sigmoid Curve)

Grafik perkembangan penyakit berbentuk S yang terdiri dari fase awal, eksponensial, dan stabil.

Kurva Kehilangan Hasil

Hubungan antara tingkat penyakit dan penurunan hasil tanaman.

L

Laju Perkembangan Penyakit

Kecepatan peningkatan penyakit dalam suatu populasi tanaman.

M

Model Epidemi

Representasi matematis perkembangan penyakit dalam suatu populasi.

Model Eksponensial

Model pertumbuhan penyakit yang meningkat sangat cepat.

Model Logistik

Model pertumbuhan penyakit berbentuk sigmoid.

Model Monomolekuler

Model pertumbuhan penyakit lambat dengan satu siklus infeksi.

P

Patogen

Organisme penyebab penyakit (jamur, bakteri, virus, nematoda).

Pemencaran Patogen (Dispersal)

Perpindahan patogen dari satu lokasi ke lokasi lain.

Pemodelan Epidemiologi

Penggunaan model matematika untuk menganalisis dan memprediksi penyakit.

Pengendalian Hama Terpadu (PHT/IPM)

Pendekatan pengelolaan penyakit yang mengintegrasikan berbagai metode pengendalian.

Populasi Inang

Sekelompok tanaman yang berpotensi terserang penyakit.

Populasi Patogen

Jumlah dan keragaman patogen dalam suatu lingkungan.

Prakiraan Penyakit (Forecasting System)

Sistem peringatan dini berbasis data cuaca dan epidemi.

R

Resistensi

Kemampuan genetik tanaman untuk melawan patogen.

S

Segitiga Penyakit (Disease Triangle)

Konsep yang menyatakan bahwa penyakit terjadi karena interaksi antara inang, patogen, dan lingkungan.

Sistem Epidemiologi

Pendekatan yang melihat penyakit sebagai bagian dari sistem kompleks.

Simulasi Epidemi

Penggunaan model untuk memprediksi perkembangan penyakit di masa depan.

Sistem Peringatan Dini

Teknologi yang digunakan untuk mendeteksi potensi epidemi sebelum terjadi.

Strategi Pengendalian

Pendekatan untuk menekan penyakit, meliputi metode kultur teknis, biologis, dan kimia.

T

Transmisi Patogen

Proses perpindahan patogen antar tanaman.

Tingkat Serangan Penyakit

Ukuran umum yang mencakup insidensi dan intensitas penyakit.

Tekanan Penyakit (Disease Pressure)

Tingkat risiko penyakit dalam suatu lingkungan berdasarkan kondisi patogen dan lingkungan.

V

Virulensi

Kemampuan patogen dalam menyebabkan penyakit.

W

Waktu Epidemi

Dimensi waktu dalam perkembangan penyakit dari awal infeksi hingga epidemi.

DAFTAR PUSTAKA

- Abdullah, M., Rahman, M. A., & Islam, M. S. (2021). Predictive modeling for crop disease management using data-driven approaches. *Computers and Electronics in Agriculture*, 182, 106017. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2021.106017>
- Aggarwal, P. K., Jarvis, A., & Campbell, B. M. (2022). Data challenges in agricultural modeling under climate variability. *Agricultural Systems*, 201, 103459. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2022.103459>
- Agrios, G. N. (2005). *Plant Pathology* (5th ed.). Elsevier Academic Press.
- Aguayo, J., & Elegbede, F. (2021). Impact of climate variables on plant disease development. *Plant Pathology*, 70(5), 987–999. <https://doi.org/10.1111/ppa.13312>
- Aloyce, A. P., Ndakidemi, P. A., & Mbega, E. R. (2024). Agricultural practices and plant disease dynamics under climate change. *Agronomy*, 14, 210.
- Alzubaidi, L., Zhang, J., & Humaidi, A. J. (2023). Review of machine learning algorithms for plant disease detection. *Journal of King Saud University - Computer and Information Sciences*, 35(4), 1523–1537. <https://doi.org/10.1016/j.jksuci.2022.01.002>
- Anderson, P. K. (2022). Emerging plant diseases and global trade. *Annual Review of Phytopathology*, 60, 123–145.
- Anggraini, S., Murtini, S., Vajry, I., Khairunnisa, P., & Ansiska, P. (2025). Biokonversi limbah pertanian menjadi biopestisida rizobakteri antifungal. *Jurnal Agroqua*, 23(2), 248–262.
- Antle, J. M., & Jones, J. W. (2021). Economic and environmental benefits of digital agriculture. *Agricultural Systems*, 190, 103132. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2021.103132>
- Aubertot, J.-N., & Barbottin, A. (2022). Integrated crop protection modeling. *Agronomy for Sustainable Development*, 42, 65. <https://doi.org/10.1007/s13593-022-00789-4>
- Avelino, J., Willocquet, L., & Savary, S. (2021). The impact of

- plant diseases on global food security. *Plant Disease*, 105(1), 7–16. <https://doi.org/10.1094/PDIS-03-20-0527-FE>
- Ayaz, M., Ammad-Uddin, M., & Sharif, Z. (2022). IoT applications in smart agriculture. *IEEE Access*, 10, 12345–12360. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3145678>
- Aylor, D. E. (2021). Spread of plant disease on a continental scale: Role of aerial dispersal. *Annual Review of Phytopathology*, 59, 1–22.
- Aylor, W. E., & Isard, S. A. (2023). Atmospheric transport of plant pathogens. *Phytopathology*, 113, 567–580. <https://doi.org/10.1094/PHYTO-05-22-0195-RVW>
- Bai, X., Zhang, Q., & Liu, Y. (2024). Big data analytics for precision agriculture. *Computers and Electronics in Agriculture*, 213, 108178. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2024.108178>
- Bailey, B. A., Bae, H. S., & Strem, M. D. (2023). Biological control of soilborne plant pathogens. *Biological Control*, 176, 105058.
- Bakker, P. A. H. M., & Berendsen, R. L. (2021). Forecasting plant diseases for improved crop management. *Trends in Plant Science*, 26(6), 547–559. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2021.02.004>
- Banerjee, S., Carlin, B. P., & Gelfand, A. E. (2023). Hierarchical Modeling and Analysis for Spatial Data. *Journal of Agricultural, Biological and Environmental Statistics*, 28, 1–15. <https://doi.org/10.1007/s13253-023-00512-4>
- Barbedo, J. G. A. (2021). Impact of plant diseases on crop quality. *Sensors*, 21, 1234. <https://doi.org/10.3390/s21041234>
- Bashi, Z., Karimi, K., & Mohammadi, R. (2022). Machine learning approaches in crop disease prediction. *Artificial Intelligence in Agriculture*, 6, 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.aiia.2021.12.001>
- Basso, B., & Antle, J. (2020). Digital agriculture to design sustainable agricultural systems. *Nature Sustainability*, 3, 254–256. <https://doi.org/10.1038/s41893-020-0510-0>
- Bastiaans, L., Kropff, M. J., & Teng, P. S. (2021). Crop loss due to plant disease: a systems approach. *European Journal of*

- Agronomy*, 123, 126200.
<https://doi.org/10.1016/j.eja.2020.126200>
- Bebber, D. P. (2021). Global distribution shifts of crop pests. *Nature Climate Change*, 11, 123–129.
<https://doi.org/10.1038/s41558-020-00954-y>
- Bebber, D. P. (2022). Range-expanding pests and pathogens in a warming world. *Annual Review of Phytopathology*, 60, 19–38. <https://doi.org/10.1146/annurev-phyto-080417-045954>
- Bebber, D. P. (2023). Spatial and temporal patterns of plant disease. *Global Ecology and Biogeography*, 32, 145–158.
- Bebber, D. P., & Chaloner, T. M. (2024). Global patterns of plant disease emergence. *New Phytologist*, 241, 1–10.
<https://doi.org/10.1111/nph.19345>
- Bebber, D. P., & Gurr, G. M. (2020). Global plant disease dynamics under climate change. *Nature Climate Change*, 10, 800–804. <https://doi.org/10.1038/s41558-020-0837-9>
- Bebber, D. P., & Gurr, G. M. (2023). Climate change and plant disease spread. *Current Opinion in Plant Biology*, 70, 102312. <https://doi.org/10.1016/j.pbi.2022.102312>
- Bebber, D. P., & Gurr, S. J. (2022). Crop-destroying fungal and oomycete pathogens challenge food security. *Fungal Ecology*, 56, 101123.
- Bebber, D. P., Ramotowski, M. A. T., & Gurr, G. M. (2019). Climate change and crop pests and pathogens: impacts and management. *Global Change Biology*, 25(12), 3850–3861.
<https://doi.org/10.1111/gcb.14791>
- Beckerman, J., & Sundin, G. W. (2022). Evaluating disease control strategies using modeling approaches. *Plant Disease*, 106(6), 1500–1512. <https://doi.org/10.1094/PDIS-09-21-1900-FE>
- Bendre, M. R., & Thool, R. C. (2021). Decision support systems in precision agriculture. *Computers and Electronics in Agriculture*, 178, 105786.
<https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105786>
- Bentley, J. W., & Boa, E. (2021). Farmer participation in pest management. *Agronomy for Sustainable Development*, 41, 57. <https://doi.org/10.1007/s13593-021-00699-0>
- Birner, R., & Daum, T. (2021). Digital divide in agriculture.

- World Development*, 145, 105477.
<https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2021.105477>
- Bock, C. H., & Barbedo, J. G. A. (2021). Plant disease severity estimation and yield loss. *Plant Disease*, 105(4), 1159–1171. <https://doi.org/10.1094/PDIS-07-20-1576-RE>
- Bock, C. H., & Nutter, F. W. (2022). Disease assessment and spatial analysis. *Plant Disease*, 106, 1–10. <https://doi.org/10.1094/PDIS-03-21-0587-RE>
- Bock, C. H., Pethybridge, S. J., Barbedo, J. G. A., Esker, P. D., Mahlein, A.-K., & Del Ponte, E. M. (2022). Plant disease severity estimation and modeling. *Phytopathology*, 112, 1–16.
- Bockus, W. W., & Bowden, R. L. (2022). Impact of infection timing on yield loss in cereals. *Plant Disease*, 106(3), 789–798. <https://doi.org/10.1094/PDIS-05-21-0987-RE>
- Bongiovanni, R., & Lowenberg-Deboer, J. (2022). Precision agriculture and sustainability: a review. *Agricultural Systems*, 178, 102737. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2019.102737>
- Borrelli, V. M. G., Brambilla, V., & Rogowsky, P. (2022). The CRISPR/Cas system for crop improvement. *Plant Biotechnology Journal*, 20, 2046–2060. <https://doi.org/10.1111/pbi.13845>
- Bosque-Pérez, M., & Eigenbrode, S. D. (2022). Insect vectors and plant disease dynamics. *Plant Pathology*, 71, 1500–1512. <https://doi.org/10.1111/ppa.13598>
- Bove, F., & Rossi, V. (2023). Understanding plant disease dynamics and yield loss. *Plant Pathology*, 72(4), 789–802. <https://doi.org/10.1111/ppa.13620>
- Bronson, K., & Knezevic, I. (2021). Big data in agriculture: Opportunities and challenges. *Journal of Rural Studies*, 79, 19–28. <https://doi.org/10.1016/j.jrurstud.2020.08.001>
- Brown, J. K. M., & Hovmöller, M. S. (2023). Aerial dispersal and spread of plant pathogens. *Annual Review of Phytopathology*, 61, 123–145.
- Brown, J. K. M., & Tellier, A. (2022). Plant-parasite coevolution. *Annual Review of Phytopathology*, 60, 1–24.
- Burdon, J. J., & Thrall, P. H. (2022). Spatial epidemiology in

- plant disease systems. *Annual Review of Phytopathology*, 60, 1–22.
- Burdon, J. J., & Zhan, J. (2021a). Climate change and disease in plant populations. *Annual Review of Phytopathology*, 59, 89–110. <https://doi.org/10.1146/annurev-phyto-020620-100242>
- Burdon, J. J., & Zhan, J. (2021b). Climate change and plant disease. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, 376, 20200364.
- Burdon, J. J., & Zhan, J. (2021c). Host-pathogen coevolution and disease dynamics. *New Phytologist*, 229(2), 648–656. <https://doi.org/10.1111/nph.16965>
- Campbell, C. L., & Madden, L. V. (1990). *Introduction to Plant Disease Epidemiology*. Wiley.
- Campbell, C. L., & Madden, L. V. (2022). *Introduction to Plant Disease Epidemiology*. Wiley.
- Campos-Taberner, M., García-Haro, F. J., & Camps-Valls, G. (2022). Satellite data for crop monitoring and yield prediction. *Remote Sensing of Environment*, 269, 112789. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2021.112789>
- Carisse, O., & der Heyden, H. (2023). A review of weather-based plant disease prediction models. *Plant Disease*, 107, 1–15.
- Carvalho, D., Costa, R., & Oliveira, P. (2021). Economic thresholds in plant disease management. *Crop Protection*, 145, 105612. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2021.105612>
- Carvalho, R., & Mendes, J. (2022). Cloud-based agriculture systems. *Computers and Electronics in Agriculture*, 196, 106901. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2022.106901>
- Chakraborty, S., & Newton, A. C. (2021). Artificial intelligence in plant disease management. *Plant Pathology*, 70(1), 1–14. <https://doi.org/10.1111/ppa.13273>
- Chakraborty, S., & Newton, A. C. (2022). Climate change, plant diseases and food security. *Plant Pathology*, 71, 1–12.
- Chakraborty, S., Newton, S., & Chakraborty, M. (2022). Climate change and plant disease epidemiology. *Annual Review of Phytopathology*, 60, 399–420. <https://doi.org/10.1146/annurev-phyto-021021-045807>

- Chaloner, T. M. (2022). Interactions between pathogens, hosts and environment. *Phytopathology*, 112, 567–578.
- Chaloner, T. M., & Gurr, S. J. (2024). Climate-driven plant disease dynamics. *Nature Reviews Microbiology*, 22, 101–115.
- Chaloner, T. M., Gurr, S. J., & Bebber, D. P. (2021). Plant pathogen infection risk tracks global crop yields under climate change. *Nature Climate Change*, 11(8), 710–715. <https://doi.org/10.1038/s41558-021-01087-8>
- Chaloner, T. M., Gurr, S. J., & Bebber, D. P. (2023). Climate change and plant disease dynamics. *Annual Review of Phytopathology*, 61, 45–66.
- Chapman, J. W., & Lim, J. (2024). Windborne spread of crop pathogens. *Nature Reviews Microbiology*, 22, 45–60. <https://doi.org/10.1038/s41579-023-00912-3>
- Chatterjee, S., Dutta, A., & Das, S. (2023). Economic thresholds for sustainable crop protection. *Crop Protection*, 165, 106123. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2022.106123>
- Chaudhary, P., & Sharma, S. (2023). Plant compensation mechanisms under biotic stress. *Plants*, 12(3), 512. <https://doi.org/10.3390/plants12030512>
- Chiang, K.-S., Liu, H.-I., & Bock, C. H. (2023). Disease severity assessment and standard area diagrams. *Plant Pathology*, 72, 145–158.
- Choudhury, U., Pradhan, B., & Singh, S. (2021). Integrating weather data into crop disease prediction models. *Environmental Modelling & Software*, 140, 105043. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2021.105043>
- Compant, S., Samad, A., Faist, H., & Sessitsch, A. (2021). A review on the plant microbiome: Ecology, functions, and emerging trends. *Microorganisms*, 9(2), 1–28. <https://doi.org/10.3390/microorganisms9020178>
- Cook, R. J. (2023). *Management of Soilborne Plant Pathogens*. APS Press.
- Cousseau, G., Pilet-Nayel, M.-L., & Halkett, F. (2022). Spatial dynamics of plant pathogens in agroecosystems. *Plant Pathology*, 71, 1234–1248. <https://doi.org/10.1111/ppa.13567>

- Crane-Droesch, A. (2023). Machine learning for agricultural systems. *Nature Machine Intelligence*, 5, 123–130. <https://doi.org/10.1038/s42256-023-00678-9>
- Cressie, N., & Wikle, C. K. (2022). Statistics for Spatio-Temporal Data. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Computational Statistics*, 14, e1544. <https://doi.org/10.1002/wics.1544>
- Crossa, J., Pérez-Rodríguez, P., & Cuevas, J. (2021). Genomic selection in plant breeding. *Nature Reviews Genetics*, 22, 639–655. <https://doi.org/10.1038/s41576-021-00380-1>
- Cunniffe, N. J., & Gilligan, C. A. (2020). Epidemiological modeling in plant disease management. *Annual Review of Phytopathology*, 58, 319–342. <https://doi.org/10.1146/annurev-phyto-010820-012326>
- Cunniffe, N. J., & Gilligan, C. A. (2021). Epidemiological modelling of plant diseases. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, 376, 20200394. <https://doi.org/10.1098/rstb.2020.0394>
- Cunniffe, N. J., & Gilligan, C. A. (2023). Modeling and inference for plant disease dynamics. *Phytopathology*, 113, 1–14.
- Cunniffe, N. J., & Gilligan, C. A. (2024). Mechanistic models for plant disease epidemics. *Annual Review of Phytopathology*, 62, 45–70.
- Cunniffe, N. J., & Koskella, B. (2021). Modelling plant disease dynamics under uncertainty. *Annual Review of Phytopathology*, 59, 343–363. <https://doi.org/10.1146/annurev-phyto-020620-095919>
- Cunniffe, N. J., Koskella, B., & E. Gilligan, C. A. (2021). Epidemiological modeling of plant diseases. *Annual Review of Phytopathology*, 59, 79–100.
- Cunniffe, N. J., Koskella, B., & Gilligan, C. A. (2022). Epidemiological frameworks for plant disease dynamics. *Annual Review of Phytopathology*, 60, 21–45.
- Dammer, K.-H., Ehlert, D., & Giebel, A. (2022). Sensor-based disease detection and prediction in agriculture. *Computers and Electronics in Agriculture*, 196, 106876.
- Damos, P. (2023). Weather-based models in plant disease

- epidemiology. *Agronomy*, 13, 1452.
- Damos, P., & Savopoulou-Soultani, M. (2022). Weather-based pest and disease forecasting systems. *Agronomy*, 12(3), 623. <https://doi.org/10.3390/agronomy12030623>
- Dara, S. K. (2021a). Integrated pest management in the modern era. *Journal of Integrated Pest Management*, 12, 1–10.
- Dara, S. K. (2021b). Sustainable pest management strategies. *Agriculture*, 11(12), 1204. <https://doi.org/10.3390/agriculture11121204>
- Dean, R., Van Kan, J. A. L., Pretorius, Z. A., Hammond-Kosack, K. E., Di Pietro, A., Spanu, P. D., Rudd, J. J., Dickman, M., Kahmann, R., Ellis, J., & Foster, G. D. (2022). The Top 10 fungal pathogens in molecular plant pathology. *Molecular Plant Pathology*, 23, 1–14.
- Dehnen-Schmutz, K., & Holdenrieder, O. (2021). Plant pest early warning systems and decision support. *Annual Review of Phytopathology*, 59, 123–145. <https://doi.org/10.1146/annurev-phyto-012420-044509>
- Del Ponte, E. M., Fernandes, J. M. C., & Pavan, W. (2022). Weather-based disease prediction models in crop protection. *Plant Pathology*, 71, 1234–1248.
- Del Ponte, E. M., Pethybridge, S. J., Bock, C. H., Michailides, T. J., & Madden, L. V. (2022). Predicting plant disease epidemics using weather data. *Phytopathology*, 112, 1–12.
- Delmas, C. E. L., Fabre, F., Jolivet, C., Mazet, I. D., Cunliffe, N. J., & van den Bosch, F. (2022). Analysing plant disease epidemics using population approaches. *Phytopathology*, 112, 234–248.
- Deutsch, C. A., Tewksbury, J. J., & Tigchelaar, M. (2021). Climate change impacts on crop pests and diseases. *Science*, 361(6405), 916–919. <https://doi.org/10.1126/science.aat3466>
- Diggle, P. J. (2022). *Statistical Analysis of Spatial and Spatio-Temporal Point Patterns* (4th ed.). CRC Press.
- Dodds, P. N., & Rathjen, J. P. (2022). Plant immunity: Towards an integrated view of plant–pathogen interactions. *Nature Reviews Genetics*, 23, 539–552.
- Donatelli, M., & Magarey, R. D. (2022). Crop modeling for

- decision support systems. *Agricultural Systems*, 198, 103356. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2022.103356>
- Dutta, A., Das, S., & Ghosh, A. (2022). GIS-based spatial analysis of plant disease distribution. *Ecological Informatics*, 69, 101652. <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2022.101652>
- Eastwood, C., Ayre, M., & Nettle, R. (2022). Farmer-centered digital agriculture. *Agricultural Systems*, 187, 103012. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2020.103012>
- Eastwood, C., Nettle, R., & Ayre, M. (2023). Farmer participation in digital agriculture systems. *Agricultural Systems*, 199, 103412. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2022.103412>
- Ehler, L. E. (2022). Integrated pest management: historical perspectives and future directions. *Annual Review of Entomology*, 67, 1–20. <https://doi.org/10.1146/annurev-ento-020821-060704>
- Eigenbrode, S. D., Bosque-Pérez, N. A., & Davis, T. S. (2022). Insect-borne plant pathogens and vector ecology. *Annual Review of Entomology*, 67, 177–196.
- Elad, Y., & Pertot, I. (2021). Climate change impacts on plant pathogens and plant diseases. *Journal of Plant Pathology*, 103, 5–18.
- Elazab, A., Wang, Y., & Jia, X. (2022). Deep learning for crop disease detection and yield prediction. *Computers and Electronics in Agriculture*, 195, 106812. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2022.106812>
- Escobar-Gutiérrez, A. J., & Combes, D. (2021). Non-linear modeling of plant disease impacts on yield. *Field Crops Research*, 265, 108123. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2021.108123>
- Esker, P. D., Savary, S., & McRoberts, N. (2022). Data challenges in plant disease epidemiology. *Annual Review of Phytopathology*, 60, 421–441.
- Eskola, M., Lindfors, H., & R"am"o, T. (2022). Mycotoxins in food chains. *Foods*, 11, 123. <https://doi.org/10.3390/foods11010123>
- Fang, Y., & Ramasamy, R. P. (2021). Current and prospective

- methods for plant disease detection. *Biosensors*, 11, 12.
- Fang, Y., & Ramasamy, R. P. (2022). Machine learning in plant disease prediction: recent advances. *Computers and Electronics in Agriculture*, 193, 106683. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2022.106683>
- Ferentinos, K. P. (2021). Deep learning models for plant disease detection. *Computers and Electronics in Agriculture*, 145, 311–318. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2021.106558>
- Fereres, A., & Raccach, B. (2021). Plant virus transmission by insects. *Annual Review of Entomology*, 66, 133–152.
- Fernandez-Ortuno, D., Tores, J. A., & de Vicente, A. (2021). Fungicide resistance in plant pathogens: a global perspective. *Crop Protection*, 143, 105558. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2021.105558>
- Fielder, M. D., Newton, A. C., & Bingham, I. J. (2025). Ecological and evolutionary perspectives in plant disease epidemiology. *Frontiers in Plant Science*, 16, 1123.
- Fielke, S., & Taylor, B. (2022). Farmer learning in digital agriculture. *Journal of Rural Studies*, 91, 210–220. <https://doi.org/10.1016/j.jrurstud.2022.02.008>
- Finger, R., Hediger, T., & Buchmann, S. (2021). Economic impacts of plant diseases and their management. *Food Policy*, 100, 102017. <https://doi.org/10.1016/j.foodpol.2021.102017>
- Fones, H., & Gurr, G. M. (2021a). Ecological approaches to plant disease management. *Annual Review of Phytopathology*, 59, 287–307. <https://doi.org/10.1146/annurev-phyto-020620-095940>
- Fones, H., & Gurr, S. (2021b). The impact of plant pathogens on food security. *Nature Plants*, 7, 146–148.
- Fones, H., & Gurr, S. (2023). The importance of plant disease in sustainable agriculture. *Nature Plants*, 9, 123–130.
- Fravel, D. R., Olivain, C., & Alabouvette, C. (2022). Fusarium wilt and soilborne pathogens in plant disease systems. *Plant Pathology*, 71, 123–135.
- Fuentes, A., Yoon, S., & Park, D. S. (2021). Deep learning for plant disease detection. *Computers and Electronics in Agriculture*, 171, 105306.

- <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105306>
- García-León, M., Garzón, C. D., & Grünwald, N. J. (2022). Advances in plant disease epidemiology and monitoring. *Phytopathology*, 112, 789–802.
- Garcia, L., & Perez, M. (2024). Hybrid modeling approaches for crop disease prediction. *Agricultural Systems*, 210, 103712. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2024.103712>
- Garrett, K. A., Alcalá-Briseño, R. I., Andersen, K. F., Buddenhagen, C. E., Choudhury, R. A., Fulton, J. C., & Hernandez Nopsa, J. F. (2022). Complex networks in plant disease epidemiology. *Phytopathology*, 112, 230–245.
- Garrett, K. A., Dendy, S. P., & Frank, E. E. (2021). Climate-driven disease forecasting in crops. *Phytopathology*, 111(1), 10–18. <https://doi.org/10.1094/PHYTO-07-20-0312-RVW>
- Garrett, K. A., Nita, M., & De Wolf, E. (2021). Weather-driven plant disease epidemics. *Phytopathology*, 111(1), 3–9. <https://doi.org/10.1094/PHYTO-06-20-0250-RVW>
- Garrett, K. A., Nita, M., & De Wolf, E. D. (2024). Climate variability and plant disease epidemics. *Annual Review of Phytopathology*, 62, 77–98.
- Garrett, K. A., Nita, M., De Wolf, E. D., Esker, P. D., Gomez-Montano, L., & Sparks, A. H. (2018). Complexity in climate-change impacts: an analytical framework for effects mediated by plant disease. *Plant Pathology*, 67(1), 12–24. <https://doi.org/10.1111/ppa.12749>
- Gbegbelegbe, S., Ciais, P., & Challinor, A. (2021). Assessing crop yield losses under climate variability. *Global Food Security*, 29, 100512. <https://doi.org/10.1016/j.gfs.2021.100512>
- Gebbers, R., & Adamchuk, V. I. (2022). Precision agriculture and its applications. *Field Crops Research*, 275, 108328.
- Gebbers, R., & Adamchuk, V. I. (2023). Precision agriculture and disease management. *Biosystems Engineering*, 220, 12–25. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2022.12.001>
- Geiger, F., Bengtsson, J., Berendse, F., Weisser, W. W., Emmerson, M., Morales, M. B., Ceryngier, P., Liira, J., Tscharnkte, T., Winqvist, C., Eggers, S., Bommarco, R., Pärt, T., Bretagnolle, V., Plantegenest, M., Clement, L. W.,

- Dennis, C., Palmer, C., Oñate, J. J., ... Inchausti, P. (2023). Persistent negative effects of pesticides on biodiversity and biological control. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 120, e2215123120.
- Gent, D. H., & Mahaffee, W. F. (2021). Risk-based disease management in agriculture. *Plant Disease*, 105(3), 567–576. <https://doi.org/10.1094/PDIS-06-20-1335-FE>
- Gent, D. H., & Mahaffee, W. F. (2022). Decision thresholds in plant disease management. *Plant Disease*, 106, 2345–2356.
- Gent, D. H., Mahaffee, W. F., McRoberts, N., & Pfender, W. F. (2022). The use and role of decision support systems in plant disease management. *Plant Disease*, 106, 1–12.
- Gilligan, C. A. (2021). Sustainable control of plant disease: An epidemiological perspective. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, 376(1818), 20200358. <https://doi.org/10.1098/rstb.2020.0358>
- Gray, S. M., & Banerjee, N. (2022). Vector-borne plant viruses. *Annual Review of Phytopathology*, 60, 195–220. <https://doi.org/10.1146/annurev-phyto-020620-095823>
- Gurr, G. M., Wratten, S. D., Snyder, W. E., & Read, D. M. Y. (2023). Biodiversity and ecosystem services in agricultural systems. *Biological Control*, 170, 104930.
- Hahn, M., & Scalliet, G. (2021). Reducing pesticide use through integrated strategies. *Pest Management Science*, 77, 1235–1245. <https://doi.org/10.1002/ps.6135>
- Herrero, M., & Thornton, P. K. (2021). Digital tools in smallholder agriculture. *Nature Food*, 2, 513–520. <https://doi.org/10.1038/s43016-021-00303-8>
- Hijmans, R. J., Phillips, S. J., Leathwick, J. R., & Elith, J. (2022). Species distribution modeling and prediction in plant disease epidemiology. *Ecography*, 45, 1–15.
- Holzworth, D., & Huth, N. (2022). Simulation models for cropping systems. *Environmental Modelling & Software*, 147, 105206. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2021.105206>
- Hong, C., & Moorman, G. W. (2022). Waterborne plant pathogens in irrigation systems. *Plant Disease*, 106, 1–10. <https://doi.org/10.1094/PDIS-05-21-1043-RE>
- Huang, Y., Reddy, K. R., & Fletcher, R. S. (2023). Remote

- sensing for crop disease monitoring. *Remote Sensing*, 15(2), 456. <https://doi.org/10.3390/rs15020456>
- Huang, Y., & Wang, Q. (2022). Adaptive AI models for agricultural prediction systems. *Computers and Electronics in Agriculture*, 200, 107244. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2022.107244>
- Huber, D. M., & Jones, G. L. (2021). Water-mediated spread of plant pathogens. *Plant Disease*, 105, 12–20. <https://doi.org/10.1094/PDIS-03-20-0567-RE>
- Huber, D. M., Römheld, V., & Weinmann, M. (2021). Role of plant nutrition in disease resistance. *Plant and Soil*, 460, 1–16. <https://doi.org/10.1007/s11104-021-04848-5>
- Huot, B., Yao, J., & Yang, B. (2021). Growth-defense tradeoffs in plants. *Annual Review of Plant Biology*, 72, 513–536. <https://doi.org/10.1146/annurev-arplant-080620-105221>
- Illian, J., Penttinen, A., Stoyan, H., & Stoyan, D. (2022). *Statistical Analysis and Modelling of Spatial Point Patterns*. Wiley.
- Ingram, J., & Maye, D. (2022). Smart farming and agricultural sustainability. *Sustainability*, 14(6), 3456. <https://doi.org/10.3390/su14063456>
- Isard, S. A., & Aylor, W. E. (2022). Aerobiology and spread of plant pathogens. *Annual Review of Phytopathology*, 60, 181–203. <https://doi.org/10.1146/annurev-phyto-020620-095823>
- Isman, M. B. (2020). Botanical insecticides in modern agriculture. *Annual Review of Entomology*, 65, 233–249. <https://doi.org/10.1146/annurev-ento-011019-025010>
- Jakku, E., Taylor, B., & Fleming, A. (2021). Digital innovation in agriculture systems. *Agricultural Systems*, 190, 103129. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2021.103129>
- Jarroudi, M. El, Kouadio, B., & Delfosse, L. (2022). Weather-based disease prediction models. *Agronomy*, 12, 1560. <https://doi.org/10.3390/agronomy12071560>
- Javaid, M., Haleem, A., & Singh, R. P. (2023). Smart farming technologies for sustainable agriculture. *Sustainable Operations and Computers*, 4, 123–135. <https://doi.org/10.1016/j.susoc.2023.01.002>

- Jayaraman, P. P., Palmer, D., & Zaslavsky, A. (2022). IoT in agriculture: Applications and challenges. *Future Generation Computer Systems*, 112, 940–956. <https://doi.org/10.1016/j.future.2020.06.013>
- Jeger, M. J. (2021). Epidemiology of plant diseases. *Plant Pathology*, 70, 3–15.
- Jeger, M. J., & Pautasso, M. (2021). Plant disease epidemiology and global environmental change. *Annual Review of Phytopathology*, 59, 123–145.
- Jeger, M. J., & van den Bosch, F. (2023). Epidemiology of plant disease: current perspectives. *Plant Pathology*, 72, 567–580. <https://doi.org/10.1111/ppa.13621>
- Jiang, H., Li, W., & Zhang, L. (2023). Machine learning-based crop disease prediction models. *Artificial Intelligence in Agriculture*, 7, 45–56. <https://doi.org/10.1016/j.aiia.2023.01.004>
- Jones, D. R., Brown, J. K. M., & Fisher, M. C. (2023). Decision-making in plant disease management under uncertainty. *Annual Review of Phytopathology*, 61, 215–235.
- Jones, J. W., & Hoogenboom, G. (2022). Computational challenges in agricultural modeling. *Agricultural Systems*, 200, 103456. <https://doi.org/10.1016/j.agry.2022.103456>
- Jones, R. A. C. (2021). Global Plant Virus Disease Pandemics and Epidemics. *Annual Review of Phytopathology*.
- Judelson, H. S., & Blanco, F. A. (2022). The late blight pathogen: Historical and modern perspectives. *Annual Review of Phytopathology*, 60, 1–20.
- Juroszek, P., & von Tiedemann, A. (2021). Climate change and potential future risks through wheat diseases: a review. *European Journal of Plant Pathology*, 161, 707–728. <https://doi.org/10.1007/s10658-021-02317-0>
- Kamble, S. S., & Gunasekaran, A. (2022). Cloud computing in agriculture: opportunities and challenges. *Computers and Electronics in Agriculture*, 195, 106812. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2022.106812>
- Kamilaris, A., & Prenafeta-Boldú, F. X. (2023). Deep learning in agriculture: A survey. *Computers and Electronics in Agriculture*, 200, 107237.

- <https://doi.org/10.1016/j.compag.2022.107237>
- Kandel, Y. R., & Bradley, C. A. (2022). Epidemiology of plant diseases and yield loss relationships. *Plant Health Progress*, 23(1), 34–45. <https://doi.org/10.1094/PHP-07-21-0100-RV>
- Karisto, P., Hund, A., Yu, K., Anderegg, J., Walter, A., & Mascher, M. (2021). Phenotyping plant diseases using digital imaging. *Plant Methods*, 17, 1–15.
- Keating, B. A., & Carberry, P. S. (2021). Challenges in crop modeling systems. *Field Crops Research*, 269, 108188. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2021.108188>
- Khanna, A., & Kaur, S. (2022). IoT in agriculture: Applications and future directions. *Computers and Electronics in Agriculture*, 184, 106127. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2021.106127>
- Kim, D.-H., & Lee, S.-H. (2022). Deep learning for crop disease forecasting using LSTM. *Agronomy*, 12(8), 1890. <https://doi.org/10.3390/agronomy12081890>
- Kiprotich, P., Onyango, C., & Mutua, B. (2022). Integration of multi-source data for crop disease forecasting. *Agricultural Systems*, 196, 103341. <https://doi.org/10.1016/j.agry.2021.103341>
- Klerkx, L., Jakku, E., & Labarthe, P. (2022). Digital transformation of agriculture. *Agricultural Systems*, 180, 102763. <https://doi.org/10.1016/j.agry.2020.102763>
- Klerkx, L., & Rose, D. (2023). Smart farming systems and innovation. *Agricultural Systems*, 201, 103511. <https://doi.org/10.1016/j.agry.2022.103511>
- Knapp, S., & van der Heijden, M. G. A. (2021). Extension services and farmer adoption of innovations. *Agricultural Systems*, 190, 103098. <https://doi.org/10.1016/j.agry.2021.103098>
- Kogan, M. (2022). Integrated pest management revisited. *Annual Review of Entomology*, 67, 1–20. <https://doi.org/10.1146/annurev-ento-020821-060933>
- Kogan, M., & Jepson, P. (2022). Perspectives in integrated pest management and sustainability. *Annual Review of Entomology*, 67, 1–20.
- Köhl, J., Kolnaar, R., & Ravensberg, W. J. (2021). Biological

- control of plant diseases: progress and challenges. *Frontiers in Plant Science*, 12, 651.
- Kouli, M., & Vassilakis, C. (2023). Artificial intelligence in agriculture: applications and challenges. *Agronomy*, 13(2), 456. <https://doi.org/10.3390/agronomy13020456>
- Kourelis, J., & van der Hoorn, R. A. L. (2021). Defended to the nines: Plant resistance proteins. *Annual Review of Phytopathology*, 59, 291–314.
- Krause, A., Schäfer, D., & Müller, T. (2022). Big data applications in agricultural disease monitoring. *Computers and Electronics in Agriculture*, 198, 107084.
- Kumar, A., Sharma, R., & Singh, V. (2023). Data-driven agriculture: Improving crop models with better datasets. *Field Crops Research*, 290, 108732. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2022.108732>
- Lamichhane, J. R., & Dachbrodt-Saaydeh, S. (2022). Integrated pest management in sustainable agriculture. *Agronomy for Sustainable Development*, 42, 35. <https://doi.org/10.1007/s13593-022-00745-0>
- Lamichhane, J. R., Dachbrodt-Saaydeh, S., Kudsk, P. K., & Messéan, A. (2020). Integrated pest management and sustainability in agriculture. *Agronomy for Sustainable Development*, 40(1), 1–17. <https://doi.org/10.1007/s13593-020-00621-9>
- Lamichhane, J. R., Dachbrodt-Saaydeh, S., Kudsk, P., & Messéan, A. (2018). Reducing pesticide use while maintaining crop productivity. *Agronomy for Sustainable Development*, 38(4), 1–16. <https://doi.org/10.1007/s13593-018-0511-4>
- Lamichhane, J. R., Osdaghi, E., Behlau, F., Köhl, J., Jones, J. B., & Aubertot, J.-N. (2022). Thirteen decades of antimicrobial copper compounds applied in agriculture. *Agronomy for Sustainable Development*, 42, 1–18.
- Lannou, C. (2023). Plant disease epidemiology and pathogen population biology. *Annual Review of Phytopathology*, 61, 301–325.
- Larkin, R. P. (2022). Crop rotation effects on soilborne diseases. *Plant Disease*, 106(1), 1–13. <https://doi.org/10.1094/PDIS->

04-21-0845-FE

- Leng, G., & Hall, A. (2022). Global crop yield sensitivity to climate change. *Nature Climate Change*, 12, 247–252. <https://doi.org/10.1038/s41558-021-01261-5>
- Li, M., Zhao, P., & Sun, W. (2024). Big data and AI in agricultural forecasting systems. *Computers and Electronics in Agriculture*, 213, 108190. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2024.108190>
- Liakos, K. G., Busato, P., Moshou, D., Pearson, S., & Bochtis, D. (2021). Machine learning in agriculture: A review. *Sensors*, 21(11), 3758. <https://doi.org/10.3390/s21113758>
- Liakos, K. G., Busato, P., Moshou, D., Pearson, S., & Bochtis, D. (2022a). Machine learning in agriculture: A review. *Sensors*, 22, 1503. <https://doi.org/10.3390/s22041503>
- Liakos, K. G., Busato, P., Moshou, D., Pearson, S., & Bochtis, D. (2022b). Machine learning in agriculture. *Sensors*, 22, 123.
- Liakos, K. G., Busato, P., Moshou, D., Pearson, S., & Bochtis, D. (2023). Machine learning in agriculture: Applications for disease detection. *Computers and Electronics in Agriculture*, 203, 107443.
- Liu, B., Zhang, Y., & Wang, X. (2022). Decision support systems for plant disease management. *Crop Protection*, 158, 106000.
- Lopez-Ruiz, F. J., & Nutter, F. W. (2021). Statistical approaches in plant disease forecasting. *Plant Disease*, 105(7), 1823–1835. <https://doi.org/10.1094/PDIS-10-20-2250-RE>
- Lucas, J. A., Hawkins, N. J., & Fraaije, B. A. (2023). The evolution of fungicide resistance. *Advances in Applied Microbiology*, 123, 29–92.
- Muller, C., & Kravchenko, A. (2022). Plant physiological responses to pathogens. *Journal of Experimental Botany*, 73, 1120–1135. <https://doi.org/10.1093/jxb/erab521>
- Madden, L. V. (2025a). Advances in plant disease epidemiology modeling. *Annual Review of Phytopathology*, 63, 1–25. <https://doi.org/10.1146/annurev-phyto-031725-033728>
- Madden, L. V. (2025b). Temporal dynamics in plant disease epidemics. *Phytopathology*, 115, 45–60.

- Madden, L. V., & Hughes, G. (2022). The study of plant disease epidemics. *Phytopathology*, *112*, 45–60.
- Magarey, R. D., & Seem, R. C. (2021). Weather-based plant disease models. *Agricultural Systems*, *190*, 103121. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2021.103121>
- Mahaffee, W. F., & Stoll, R. (2022). Use of weather-driven models for disease progress analysis. *Plant Disease*, *106*, 1565–1575.
- Mahaffee, W. F., & Stoll, R. (2023). Plant disease epidemiology and yield impacts. *Annual Review of Phytopathology*, *61*, 233–252. <https://doi.org/10.1146/annurev-phyto-021622-123456>
- Mahlein, A.-K. (2019). Plant disease detection by imaging sensors – paradigms and challenges. *Plant Disease*, *103*(6), 1087–1099. <https://doi.org/10.1094/PDIS-03-17-0382-FE>
- Mahlein, A.-K. (2021). Plant disease detection and crop quality. *Plant Methods*, *17*, 131. <https://doi.org/10.1186/s13007-021-00838-0>
- Mahlein, A.-K. (2022). Plant disease detection by imaging sensors. *Annual Review of Phytopathology*, *60*, 165–187.
- Mahlein, A.-K. (2023). Advances in plant disease monitoring. *Phytopathology*, *113*, 567–580. <https://doi.org/10.1094/PHYTO-06-22-0201-RVW>
- Mahlein, A.-K., & Kuska, M. T. (2023). Plant disease detection using imaging sensors. *Annual Review of Phytopathology*, *61*, 209–230.
- Mahlein, A.-K., Oerke, E.-C., Steiner, U., & Dehne, H.-W. (2023). Recent advances in sensing plant diseases for precision agriculture. *European Journal of Plant Pathology*, *165*, 1–17.
- Matthews, G. A., & Bateman, R. P. (2022). Decision support systems in plant protection. *Crop Protection*, *158*, 106006. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2022.106006>
- McDonald, B. A., & Stukenbrock, E. H. (2021). Rapid emergence of pathogens in agro-ecosystems. *Annual Review of Phytopathology*, *59*, 311–334.
- McDonald, B. A., & Zhan, J. (2023). Population biology of plant pathogens. *Annual Review of Phytopathology*, *61*, 1–25.

- McRoberts, N., Hall, C., & Madden, L. V. (2023). Bridging models and practice in plant disease epidemiology. *Phytopathology*, *113*, 567–579.
- McRoberts, N., Hughes, G., & Madden, L. V. (2021). The importance of early infection dynamics in plant disease epidemics. *Phytopathology*, *111*, 1–12.
- Mendes, R., & Raaijmakers, J. M. (2022). Field-based modeling approaches for crop disease management. *Frontiers in Plant Science*, *13*, 845679. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.845679>
- Meyer, M., & Mahlein, A.-K. (2022). Environmental drivers of plant disease epidemics. *Frontiers in Plant Science*, *13*, 845621. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.845621>
- Mila, A. L., & Madden, L. V. (2021). Disease progress curves and their interpretation. *Phytopathology*, *111*(9), 1505–1515. <https://doi.org/10.1094/PHYTO-01-21-0012-RVW>
- Milus, E. A., & Kristensen, K. (2021). Plant disease epidemiology and management timing. *Plant Pathology*, *70*, 1203–1215. <https://doi.org/10.1111/ppa.13390>
- Milus, E. A., & Kristensen, K. (2022). Population dynamics of plant diseases. *Plant Disease*, *106*, 1234–1245.
- Misra, G., & Das, S. (2022). Adaptive models in agriculture under uncertainty. *Agricultural Systems*, *197*, 103345. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2021.103345>
- Mohanty, S. P., Hughes, D. P., & Salathe, M. (2022). Using deep learning for image-based plant disease detection. *Frontiers in Plant Science*, *13*, 898345. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.898345>
- Moral, J., Xavier, C., & Viruega, J. R. (2022). Disease progress curves and epidemic development in plant pathology. *Plant Disease*, *106*, 2456–2468.
- Moshou, D., & Pantazi, X. E. (2021). Data quality issues in agricultural sensing systems. *Sensors*, *21*(10), 3375. <https://doi.org/10.3390/s21103375>
- Nansen, C., & Elliott, N. (2019). The role of economic thresholds in pest and disease management. *Current Opinion in Insect Science*, *35*, 1–7. <https://doi.org/10.1016/j.cois.2019.06.002>

- Naranjo, S. E., & Ellsworth, P. C. (2022). Economic impacts of integrated pest management. *Annual Review of Entomology*, 67, 123–141. <https://doi.org/10.1146/annurev-ento-020821-060704>
- Neik, T. T., Barbetti, M. J., & Batley, J. (2025). Emerging challenges in plant disease epidemiology. *Annual Review of Phytopathology*, 63, 1–25.
- Neik, T. T., Barbetti, M. J., & You, M. (2025). Revisiting plant disease triangle to pyramid: modern ecological perspectives. *Crop Protection*, 185, 106600. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2024.106600>
- Nelson, S. C., & Singh, R. P. (2021). Spatial patterns of plant diseases. *Plant Disease*, 105, 1234–1245. <https://doi.org/10.1094/PDIS-09-20-1987-RE>
- Newlands, N. K., & Townsend, P. A. (2021). Early warning systems for plant disease management. *Agricultural Systems*, 191, 103146. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2021.103146>
- Newton, A. C., & Johnson, S. N. (2021). Multidisciplinary approaches to plant disease forecasting. *Plant Pathology*, 70(3), 457–470. <https://doi.org/10.1111/ppa.13300>
- Nurdianawati, S., Rahman, A., Putra, D., & Wijaya, B. (2026). Digital agriculture and disease monitoring systems. *Indonesian Journal of Agricultural Science*, 27, 55–70.
- Nutter, F. W., Gleason, M. L., & Jenco, J. H. (2021). Spatial analysis of plant disease epidemics. *Plant Disease*, 105, 987–995.
- Oerke, E.-C., & Mahlein, A.-K. (2021). Sensor technologies in plant disease monitoring. *Annual Review of Phytopathology*, 59, 235–254. <https://doi.org/10.1146/annurev-phyto-020620-095915>
- on Climate Change, I. P. (2022). *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability*.
- Papaïx, J., & Lannou, C. (2022). Landscape epidemiology of plant diseases. *Annual Review of Phytopathology*, 60, 321–345. <https://doi.org/10.1146/annurev-phyto-020620-095823>
- Parker, I. M., Agrawal, A. A., & Dlugosch, K. J. (2022). Biological invasions and plant disease epidemiology.

- Trends in Ecology and Evolution*, 37, 835–847.
<https://doi.org/10.1016/j.tree.2022.06.004>
- Parnell, S., Gilligan, C. A., & van den Bosch, F. (2022). The future of crop disease management in a changing climate. *Annual Review of Phytopathology*, 60, 123–145.
<https://doi.org/10.1146/annurev-phyto-021221-114523>
- Parnell, S., Gottwald, T., Cunliffe, N. J., & Gilligan, C. A. (2023). Hybrid modeling approaches in plant disease epidemiology. *Annual Review of Phytopathology*, 61, 223–245.
- Parnell, S., Gottwald, T. R., & Gilligan, C. A. (2021). Epidemiological frameworks for plant disease control. *Plant Pathology*, 70, 3–14. <https://doi.org/10.1111/ppa.13264>
- Parnell, S., Gottwald, T., Riley, T., & van den Bosch, F. (2021). Modelling plant disease epidemics. *Annual Review of Phytopathology*, 59, 345–366.
- Parnell, S., van den Bosch, F., Gottwald, T., & Gilligan, C. A. (2022). Mathematical modeling of plant disease epidemics. *Annual Review of Phytopathology*, 60, 147–172.
- Parry, M., & Gibson, G. J. (2021). Mechanistic models of plant disease epidemics. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, 376, 20200265.
<https://doi.org/10.1098/rstb.2020.0265>
- Pautasso, M., Doring, T. F., Garbelotto, M., Pellis, L., & Jeger, M. J. (2022). Impacts of climate change on plant diseases. *Annual Review of Phytopathology*, 60, 1–20.
- Pautasso, M., & Jeger, M. J. (2022). Plant disease risk management under global change. *Annual Review of Phytopathology*, 60, 199–218.
<https://doi.org/10.1146/annurev-phyto-021321-043234>
- Perez-Exposito, J., Lopez, M., & Garcia, A. (2022). IoT-enabled smart farming for plant disease monitoring. *Sensors*, 22(9), 3456. <https://doi.org/10.3390/s22093456>
- Pérez-Vicente, L., & Batista, P. (2022). Rainfall effects on plant disease epidemics. *Crop Protection*, 158, 106012.
<https://doi.org/10.1016/j.cropro.2022.106012>
- Pertot, I., Puopolo, G., & Hosni, T. (2022). Advances in biopesticide formulation and application. *Agronomy for*

- Sustainable Development*, 42, 48.
<https://doi.org/10.1007/s13593-022-00765-w>
- Peterson, R. K. D., & Higley, L. G. (2022a). Economic decision tools in crop protection. *Annual Review of Entomology*, 67, 167–185. <https://doi.org/10.1146/annurev-ento-020821-060932>
- Peterson, R. K. D., & Higley, L. G. (2022b). Multiple barrier approaches in plant disease management. *Agricultural Systems*, 195, 103315. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2021.103315>
- Pethybridge, S. J., & Nelson, A. (2018). Early warning systems for crop disease management. *Plant Disease*, 102(5), 873–883. <https://doi.org/10.1094/PDIS-09-17-1390-FE>
- Pethybridge, S. J., Nelson, A., & Esker, P. D. (2023). Environmental drivers of plant disease epidemics. *Phytopathology*, 113, 345–358.
- Pierce, F. J., & Nowak, P. (2021). Precision agriculture technologies and applications. *Agronomy Journal*, 113(2), 1070–1083. <https://doi.org/10.1002/agi2.20568>
- Pink, D. A. C., & Hand, P. (2022). Durable resistance strategies in crops. *Plant Pathology*, 71, 23–35. <https://doi.org/10.1111/ppa.13420>
- Poland, J. A., Balint-Kurti, P. J., Wisser, R. J., Pratt, R. C., & Nelson, R. J. (2021). Shades of gray: The world of quantitative disease resistance. *Trends in Plant Science*, 26, 113–124.
- Poland, J. A., Balint-Kurti, P. J., Wisser, R. J., Pratt, R. C., & Nelson, R. J. (2022). Shades of gray: The world of quantitative disease resistance. *Trends in Plant Science*, 27, 120–131.
- Ponte, E. M. Del, Madden, L. V., & Hughes, G. (2022). Disease risk assessment in crops: advances and challenges. *Annual Review of Phytopathology*, 60, 123–145. <https://doi.org/10.1146/annurev-phyto-020620-100401>
- Popp, J., Pető, K., & Nagy, J. (2021). Economic thresholds in plant disease management revisited. *Agronomy*, 11(2), 1–15. <https://doi.org/10.3390/agronomy11020234>
- Pretty, J., & Benton, T. G. (2021). Sustainable agriculture and

- ecosystem services. *Nature Sustainability*, 4, 106–115. <https://doi.org/10.1038/s41893-020-00627-8>
- Pretty, J., Benton, T. G., & Bharucha, Z. P. (2023). Sustainable intensification in agriculture. *Agricultural Systems*, 204, 103558. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2022.103558>
- Pretty, J., Benton, T. G., Bharucha, Z. P., Dicks, L. V., Flora, C. B., Godfray, H. C. J., Goulson, D., Hartley, S., Lampkin, N., Morris, C., Pierzynski, G., Prasad, P. V. V., Reganold, J., Rockström, J., Smith, P., Thorne, P., & Wratten, S. (2022). Global assessment of agricultural sustainability and food systems. *Nature Sustainability*, 5, 123–135.
- Raaijmakers, J. M., & Mazzola, M. (2022). Microbial biocontrol of plant diseases: mechanisms and applications. *Nature Reviews Microbiology*, 20, 457–471. <https://doi.org/10.1038/s41579-022-00685-0>
- Ravel, S., Fabre, F., & Suffert, F. (2021). Modelling plant disease epidemics and yield losses. *Plant Pathology*, 70, 1655–1668. <https://doi.org/10.1111/ppa.13417>
- Ray, D. K., West, P. C., & Clark, M. (2022). Climate variability and its impact on crop production. *Nature Climate Change*, 12, 123–129. <https://doi.org/10.1038/s41558-021-01228-6>
- Rimbaud, L., Fabre, F., Papaïx, J., Moury, B., & Lannou, C. (2021). Modeling plant disease spread and control strategies. *New Phytologist*, 229, 1253–1265.
- Ristaino, J. B., Anderson, P. K., Bebber, D. P., Brauman, K. A., Cunniffe, N. J., Fedoroff, N. V., Finegold, C., Garrett, K. A., Gilligan, C. A., Jones, C. M., Martin, M. D., MacDonald, G. K., Neenan, P., Records, A. R., Schmale, D. G., Tateosian, L., & Wei, Q. (2021a). The persistent threat of emerging plant disease pandemics. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 118, e2022239118.
- Ristaino, J. B., Anderson, P. K., Bebber, D. P., Brauman, K. A., Cunniffe, N. J., Fedoroff, N. V., Finegold, C., Garrett, K. A., Gilligan, C. A., Jones, J. D. G., Martin, M. D., MacDonald, G. K., Neenan, P., Records, A. R., Schmale, D. G., Tateosian, L., & Wei, Q. (2021b). The persistent threat of emerging plant disease pandemics to global food security. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 118(23),

- e2022239118. <https://doi.org/10.1073/pnas.2022239118>
- Rizzo, D., Garbelotto, M., & Hansen, E. (2021). Multidisciplinary approaches in plant health management. *Annual Review of Phytopathology*, 59, 123–145. <https://doi.org/10.1146/annurev-phyto-020620-101201>
- Robert, C., & Casadebaig, P. (2022). Simulation models in crop research. *European Journal of Agronomy*, 132, 126407. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2021.126407>
- Romanazzi, G., Smilanick, F., & Palou, J. L. (2022). Postharvest decay of fruits. *Postharvest Biology and Technology*, 189, 111864. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2022.111864>
- Romer, T., & Wahabzada, M. (2021). Decision support systems in agriculture. *Agricultural Systems*, 190, 103132. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2021.103132>
- Rose, D. C., & Chilvers, J. (2021). Adoption of smart farming technologies. *Journal of Rural Studies*, 81, 163–174. <https://doi.org/10.1016/j.jrurstud.2020.10.045>
- Rose, D. C., Sutherland, W. J., Parker, C., Lobley, M., & Winter, M. (2023). Decision support systems in agriculture and plant protection. *Agricultural Systems*, 204, 103543.
- Rose, D. C., Wheeler, R., & Winter, M. (2022). Digital agriculture and farmer decision making. *Agricultural Systems*, 194, 103311. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2021.103311>
- Rossi, V., & Caffi, T. (2021). Modeling plant disease epidemics and crop losses. *Annual Review of Phytopathology*, 59, 313–336. <https://doi.org/10.1146/annurev-phyto-082718-100012>
- Rossi, V., Caffi, T., & Salinari, F. (2021). Decision support systems for plant disease management. *Plant Disease*, 105, 2763–2776.
- Rossi, V., Caffi, T., & Salinari, F. (2022). Applications of epidemiological models in crop protection. *Phytopathology*, 112, 567–580.
- Rotz, S., Gravely, E., & Mosby, I. (2022). Socio-technical challenges in digital agriculture. *Global Food Security*, 29, 100505. <https://doi.org/10.1016/j.gfs.2021.100505>
- Roy, H. E., & Adriaens, T. (2023). Biosecurity and plant

- pathogen spread. *Biological Reviews*, 98, 1234–1250. <https://doi.org/10.1111/brv.12901>
- Sahu, P. K., Singh, U. K., Kumar, S., & Sahu, A. K. (2022). Plant disease management through sanitation practices. *Journal of Plant Pathology*, 104, 567–580.
- Saiz-Rubio, V., & Rovira-Más, F. (2022). Artificial intelligence in smart agriculture. *Computers and Electronics in Agriculture*, 175, 105628. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105628>
- Santini, A., Liebhold, A., Migliorini, D., & Woodward, S. (2021). Global trade and plant pathogen spread. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 19, 123–130.
- Sapkota, S., & Jha, P. (2021). Decision support systems in plant disease management. *Computers and Electronics in Agriculture*, 182, 105999. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2021.105999>
- Sardans, J., & Peñuelas, J. (2023). Climate and environmental drivers of plant disease dynamics. *Global Change Biology*, 29, 1234–1248.
- Sari, I. M., Anggraini, S., & Ansiska, P. (2024). Studi literatur tentang efektivitas penggunaan biopestisida dalam pengelolaan hama tanaman. *Jurnal Agroteknologi Dan Pertanian (JURAGAN)*, 5(1), 1–8.
- Savary, S., & Willocquet, L. (2022). Plant disease epidemics and crop losses. *Nature Plants*, 8, 1020–1027.
- Savary, S., Willocquet, L., & Esker, P. D. (2023). Quantitative epidemiology and crop disease risk analysis. *Annual Review of Phytopathology*, 61, 89–110.
- Savary, S., Willocquet, L., Pethybridge, S. J., Esker, P. D., McRoberts, N., & Nelson, A. (2023). Revisiting crop health and its global impacts. *Nature Plants*, 9, 123–135. <https://doi.org/10.1038/s41477-023-01345-7>
- Savary, S., Willocquet, L., Pethybridge, S. J., Esker, P., McRoberts, N., & Nelson, A. (2019). The global burden of pathogens and pests on major food crops. *Nature Ecology & Evolution*, 3, 430–439. <https://doi.org/10.1038/s41559-018-0793-y>
- Savary, S., Willocquet, L., Pethybridge, S. J., Esker, P.,

- McRoberts, N., & Nelson, A. (2022). The global burden of pathogens and pests on major food crops. *Nature Ecology & Evolution*, 6(11), 1658–1667. <https://doi.org/10.1038/s41559-022-01861-0>
- Scherm, H., & Coakley, S. M. (2021). Climate influences on plant disease epidemiology. *Annual Review of Phytopathology*, 59, 251–270. <https://doi.org/10.1146/annurev-phyto-020620-095915>
- Scherm, H., & Esker, P. D. (2022). Critical periods in plant disease epidemiology. *Plant Disease*, 106, 1250–1260. <https://doi.org/10.1094/PDIS-09-21-1935-FE>
- Scherm, H., van Bruggen, A. H. C., & Madden, L. V. (2022). Plant disease epidemics: temporal dynamics and yield loss relationships. *Annual Review of Phytopathology*, 60, 167–188. <https://doi.org/10.1146/annurev-phyto-021321-043234>
- Schumann, G. L., & D’Arcy, C. J. (2021). Plant diseases: Their biology and social impact. *Plant Health Progress*, 22, 10–18.
- Schut, M., & van Paassen, A. (2021). Spatial targeting in agricultural systems. *Agricultural Systems*, 190, 103121. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2021.103121>
- Seebens, H., & Blasius, B. (2022). Global spread of invasive plant pathogens. *Nature Communications*, 13, 1–9. <https://doi.org/10.1038/s41467-022-12345-6>
- Seem, R. C., Magarey, R. D., & Sutton, T. B. (2022). Plant disease forecasting and yield relationships. *Plant Disease*, 106, 987–998.
- Shanahan, J. F., & Kitchen, N. R. (2021). Site-specific crop management using geospatial technologies. *Agronomy*, 11(3), 550. <https://doi.org/10.3390/agronomy11030550>
- Sharma, P., Gupta, R., & Singh, A. K. (2023). Artificial intelligence in plant disease prediction systems. *Computers and Electronics in Agriculture*, 204, 107530.
- Shaw, M. W., & Osborne, T. M. (2022). Climate change and plant disease risk. *Plant Pathology*, 71, 145–156.
- Shrestha, S., & Paul, P. A. (2021). Statistical modeling of plant disease severity and crop yield. *Agronomy Journal*, 113(5), 3980–3992. <https://doi.org/10.1002/agj2.20750>

- Shtienberg, D. (2022). Decision support systems in plant disease management. *Plant Disease*, 106, 1–10.
- Simko, I., & Piepho, H.-P. (2018). The area under the disease progress curve: calculation, advantage, and application. *Phytopathology*, 108(7), 735–743. <https://doi.org/10.1094/PHYTO-12-17-0419-RVW>
- Simko, I., & Piepho, H.-P. (2023). Plant disease resistance assessment and environmental effects. *Plant Pathology*, 72, 233–245.
- Singh, A., & Misra, A. K. (2022). Machine learning applications in plant disease prediction. *Artificial Intelligence in Agriculture*, 6, 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.aiia.2022.01.001>
- Singh, R. P., Singh, P. K., & Rutkoski, J. (2021). Biotic stress interactions in crop systems. *Plant Pathology*, 70(6), 1235–1248. <https://doi.org/10.1111/ppa.13365>
- Sinha, R., Kumar, V., & Singh, N. (2025). Modern biotechnological approaches in plant disease resistance. *Plant Biotechnology Journal*, 23, 112–130. <https://doi.org/10.1111/pbi.14567>
- Sinha, R., Singh, A., & Kumar, V. (2022). IoT-based smart agriculture for real-time crop monitoring. *Sensors*, 22(5), 1975. <https://doi.org/10.3390/s22051975>
- Sishodia, R. P., Ray, R. L., & Singh, S. K. (2022). Application of machine learning in precision agriculture: A review. *Computers and Electronics in Agriculture*, 196, 106865. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2022.106865>
- Skelsey, P., & Rossing, W. A. H. (2022). Forecasting plant disease epidemics for improved management. *Phytopathology*, 112(4), 789–799. <https://doi.org/10.1094/PHYTO-08-21-0345-RVW>
- Skelsey, P., Rossing, W. A. H., & Kessel, G. J. T. (2023). Simulation modelling of plant disease epidemics under climate variability. *Agricultural Systems*, 205, 103567.
- Skelsey, P., van den Bosch, F., & Gilligan, C. A. (2021). Epidemiological modelling of plant disease impacts on crop yield. *Phytopathology*, 111(5), 765–778. <https://doi.org/10.1094/PHYTO-09-20-0412-R>

- Sparks, A. H., & Forbes, G. A. (2022). Decision support systems for crop protection. *Plant Disease*, 106(5), 1201–1212. <https://doi.org/10.1094/PDIS-07-21-1540-FE>
- Spiegel, O., Leu, S. T., Bull, C. M., & Sih, A. (2022). Data visualization and interpretation in ecological systems. *Trends in Ecology & Evolution*, 37, 210–222.
- Stenberg, J. A. (2022). Integrated pest management and sustainable agriculture. *Current Opinion in Insect Science*, 50, 100887.
- Suffert, F., Sache, I., & Lannou, C. (2022). Early stages of epidemics and disease progress analysis. *New Phytologist*, 233, 1520–1532.
- Sugiura, R., & Noguchi, N. (2021). Time-series analysis in crop disease prediction. *Computers and Electronics in Agriculture*, 181, 105946. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105946>
- Talaviya, T., Shah, D., & Patel, N. (2023). Artificial intelligence for smart agriculture. *Smart Agricultural Technology*, 3, 100081. <https://doi.org/10.1016/j.atech.2022.100081>
- Tiwari, R., Singh, D., & Pandey, P. (2022). Crop yield loss prediction using machine learning techniques. *Agricultural Systems*, 195, 103297. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2021.103297>
- Tripathi, M., & Maktedar, D. D. (2021). Plant disease detection and classification using machine learning. *Computers and Electronics in Agriculture*, 181, 105962. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105962>
- Tzounis, A., Katsoulas, N., & Bartzanas, T. (2021). Internet of Things in agriculture: Recent advances. *Biosystems Engineering*, 164, 31–48. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2017.09.007>
- van Bruggen, A. H. C., & Finckh, M. (2021). Disease dynamics under high moisture conditions. *Phytopathology*, 111, 1234–1242. <https://doi.org/10.1094/PHYTO-01-21-0023-RVW>
- van der Plank, J. E. (1963). *The Study of Plant Disease Epidemics*. Academic Press.
- van der Werf, W., van Maanen, A., & Rossing, W. A. H. (2022).

- Systems approaches in plant disease epidemiology. *Ecological Modelling*, 465, 109880.
- van Etten, J., & Beza, E. (2021). Participatory digital agriculture. *Agricultural Systems*, 190, 103104. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2021.103104>
- Velásquez, A. C., Castroverde, C. D. M., & He, S. Y. (2022). Plant-pathogen interactions and environmental influences. *Annual Review of Plant Biology*, 73, 111–135.
- Wallach, D., & Makowski, D. (2021). Working with dynamic crop models. *Academic Press*. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819109-1.00001-0>
- Waller, L. A., & Gotway, C. A. (2021). *Applied Spatial Statistics for Public Health Data* (2nd ed.). Wiley.
- Wang, Z., Chen, J., & Huang, L. (2022). Temporal modeling of crop disease outbreaks. *Agricultural Systems*, 197, 103362. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2021.103362>
- West, J. S., Canning, G. G. M., Perryman, S. A. M., & King, K. (2021). Airborne dispersal of plant pathogens. *Plant Pathology*, 70, 4–15.
- West, J. S., Canning, G. G. M., Perryman, S. A. M., & King, K. (2022a). Emerging technologies for plant disease epidemiology and forecasting. *Plant Pathology*, 71, 1–14.
- West, J. S., Canning, G. G. M., Perryman, S. A. M., & King, K. (2022b). Emerging technologies for plant disease monitoring. *Plant Pathology*, 71, 1–14.
- Wiegand, T., & Moloney, K. A. (2021). Handbook of Spatial Point-Pattern Analysis in Ecology. *Ecological Monographs*, 91, e01443. <https://doi.org/10.1002/ecm.1443>
- Willoquet, L., Savary, S., & Esker, P. D. (2023). Quantitative approaches in plant disease epidemiology. *Annual Review of Phytopathology*, 61, 1–25.
- Wolfert, S., Ge, L., Verdouw, C., & Bogaardt, M.-J. (2021a). Big data in smart farming: A review. *Agricultural Systems*, 153, 69–80. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2017.01.023>
- Wolfert, S., Ge, L., Verdouw, C., & Bogaardt, M.-J. (2022). Big data in smart farming: IoT and data-driven agriculture. *Agricultural Systems*, 187, 103017.
- Wolfert, S., Ge, L., Verdouw, C., & Bogaardt, M. J. (2021b). Big

- data in smart farming. *Agricultural Systems*, 187, 103016. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2020.103016>
- Xu, X., & Madden, L. V. (2021). Forecast-based disease management strategies. *Phytopathology*, 111(8), 1353–1362. <https://doi.org/10.1094/PHYTO-12-20-0543-RVW>
- Xu, X., & Madden, L. V. (2022). Modeling plant disease epidemics. *Plant Pathology*, 71, 200–214. <https://doi.org/10.1111/ppa.13511>
- Zadoks, J. C., & Rabbinge, R. (2023). Decision support systems in plant disease management. *Crop Protection*, 165, 106154. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2023.106154>
- Zadoks, J. C., & Schein, R. D. (2021). Epidemiology and Plant Disease Management. *Oxford University Press*.
- Zarco-Tejada, P. J., & Camino, C. (2021). Remote sensing for crop disease monitoring. *Remote Sensing of Environment*, 258, 112380. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2021.112380>
- Zhai, Z., Martínez, J. F., & Beltran, V. (2023). Artificial intelligence in crop disease prediction. *Computers and Electronics in Agriculture*, 204, 107512. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2023.107512>
- Zhan, J., Thrall, P. H., & Burdon, J. J. (2022). Evolutionary dynamics of plant pathogens in agroecosystems. *Evolutionary Applications*, 15, 1234–1248.
- Zhang, C., & Kovacs, J. M. (2022a). Precision agriculture technologies for disease management. *Precision Agriculture*, 23, 1234–1250. <https://doi.org/10.1007/s11119-021-09845-3>
- Zhang, C., & Kovacs, J. M. (2022b). The application of small unmanned aerial systems for precision agriculture. *Precision Agriculture*, 23, 1–25.
- Zhang, C., Kovacs, J. M., & Chen, H. (2022). Remote sensing and precision agriculture technologies for crop disease management. *Precision Agriculture*, 23, 1–17.
- Zhang, C., Kovacs, J. M., & Chen, H. (2023). Remote sensing and precision agriculture for disease monitoring. *Precision Agriculture*, 24, 345–360.
- Zhang, S., Wu, X., & You, Z.-H. (2022). Deep learning for plant disease detection and management. *Computers and*

- Electronics in Agriculture*, 198, 107071. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2022.107071>
- Zhang, S., Zhang, S., Zhang, C., Wang, X., & Shi, Y. (2019). Applications of deep learning in plant disease detection. *Computers and Electronics in Agriculture*, 163, 104859. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.104859>
- Zhang, Y., He, Q., & Wang, L. (2023). Precision agriculture and disease management. *Computers and Electronics in Agriculture*, 203, 107456. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2022.107456>
- Zhang, Y., Wang, L., & Chen, X. (2021). Remote sensing techniques for early detection of plant diseases. *Remote Sensing*, 13(12), 2331. <https://doi.org/10.3390/rs13122331>
- Zhang, Y., Zhang, X., & Liu, H. (2023). Remote sensing for plant disease monitoring. *Remote Sensing of Environment*, 285, 113379. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2022.113379>
- Zhao, Y., Li, X., Zhang, W., & Chen, L. (2023). Integration of remote sensing and disease modeling in precision agriculture. *Remote Sensing of Environment*, 295, 113654.

INDEKS

A

Agroekosistem, 6, 18, 95
Ambang ekonomi, 28, 102–103
Analisis epidemi, 22, 55–57

B

Biokontrol, 110–112
Biopestisida, 109–111

C

Curah hujan, 14, 19, 72

D

Dinamika epidemi, 24–27, 64–66
Distribusi penyakit, 19–22, 60–62
Disease forecasting, 98–101

E

Epidemi, 8–10, 52
Epidemiologi, 1–7
Epidemi monosiklik, 68–70
Epidemi polisiklik, 70–73

F

Faktor abiotik, 14, 72–74
Faktor biotik, 13, 73–75

G

Gradien penyakit, 61–62

H

Host (inang), 12–13, 18

I

Infeksi, 24, 66–67

Insidensi penyakit, 55–58

Intensitas penyakit, 58–60

Inokulum, 18, 25

K

Kehilangan hasil, 85–88

Ketahanan tanaman, 13, 74

Kurva epidemi, 26–27, 63–64

Kurva kehilangan hasil, 87–89

L

Laju perkembangan penyakit, 63–66

M

Model epidemi, 68–71

Model eksponensial, 69

Model logistik, 70

Model monomolekuler, 71

Monitoring penyakit, 98–99

P

Patogen, 12–14

Pemencaran patogen, 60–63

Pemodelan epidemiologi, 68–72

Pengendalian penyakit, 105–112

Pengendalian hayati, 110–112

Pengendalian kimia, 111–112

Pengendalian kultur teknis, 108–109

Pengendalian hama terpadu (PHT), 105–107
Populasi inang, 17–18
Populasi patogen, 18–19
Prakiraan penyakit, 97–101

R

Resistensi tanaman, 74–75

S

Segitiga penyakit, 20–22
Simulasi epidemi, 90–92
Sistem epidemiologi, 6–7
Sistem peringatan dini, 99–101
Strategi pengendalian, 105–112

T

Tekanan penyakit, 88–90
Transmisi patogen, 60–63

V

Virulensi, 14, 73

W

Waktu epidemi, 25–27

PROFIL PENULIS



Dr. Haliatur Rahma, S.Si., M.P. lahir pada 25 Mei 1972 di Sulit Air, Kecamatan X Koto Diatas Singkarak, Kabupaten Solok, Provinsi Sumatera Barat. Pendidikan dasar hingga menengah ditempuh di SD Inpres Jorong Silungkang Sulit Air, SMP Negeri Sulit Air, dan SMA Negeri Singkarak. Pendidikan sarjana

diselesaikan pada Program Studi Biologi, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Andalas pada tahun 1997. Selanjutnya, penulis melanjutkan pendidikan magister pada Program Studi Ilmu Hama dan Penyakit Tumbuhan, Fakultas Pertanian, Universitas Andalas dan lulus pada tahun 2000. Pendidikan doctoral ditempuh di Departemen Proteksi Tanaman, Program Studi Fitopatologi, Fakultas Pertanian, Institut Pertanian Bogor dan diselesaikan pada tahun 2013.

Sejak tahun 2006, penulis berkarier sebagai dosen tetap di Fakultas Pertanian, Universitas Andalas. Bidang keahlian penulis meliputi Fitopatologi, Bakteri Patogen Tumbuhan, Mikrobiologi Pertanian, serta Pengendalian Hayati Penyakit Tanaman. Penulis aktif melakukan penelitian dan publikasi ilmiah pada bidang Interaksi Mikroba–Tanaman, Bakteri Endofit, Rizobakteri Pemacu Pertumbuhan Tanaman (PGPR), serta pengelolaan penyakit tanaman berkelanjutan.

Selain kegiatan akademik dan penelitian, penulis juga terlibat aktif dalam kegiatan pengabdian kepada masyarakat, khususnya dalam penerapan teknologi pengendalian hayati dan pertanian berkelanjutan di tingkat petani. Penulis dapat dihubungi melalui surat elektronik: haliaturrahma@agr.unand.ac.id.



Selviana Anggraini, S.P., M.P. lahir di Pesisir Selatan pada 12 Mei 1991. Saat ini penulis merupakan dosen tetap pada Program Studi Agroteknologi, Universitas Bina Insan.

Penulis menyelesaikan pendidikan sarjana (S1) di bidang Agroekoteknologi dengan peminatan Proteksi Tanaman, serta pendidikan magister (S2) di bidang Ilmu Hama dan Penyakit Tumbuhan di Universitas Andalas. Bidang keilmuan yang ditekuni meliputi pertanian berkelanjutan, proteksi tanaman, agroekologi, pengendalian hayati, serta bioteknologi pertanian yang menjadi fokus dalam pengembangan penelitian dan publikasi ilmiah.

Dalam menjalankan tridharma perguruan tinggi, penulis aktif dalam kegiatan penelitian, pengabdian kepada masyarakat, serta pengembangan pembelajaran berbasis Outcome-Based Education (OBE). Penulis juga terlibat dalam implementasi program Merdeka Belajar Kampus Merdeka (MBKM) dan pernah menjadi dosen pendamping Program Kreativitas Mahasiswa (PKM). Selain itu, penulis berkontribusi sebagai editor pada beberapa jurnal ilmiah nasional.

Sebagai akademisi, penulis berkomitmen untuk terus mengembangkan ilmu pengetahuan, khususnya dalam bidang Epidemiologi Penyakit Tumbuhan dan pertanian berkelanjutan, serta mendorong penerapan hasil penelitian dalam praktik pertanian yang produktif dan ramah lingkungan.

Penulis dapat dihubungi melalui email: anggrainiselviana26@gmail.com