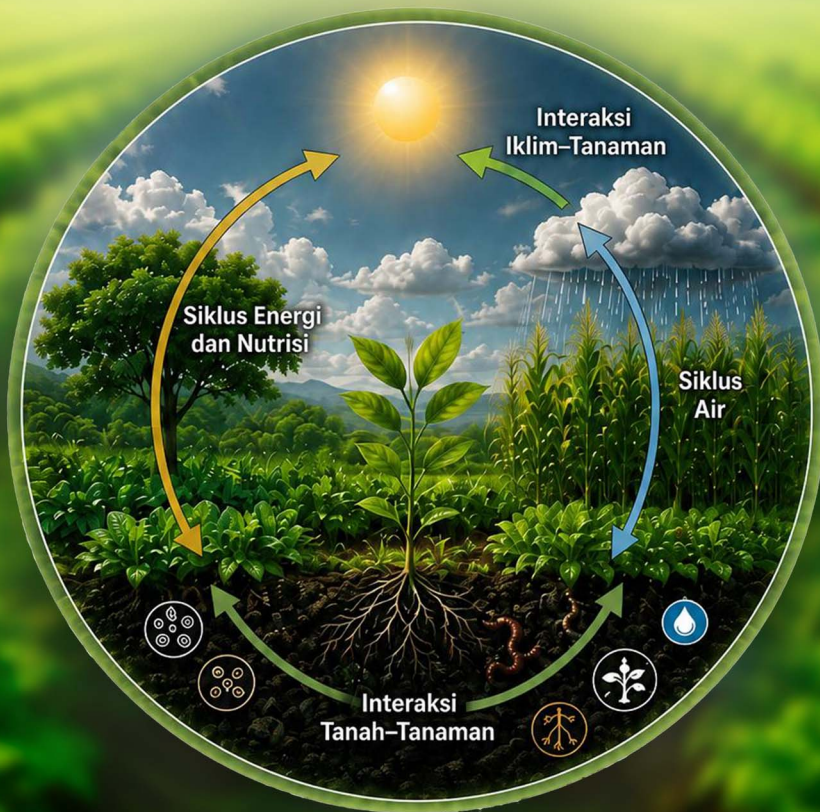




INTERAKSI

Tanah–Tanaman–Iklim

dalam SISTEM AGROEKOLOGI



Sofia Wantasen | Loso Judijanto | Tangguh Prakoso | Nurlaelah | Heny Alpandari | Jeanne M. Paulus
Try Koryati | Adeleyda M. W. Lumingkewas | Esta Rendra RS | Fikria Minsoeriahadi
Steviani Yolanda | Rizki Diah Afritanti | Lamria Sidauruk | Tazkiyatul Syahidah
Retna Astuti Kuswardani | Okti Purwaningsih | Ida Bagus Putu Bhayunagiri
Andre Setiyawan | Halis Agussaini | Sundahri | Nindya Arini

Interaksi

Tanah–Tanaman–Iklim

dalam Sistem Agroekologi



YAYASAN LITERASI SAINS INDONESIA

UNDANG-UNDANG NOMOR 28 TAHUN 2014 TENTANG HAK CIPTA

Fungsi dan sifat hak dapat Pasal 4

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

Pembatasan Perlindungan Pasal 26

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

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

Sanksi Pelanggaran Pasal 113

1. Setiap Orang yang dengan tanpa hak dan/atau tanpa izin Pencipta atau pemegang Hak Cipta melakukan pelanggaran hak ekonomi Pencipta sebagaimana dimaksud dalam Pasal 9 ayat (1) huruf c, huruf d, huruf f, dan/atau huruf h untuk Penggunaan Secara Komersial dipidana dengan pidana penjara paling lama 3 (tiga) tahun dan/atau pidana denda paling banyak Rp500.000.000,00 (lima ratus juta rupiah).
2. Setiap Orang yang dengan tanpa hak dan/atau tanpa izin Pencipta atau pemegang Hak Cipta melakukan pelanggaran hak ekonomi Pencipta sebagaimana dimaksud dalam Pasal 9 ayat (1) huruf a, huruf b, huruf e, dan/atau huruf g untuk Penggunaan Secara Komersial dipidana dengan pidana penjara paling lama 4 (empat) tahun dan/atau pidana denda paling banyak Rp1.000.000.000,00 (satu miliar rupiah).

Interaksi

Tanah–Tanaman–Iklim

dalam Sistem Agroekologi

Sofia Wantasen
Loso Judijanto
Tangguh Prakoso
Nurlaelah
Heny Alpandari
Jeanne M. Paulus
Try Koryati
Adeleyda M. W. Lumingkewas
Esta Rendra RS
Fikria Minsoeriahadi
Steviani Yolanda
Rizki Diah Afritanti
Lamria Sidaauruk
Tazkiyatul Syahidah
Retna Astuti Kuswardani
Okti Purwaningsih
Ida Bagus Putu Bhayunagiri
Andre Setiyawan
Halis Agussaini
Sundahri
Nindya Arini



YAYASAN LITERASI SAINS INDONESIA

Interaksi Tanah–Tanaman–Iklim dalam Sistem Agroekologi

Hak Cipta © 2026 pada Penulis

Cetakan 1, Juli 2026

17,6 x 25 cm, xxiv + 428 Halaman

ISBN: 978-634-7292-85-8

Penulis : Sofia Wantasen
Loso Judijanto
Tangguh Prakoso
Nurlaelah
Heny Alpandari
Jeanne M. Paulus
Try Koryati
Adeleyda M. W. Lumingkewas
Esta Rendra RS
Fikria Minsoeriahadi
Steviani Yolanda
Rizki Diah Afritanti
Lamria Sidauruk
Tazkiyatul Syahidah
Retna Astuti Kuswardani
Okti Purwaningsih
Ida Bagus Putu Bhayunagiri
Andre Setiawan
Halis Agussaini
Sundahri
Nindya Arini
Editor : Ardiyanto Saleh Modjo
Angelia Putriana
Romindo
Desain Cover : Riski Prahmana Putra

Diterbitkan oleh:

YAYASAN LITERASI SAINS INDONESIA

Anggota IKAPI No.085/SUT/2023

Jl. Bunga Cempaka. No.51D, Padang Bulan Selayang II, Kec. Medan Selayang,
Kota Medan, Sumatera Utara 20131



0812-7551-8124



literasisains.id@gmail.com



0813-4491-3522



Literasi Sains Indonesia



literasisains.id



<https://literasisains.id>

Hak cipta dilindungi Undang-Undang.

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

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur penulis panjatkan ke hadirat Tuhan Yang Maha Esa karena atas segala berkat yang telah dilimpahkan sehingga buku dengan judul “Interaksi Tanah–Tanaman–Iklim dalam Sistem Agroekologi” ini mampu diselesaikan.

Buku ini berisi pembahasan yang komprehensif mengenai interaksi antara tanah, tanaman, dan iklim sebagai tiga komponen utama yang membentuk sistem agroekologi yang berkelanjutan. Materi disusun secara sistematis mulai dari konsep dasar agroekologi, karakteristik fisik, kimia, dan biologi tanah, fisiologi serta sistem perakaran tanaman, hingga pengaruh iklim, perubahan iklim, dan berbagai siklus biogeokimia yang berlangsung dalam agroekosistem. Selain itu, buku ini mengulas penerapan berbagai sistem budidaya berkelanjutan, pengelolaan kesuburan tanah, konservasi dan restorasi lahan, respons tanaman terhadap cekaman lingkungan, peran keanekaragaman hayati dan jasa ekosistem, serta pendekatan sistem dalam pengembangan agroekologi untuk mendukung ketahanan pangan dan keberlanjutan global. Dengan penyajian yang terpadu antara konsep ilmiah dan aplikasinya di lapangan, buku ini diharapkan dapat menjadi referensi yang bermanfaat bagi mahasiswa, dosen, peneliti, praktisi pertanian, serta seluruh pembaca yang ingin memperdalam pemahaman tentang pengelolaan agroekosistem yang produktif, adaptif, dan berwawasan lingkungan.

Berikut bab yang akan dibahas pada buku ini:

Bab 1: Pengantar Agroekologi

Bab 2: Tanah Sebagai Komponen Utama Agroekosistem

Bab 3: Sifat Fisika Tanah dan Pengaruhnya terhadap Pertumbuhan Tanaman

Bab 4: Sifat Kimia Tanah dan Ketersediaan Hara untuk Tanaman

Bab 5: Biologi Tanah dan Ekologi Mikroba Tanah

Bab 6: Fisiologi Tanaman dalam Konteks Agroekologi

Bab 7: Sistem Perakaran Tanaman dan Interaksinya dengan Tanah

Bab 8: Iklim dan Cuaca dalam Sistem Agroekologi

Bab 9: Perubahan Iklim dan Dampaknya Terhadap Sistem Pertanian

Bab 10: Siklus Air dalam Agroekosistem

Bab 11: Siklus Karbon, Nitrogen, dan Fosfor dalam Agroekosistem
Bab 12: Keanekaragaman Hayati dan Fungsinya dalam Agroekosistem
Bab 13: Sistem Pertanian Tumpang Sari dan Polikultur
Bab 14: Sistem Agroforestri: Integrasi Pohon dalam Pertanian
Bab 15: Konsep Iklim Mikro dan Faktor-Faktor Pembentuknya
Bab 16: Pengelolaan Kesuburan Tanah Secara Agroekologis
Bab 17: Degradasi Lahan dan Restorasi Agroekosistem
Bab 18: Cekaman Abiotik dan Respon Tanaman
Bab 19: Jasa Ekosistem dalam Pertanian Berkelanjutan
Bab 20: Pendekatan Sistem dan Pemodelan dalam Agroekologi
Bab 21: Agroekologi untuk Ketahanan Pangan dan Keberlanjutan Global

Penulis dengan penuh rasa syukur mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada semua pihak yang telah memberikan dukungan, semangat, dan doa dalam proses penyusunan hingga terbitnya buku ini. Setiap dorongan, masukan, dan bantuan yang diberikan, baik secara langsung maupun tidak langsung, menjadi sumber inspirasi dan motivasi yang tak ternilai dalam menyelesaikan karya ini. Penulis menyadari bahwa tanpa bantuan berbagai pihak, buku ini tidak akan terwujud sebagaimana adanya. Semoga segala kebaikan, perhatian, dan kerja sama yang telah diberikan mendapat balasan yang berlipat ganda dari Tuhan Yang Maha Esa. Akhirnya, penulis berharap semoga kita semua senantiasa diberikan kesehatan, kebahagiaan, dan keberkahan dalam setiap langkah kehidupan. Terima kasih.

Medan, Juli 2026

Tim Penulis

DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR	iii
DAFTAR ISI	v
DAFTAR GAMBAR	xix
DAFTAR TABEL	xxiii
BAB 1 PENGANTAR AGROEKOLOGI	1
1.1 Definisi dan Ruang Lingkup Agroekologi	2
1.1.1 Definisi Agroekologi	2
1.1.2 Ruang Lingkup Agroekologi	3
1.2 Sejarah Perkembangan Agroekologi sebagai Disiplin Ilmu	4
1.3 Prinsip-Prinsip Dasar Agroekologi	8
1.4 Hubungan Agroekologi dengan Ilmu Pertanian Konvensional	14
1.5 Peran Agroekologi dalam Pembangunan Pertanian Berkelanjutan	15
BAB 2 TANAH SEBAGAI KOMPONEN UTAMA AGROEKOSISTEM	19
2.1 Definisi, Fungsi, dan Peran Tanah dalam Ekosistem Pertanian	19
2.2 Komponen Fisik, Kimia, dan Biologi Tanah	23
2.3 Profil dan Horison Tanah serta Kaitannya dengan Produktivitas	27
2.4 Klasifikasi Tanah dan Distribusi Tanah Pertanian di Indonesia	30
2.5 Tanah sebagai Sistem Hidup: Perspektif Agroekologi	34
BAB 3 SIFAT FISIKA TANAH DAN PENGARUHNYA TERHADAP PERTUMBUHAN TANAMAN	39
3.1 Tekstur dan Struktur Tanah	39
3.1.1 Tekstur	40
3.1.2 Struktur Tanah	42

3.2 Porositas, Aerasi, dan Kapasitas Memegang Air	44
3.2.1 Porositas	45
3.2.2 Aerasi Tanah	45
3.2.3 Kapasitas Memegang Air Tanah.....	45
3.2.4 Hubungan porositas, aerasi, dan kapasitas tanah	46
3.3 Suhu Tanah dan Pengaruhnya terhadap Aktivitas Biologis.....	47
3.4 Pemadatan Tanah dan Dampaknya terhadap Sistem Perakaran	49
3.5 Pengelolaan Sifat Fisika Tanah dalam Sistem Agroekologis	51
3.5.1 Konsep Sistem Agroekologis.....	52
3.5.2 Strategi Pengelolaan Sifat Fisika Tanah dalam Sistem Agroekologis.....	52
BAB 4 SIFAT KIMIA TANAH DAN KETERSEDIAAN HARA UNTUK TANAMAN	55
4.1 Reaksi Tanah (pH) dan Pengaruhnya terhadap Ketersediaan Nutrien.....	56
4.1.1 Sifat Keasaman dan Alkalinitas Tanah.....	56
4.1.2 pH Tanah dan Kelarutan Nutrien.....	57
4.1.3 Kapasitas Penyangga Tanah dan Ketahanan terhadap Perubahan pH.....	58
4.2 Reaksi Tanah (pH) dan Pengaruhnya terhadap Ketersediaan Nutrien.....	59
4.2.1 Konsep Dasar Pertukaran Kation	59
4.2.2 Pengaruh pH Tanah terhadap Kapasitas Pertukaran Kation	60
4.3 Bahan Organik Tanah dan Perannya dalam Ketersediaan Nutrien.....	61
4.3.1 Konsep Dasar Pertukaran Kation	61
4.3.2 Bahan Organik Tanah dan Ketersediaan Fosfor	62
4.3.3 Ketersediaan Bahan Organik Tanah dan Unsur Hara Mikro.....	63

4.4 Sifat Kimia Tanah yang Mempengaruhi Ketersediaan Makronutrien	63
4.4.1 Ketersediaan Nitrogen dalam Tanah	64
4.4.2 Ketersediaan Fosfor dalam Tanah	65
4.4.3 Ketersediaan Kalium dalam Tanah	65
4.4.4 Ketersediaan Kalsium dan Magnesium	66
4.4.5 Ketersediaan Sulfur	66
4.5 Kendala Kimia yang Membatasi Ketersediaan Nutrien	67
4.5.1 Toksisitas Aluminium pada Tanah Asam	67
4.5.2 Toksisitas Besi pada Tanah dengan Drainase Buruk	68
4.5.3 Salinitas dan Ketersediaan Nutrien	69
BAB 5 BIOLOGI TANAH DAN EKOLOGI MIKROBA TANAH	71
5.1 Keanekaragaman Organisme Tanah: Dari Makro hingga Mikro	72
5.2 Peran Mikroba dalam Siklus Hara dan Dekomposisi Bahan Organik	74
5.3 Cendawan Mikoriza dan Simbiosis dengan Akar Tanaman	76
5.4 Bakteri Penambat Nitrogen dan Pelarut Fosfat	78
5.5 Ekologi Tanah sebagai Indikator Kesehatan Agroekosistem	81
BAB 6 FISILOGI TANAMAN DALAM KONTEKS AGROEKOLOGI	83
6.1 Proses Fotosintesis dan Pengaruh Faktor Lingkungan	83
6.1.1 Pengertian dan Fungsi Fotosintesis	83
6.1.2 Reaksi Terang dan Reaksi Gelap	85
6.1.3 Faktor-faktor yang Mempengaruhi Fotosintesis	90
6.2 Respirasi, Transpirasi, dan Efisiensi Penggunaan Air	91
6.2.1 Respirasi	91
6.2.2 Transpirasi	95

6.2.3 Efisiensi Penggunaan Air (Water Use Efficiency – Wue).....	97
6.3 Penyerapan dan Translokasi Hara	100
6.3.1 Penyerapan Hara	100
6.3.2 Translokasi Hara dalam Tanaman	102
6.4 Mekanisme Adaptasi Tanaman Terhadap Cekaman Lingkungan	103
6.4.1 Tingkatan Mekanisme Respons Tanaman	103
6.4.2 Strategi Adaptasi: Avoidance vs Tolerance.....	104
6.5 Hubungan Sumber dan Limbung dalam Produktivitas Tanaman.....	105
6.5.1 Mekanisme Translokasi (Aliran Massa).....	106
6.5.2 Regulasi Balik (Feedback Regulation) & Kekuatan Limbung	106
6.5.3 Implikasi dalam Agronomi & Pemuliaan Tanaman	107
BAB 7 SISTEM PERAKARAN TANAMAN DAN INTERAKSINYA	
DENGAN TANAH.....	109
7.1 Arsitektur dan Morfologi Sistem Perakaran.....	109
7.1.1 Pengertian Sistem Perakaran.....	109
7.1.2 Sistem Perakaran.....	111
7.1.3 Faktor yang Mempengaruhi Arsitektur dan Morfologi Akar	112
7.2 Rizhosfer: Zona Interaksi Aktif Akar-Tanah-Mikroba.....	113
7.2.1 Pengertian Rizhosfer.....	113
7.2.2 Fungsi Rizhosfer bagi Tanaman	114
7.3. Eksudat Akar Dan Pengaruhnya Terhadap Komunitas Mikroba	
Tanah	115
7.3.1 Pengertian Eksudat Akar	115
7.3.2 Pengaruh Eksudat Akar terhadap Komunitas Mikroba Tanah	116
7.4 Respons Akar Terhadap Ketersediaan Hara Dan Air	117
7.4.1 Respons Akar terhadap Ketersediaan Hara	117

7.4.2 Respons Akar terhadap Ketersediaan Air	118
7.5 Peran Sistem Perakaran dalam Stabilitas dan Perbaikan Struktur Tanah	119
BAB 8 IKLIM DAN CUACA DALAM SISTEM AGROEKOLOGI.....	123
8.1 Komponen Iklim dan Pengaruhnya terhadap Pertanian	123
8.2 Radiasi Matahari, Suhu Udara, dan Panjang Hari.....	124
8.3 Curah Hujan, Kelembaban, dan Siklus Hidrologi Pertanian.....	127
8.4 Angin dan Perannya dalam Evapotranspirasi dan Distribusi Serbuk Sari.....	130
8.5 Klasifikasi Iklim Pertanian dan Zonasi Agroklimat Indonesia	132
BAB 9 PERUBAHAN IKLIM DAN DAMPAKNYA TERHADAP SISTEM PERTANIAN.....	137
9.1 Fenomena Perubahan Iklim Global: Bukti dan Proyeksi	138
9.1.1 Bukti Empiris Perubahan Iklim.....	139
9.1.2 Proyeksi Perubahan Iklim di Masa Depan	141
9.1.3 Implikasi Ekologis terhadap Sistem Pertanian.....	142
9.2 Dampak Perubahan Iklim Terhadap Produksi Pertanian	144
9.3 Kenaikan Suhu dan Pergeseran Musim Tanam	146
9.4 Kejadian Ekstrem: Kekeringan, Banjir, dan Dampaknya pada Agroekosistem.....	148
9.5 Strategi Adaptasi dan Mitigasi Pertanian terhadap Perubahan Iklim.....	150
9.5.1 Strategi Adaptasi Pertanian terhadap Perubahan Iklim.....	150
9.5.2 Strategi Mitigasi Pertanian terhadap Perubahan Iklim.....	151
BAB 10 SIKLUS AIR DALAM AGROEKOSISTEM.....	153
10.1 Siklus Hidrologi dan Komponen Neraca Air.....	153
10.2 Infiltrasi, Perkolasi, dan Aliran Permukaan di Lahan Pertanian	156

10.3 Evapotranspirasi dan Kebutuhan Air Tanaman	158
10.4 Pengelolaan Air Tanah dan Irigasi Berbasis Agroekologi	162
10.5 Hubungan Tutupan Vegetasi dan Konservasi Air Tanah	165
BAB 11 SIKLUS KARBON, NITROGEN, DAN FOSFOR DALAM AGROEKOSISTEM	169
11.1 Siklus Karbon dan Peran Tanah sebagai Penyerap Karbon.....	169
11.2 Siklus Nitrogen: Fiksasi, Nitrifikasi, Denitrifikasi	172
11.3 Siklus Fosfor dan Keterbatasan Sumber Fosfor Global.....	174
11.4 Siklus Sulfur dan Unsur Mikro dalam Ekosistem Pertanian.....	176
11.5 Manajemen Siklus Hara Secara Terpadu dalam Sistem Agroekologi	178
11.5.1 Pertanian Presisi	179
11.5.2 Agroforestri.....	179
11.5.3 Cover Crop.....	180
BAB 12 KEANEKARAGAMAN HAYATI DAN FUNGSINYA DALAM AGROEKOSISTEM.....	183
12.1 Konsep Keanekaragaman Hayati dalam Pertanian (Agrobiodiversitas)	183
12.1.1 Pengantar Ekologi Pertanian: Memahami Agroekosistem.....	183
12.1.2 Pengertian dan Cakupan Agrobiodiversitas	184
12.1.3 Evolusi Pertanian dan Teori Gangguan (Disturbance Theory)	185
12.1.4 Paradoks Monokultur dan Hukum Entropi	186
12.2 Keanekaragaman Genetik Tanaman Budidaya dan Kerabat Liarnya (CROP WILD RELATIVES).....	186
12.2.1 Pentingnya Crop Wild Relatives (CWR) dan Teori Ko-evolusi	188
12.2.2 Fenomena Erosi Genetik dan Bottleneck Effect.....	188

12.3 Peran Serangga, Burung, dan Fauna Lain dalam Agroekosistem	189
12.3.1 Hipotesis Regulasi Populasi: Top-Down vs. Bottom-Up dan Kekuatan Interaksi.....	190
12.3.2 Relung Ekologi (Ecological Niche) dan Fungsi Spesies Fauna.....	191
12.4 Keanekaragaman Fungsional dan dan Jasa Ekosistem.....	192
12.4.1 Klasifikasi Jasa Ekosistem (Ecosystem Services) dan Penimbangan Trade-off.....	195
12.5 Konservasi Keanekaragaman Hayati Pertanian di Indonesia	196
12.5.1 Strategi Komplementer: Konservasi In-situ dan Ex-situ	197
BAB 13 SISTEM PERTANIAN TUMPANG SARI DAN POLIKULTUR	199
13.1 Konsep dan Rasionalitas Sistem Tumpang Sari	199
13.1.1 Konsep Dasar Sistem Tumpang Sari	200
13.1.2 Rasionalitas Agronomis Sistem Tumpang Sari	201
13.1.3 Rasionalitas Ekologis Sistem Tumpang Sari	202
13.1.4 Rasionalitas Ekonomi Sistem Tumpang Sari.....	203
13.2 Interaksi Kompetisi dan Fasilitas antar Tanaman.....	204
13.2.1 Konsep Kompetisi antar Tanaman	204
13.2.2 Konsep Fasilitas antar Tanaman.....	205
13.2.3 Interaksi Kompetisi–Fasilitas dalam Tumpang Sari	206
13.3 Keuntungan Agroekologis Polikultur dibanding Monokultur	207
13.4 Desain Sistem Tumpang Sari Berbasis Prinsip Ekologi.....	209
13.4.1 Komplementaritas Relung	209
13.4.2 Mengatur Kompetisi agar Tidak Menekan Tanaman Utama	210
13.4.3 Memperkuat Fasilitas antar Tanaman.....	210
13.4.4 Diversifikasi Fungsional	211

13.4.5 Menutup Tanah untuk Mengurangi Erosi, Gulma, dan Kehilangan Air	211
13.4.6 Model Desain Ekologis Tumpang Sari.....	211
13.5 Contoh Sistem Polikultur Tradisional dan Modern di Indonesia.....	213
13.5.1 Sistem Polikultur Tradisional di Indonesia.....	213
13.5.2 Sistem Polikultur Modern di Indonesia	214
BAB 14 SISTEM AGROFORESTRI: INTEGRASI POHON	
DALAM PERTANIAN	217
14.1 Pengertian, Klasifikasi, dan Manfaat Agroforestri	217
14.2 Interaksi Pohon–Tanaman Semusim dalam Sistem Agroforestri	220
14.3 Pengaruh Pohon terhadap Sifat Tanah dan Iklim Mikro	225
14.4 Agroforestri sebagai Strategi Konservasi dan Ketahanan Pangan.....	229
14.5 Model Agroforestri Lokal: Kasus dari Kepulauan Indonesia	233
BAB 15 KONSEP IKLIM MIKRO DAN FAKTOR-FAKTOR	
PEMBENTUKNYA.....	237
15.1 Konsep Iklim Mikro dan Faktor Pembentukannya.....	237
15.1.1 Suhu Udara	237
15.1.2 Kelembapan Udara	237
15.1.3 Radiasi Matahari	238
15.1.4 Kecepatan dan Arah Angin	238
15.1.5 Suhu Tanah	239
15.2 Pengaruh Topografi, Vegetasi, dan Mulsa terhadap Iklim Mikro	239
15.2.1 Pengaruh Topografi terhadap Iklim Mikro.....	239
15.2.2 Pengaruh Vegetasi terhadap Iklim Mikro	240
15.2.3 Pengaruh Mulsa terhadap Iklim Mikro.....	241

15.2.4 Interaksi Topografi, Vegetasi, dan Mulsa dalam Pembentukan Iklim Mikro.....	242
Implikasi dalam Pertanian dan Perkebunan.....	242
15.3 Modifikasi Iklim Mikro Melalui Teknik Budidaya.....	242
15.3.1 Konsep Modifikasi Iklim Mikro	243
15.3.2 Teknik Budidaya untuk Memodifikasi Iklim Mikro	243
15.3.3 Manfaat Modifikasi Iklim Mikro	245
15.3.4 Tantangan dalam Modifikasi Iklim Mikro	246
15.4 Iklim Mikro dalam Sistem Pertanian Terasering dan Lahan Miring.....	246
15.4.1 Konsep Iklim Mikro pada Lahan Miring	247
15.4.2 Sistem Terasering sebagai Modifikasi Iklim Mikro	247
15.4.3 Peran Vegetasi dalam Iklim Mikro Lahan Terasering.....	248
15.4.4 Iklim Mikro dan Produktivitas Tanaman pada Lahan Miring	248
15.4.5 Tantangan Pengelolaan Iklim Mikro pada Lahan Miring.....	248
15.5 Pengukuran dan Pemantauan Iklim Mikro di Lahan Pertanian.....	249
15.5.1 Pentingnya Pengukuran Iklim Mikro di Lahan Pertanian	249
15.5.2 Parameter Iklim Mikro yang Diukur	249
15.5.3 Instrumen Pengukuran Iklim Mikro	251
15.5.4 Sistem Pemantauan Iklim Mikro Berbasis IoT.....	251
15.5.5 Metodologi Pengukuran Iklim Mikro.....	252
15.5.6 Aplikasi Pemantauan Iklim Mikro dalam Pertanian	252
15.5.7 Tantangan dalam Pemantauan Iklim Mikro	253
BAB 16 PENGELOLAAN KESUBURAN TANAH SECARA AGROEKOLOGIS	255
16.1 Konsep Kesuburan Tanah dari Perspektif Agroekologis.....	255

16.2 Penggunaan Pupuk Organik: Kompos, Pupuk Hijau, dan Biochar	257
16.3 Pemupukan Hayati dan Peran Biofertilizer.....	262
16.4 Rotasi Tanaman dan Perannya dalam Pemulihan Kesuburan Tanah	264
BAB 17 DEGRADASI LAHAN DAN RESTORASI AGROEKOSISTEM	267
17.1 Bentuk-Bentuk Degradasi Lahan Pertanian.....	268
17.1.1 Ontologi dan Taksonomi Degradasi Lahan.....	268
17.1.2 Perspektif Global dan Dinamika Agroekologi di Indonesia.....	270
17.1.3 Mekanisme Termodinamika dan Biofisika dalam Degradasi Fisik	270
17.1.4 Degradasi Kimiawi: Gangguan pada Siklus Biogeokimia dan Stoikiometri.....	271
17.1.5 Degradasi Biologis: Matinya Jaringan Syaraf Tanah	272
17.1.6 Tipologi Degradasi pada Tanah Suboptimal Indonesia: Gambut dan Tanah Vulkanik	272
17.1.7 Krisis Hidrologis: Tanah sebagai Spons yang Rusak.....	273
17.1.8 Deteksi dan Kuantifikasi Degradasi: Pendekatan Sains Data dan Geospasial	274
17.1.9 Penilaian Ekonomi: Biaya Eksternalitas Degradasi	274
17.1.10 Evolusi Historis Degradasi Lahan di Indonesia: Dari Kulturstelsel ke Revolusi Hijau	275
17.1.11 Mekanisme Molekuler Interaksi Akar–Tanah dalam Kondisi Terdegradasi.....	275
17.2 Erosi Tanah: Proses, Faktor Penyebab, dan Dampaknya	276
17.2.1 Mekanika dan Kinematika Erosi Tanah	277
17.2.2 Faktor-Faktor Pendorong Erosi dalam Bingkai Agroekologi	278

17.2.3 Tipologi Erosi: Dari Lembar hingga Parit Raksasa.....	279
17.2.4 Dampak Sistemik: On-site dan Off-site.....	279
17.3 Salinisasi, Acidifikasi, dan Kontaminasi Lahan Pertanian	280
17.3.1 Salinisasi: Termodinamika Air dan Dinamika Elektrostatis Koloid	280
17.3.2 Acidifikasi: Kinetika Pelepasan Proton dan Toksisitas Spesiasi Aluminium	281
17.3.3 Kontaminasi: Isoterm Adsorpsi dan Bioavailabilitas Organometalik	282
17.3.4 Integrasi Interaksi: Sinergi Degradasi Kimiawi.....	282
17.4 Prinsip dan Teknologi Restorasi Agroekosistem Terdegradasi.....	283
17.4.1 Prinsip Dasar Restorasi: Resiliensi dan Fungsionalitas	283
17.4.2 Teknologi Restorasi Fisik dan Mekanis.....	284
17.4.3 Restorasi Kimiawi dan Amandemen Tanah Mutakhir.....	284
17.4.4 Restorasi Biologis: Arsitektur Simbiosis dan Ekologi Bentang Alam	285
17.5 Resiliensi Nusantara: Contoh Kasus Rehabilitasi Lahan Kritis di Indonesia.....	286
17.5.1 Restorasi Lahan Gambut: Dialektika Antara Karbon dan Air	286
17.5.2 Paradigma Baru DAS Citarum: Transformasi dari Grey ke Green Infrastructure	287
17.5.3 Technosols di Lahan Pasca-Tambang: Menciptakan Kehidupan dari Sterilitas.....	287
17.5.4 Masa Depan Restorasi: Kecerdasan Buatan dan Diplomasi Karbon Digital Twin Agroekosistem: Visualisasi Prediktif Degradasi	288
BAB 18 CEKAMAN ABIOTIK DAN RESPON TANAMAN	289
18.1 Cekaman Kekeringan dan Mekanisme Toleransi Tanaman.....	290

18.2 Cekaman Suhu Tinggi dan Rendah pada Pertumbuhan Tanaman	296
18.2.1 Cekaman Suhu Tinggi pada Pertumbuhan Tanaman	296
18.2.2 Cekaman Suhu Rendah pada Pertumbuhan Tanaman	298
18.3 Cekaman Salinitas dan Adaptasi Tanaman	300
18.4 Cekaman Genangan Air dan Respons Anatomi-Fisiologi Tanaman	301
18.4.1 Respon Anatomi terhadap cekaman genangan air.....	302
18.4.2 Respon Fisiologi terhadap cekaman genangan air	302
18.5 Strategi Pemuliaan dan Manajemen Budidaya dalam Kondisi Cekaman.....	303
BAB 19 JASA EKOSISTEM DALAM PERTANIAN BERKELANJUTAN.....	307
19.1 Konsep Jasa Ekosistem dan Kerangka Penilaiannya.....	307
19.1.1 Konsep Jasa Ekosistem	308
19.1.2 Kerangka Penilaian Jasa Ekosistem.....	309
19.2 Jasa Penyediaan: Pangan, Air, dan Serat	311
19.2.1 Pangan.....	311
19.2.2 Air	311
19.2.3 Serat.....	312
19.3 Jasa Pengaturan: Pengendalian Hama, Iklim, dan Erosi.....	313
19.3.1 Pengendalian Hama secara Hayati.....	313
19.3.2 Pengaturan Iklim Mikro dan Makro	313
19.3.3 Pencegahan Erosi Tanah.....	314
19.4 Jasa Budaya dan Spiritual dalam Agroekosistem Tradisional.....	315
19.4.1 Nilai Spiritual dan Keagamaan.....	315
19.4.2 Warisan Budaya dan Pengetahuan Lokal	316

9.4.3 Rasa Memiliki dan Identitas Sosial	316
19.5 Penilaian Ekonomi Jasa Ekosistem di Lahan Pertanian	318
9.5.1 Nilai Ekonomi Total.....	319
9.5.2 Biaya Peluang.....	321
BAB 20 PENDEKATAN SISTEM DAN PEMODELAN DALAM AGROEKOLOGI	325
20.1 Sistem Berpikir dalam Agroekologi: Konsep dan Metodologi.....	326
20.2 Model Simulasi Pertumbuhan Tanaman (Crop Modeling)	328
20.3 Pemodelan Siklus Hara dan Karbon dalam Agroekosistem	330
20.4 Penggunaan GIS dan Penginderaan Jauh dalam Pemetaan Agroekosistem.....	332
20.5 Agroekologi Digital: Peran Teknologi dalam Pengelolaan Sistem Pertanian	335
BAB 21 AGROEKOLOGI UNTUK KETAHANAN PANGAN DAN KEBERLANJUTAN GLOBAL	341
21.1 Hubungan Agroekologi dengan Ketahanan Pangan dan Gizi.....	341
21.2 Transisi dari Pertanian Konvensional menuju Sistem Agroekologis	343
21.3 Kebijakan dan Regulasi Pertanian Berkelanjutan di Tingkat Nasional dan Global.....	347
21.4 Peran Petani, Komunitas Lokal, dan Kearifan Tradisional dalam Agroekologi.....	349
21.5 Agenda Pengembangan dan Masa Depan Agroekologi di Indonesia	351
DAFTAR PUSTAKA	355
BIODATA PENULIS.....	407

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1: Ilustrasi Interaksi Tanah–Tanaman–Iklim dalam Sistem Agroekologi	2
Gambar 3.1: Penampakan ilustrasi struktur tanah	44
Gambar 3.2: Ilustrasi Hubungan porositas, aerasi, dan kapasitas tanah	47
Gambar 3.3: Ilustrasi Hubungan porositas, aerasi, dan kapasitas tanah	51
Gambar 3.4: Strategi Pengelolaan Sifat Fisika Tanah dalam Sistem Agroekologis	54
Gambar 5.1: Jaring-Jaring Makanan Ekosistem Tanah	73
Gambar 5.2: Diagram Siklus Nitrogen dalam Ekosistem	75
Gambar 5.3: Struktur Kolonisasi Jamur Endomikoriza pada Akar Tanaman.....	76
Gambar 5.4: Infografis Bakteri Penambat Nitrogen.....	78
Gambar 5.5: Mekanisme Pelarutan Fosfat oleh Bakteri (Phosphate Solubilizing Bacteria/PSB).....	80
Gambar 6.1: Fotosintesis	85
Gambar 6.2: Reaksi Terang Fotosintesis (Aliran Siklik dan Non Siklik)	86
Gambar 6.3: Reaksi Gelap (Siklus Calvin)	86
Gambar 6.4: Jalur Fotosintesis C4.....	88
Gambar 6.5: Jalur Fotosintesis CAM	89
Gambar 6.6: Tahapan Proses Respirasi	93
Gambar 6.7: Mekanisme Transpirasi.....	97
Gambar 6.8: Jalur Penyerapan Hara (Apoplas dan Simplas)	102

Gambar 7.1: Bagian-Bagian Morfologi Akar	110
Gambar 7.2: Tanaman Akar Tunggang	111
Gambar 7.3: Tanaman Akar Serabut	112
Gambar 7.4: Komponen Utama Rizosfer	113
Gambar 7.5: Mekanisme Adaptasi Tanaman terhadap Tekanan Lingkungani Melalui Mediasi Mikrobioma Rizhosfer	115
Gambar 8.1: Ilustrasi Siklus Hidrologi Pertanian	129
Gambar 8.2: Nilai Q Bulan Kering dan Bulan Basah	135
Gambar 8.3: Tipe Iklim dan Nilai Q	135
Gambar 9.1: Citra Satelit GRACE (a) 2002, (b) 2025	139
Gambar 9.2: Gletser Pegunungan Jayawijaya 2010-2018	140
Gambar 11.1: Siklus karbon organik jangka pendek dan jangka panjang meliputi produktivitas, sedimentasi, penguburan, dan pelapukan. Angka-angka tersebut merujuk pada cadangan karbon (dalam gigaton) dan fluks karbon (dalam gigaton tahun ⁻¹)	171
Gambar 11.2: Poses-proses utama dalam siklus nitrogen (N) di lingkungan muara sungai. Mineralisasi dan imobilisasi dapat berlangsung pada kondisi aerobik maupun anaerobic	173
Gambar 11.3: Peran unsur hara mikro dalam proses fisiologis dan metabolisme tanaman	177
Gambar 11.4: Sampling tanah menggunakan drone	179
Gambar 14.1: Contoh Sistem Agroforestri di Lapangan	219
Gambar 14.2: Struktur Vertikal (Multistrata) dalam Agroforestri	220
Gambar 14.3: Zona Interaksi Pohon dan Tanaman Semusim	222
Gambar 14.4: Contoh Agroforestri Pohon - Tanaman Semusim di Lapangan	223
Gambar 14.5: Perbandingan Naungan pada Tanaman Semusim	224

Gambar 14.6: Pengaruh Pohon terhadap Sifat Tanah dalam Sistem Agroforestri	225
Gambar 14.7: Pengaruh Pohon terhadap Iklim Mikro	227
Gambar 14.8: Mekanisme Pengaruh Pohon terhadap Tanah dan Iklim Mikro	228
Gambar 14.9: Kondisi Lahan dengan dan Tanpa Pohon	229
Gambar 14.10: Contoh Sistem Agroforestri dan Manfaat Konservasinya	231
Gambar 14.11: Agroforestri dan Ketahanan Pangan Rumah Tangga	232
Gambar 14.12: Peran Agroforestri Lokal dalam Konservasi dan Ketahanan Pangan	235
Gambar 14.13: Contoh Model Agroforestri Lokal di Berbagai Wilayah Indonesia	236
Gambar 16.1: Model ekonomi sirkular dalam daur ulang nutrisi.....	256
Gambar 16.2: Peran biofertilizer terhadap kesehatan tanah dan produksi tanaman.....	263
Gambar 19.1: Alur Penyediaan Jasa Ekosistem pada Sistem Ekologi-Ekonomi	309
Gambar 19.2: Jalur dari Struktur dan Proses Ekosistem Menuju Kesejahteraan Manusia (<i>Human Well-Being</i>).....	318
Gambar 19.3: Alur Hubungan TEV–PJE di Lahan Pertanian	320
Gambar 20.1: Overview ekosistem Internet of Things (IoT) di bidang pertanian	337
Gambar 20.2: Peran teknologi digital dalam pertanian	338
Gambar 20.3: Model manajemen cerdas dan arah pengembangan masa depan sistem produksi tanaman hortikultura.....	340
Gambar 21.1: Fase Tahapan Transisi Sistem Pertanian Dari Pertanian Konvensional Menuju Pertanian Agroekologis.....	346

DAFTAR TABEL

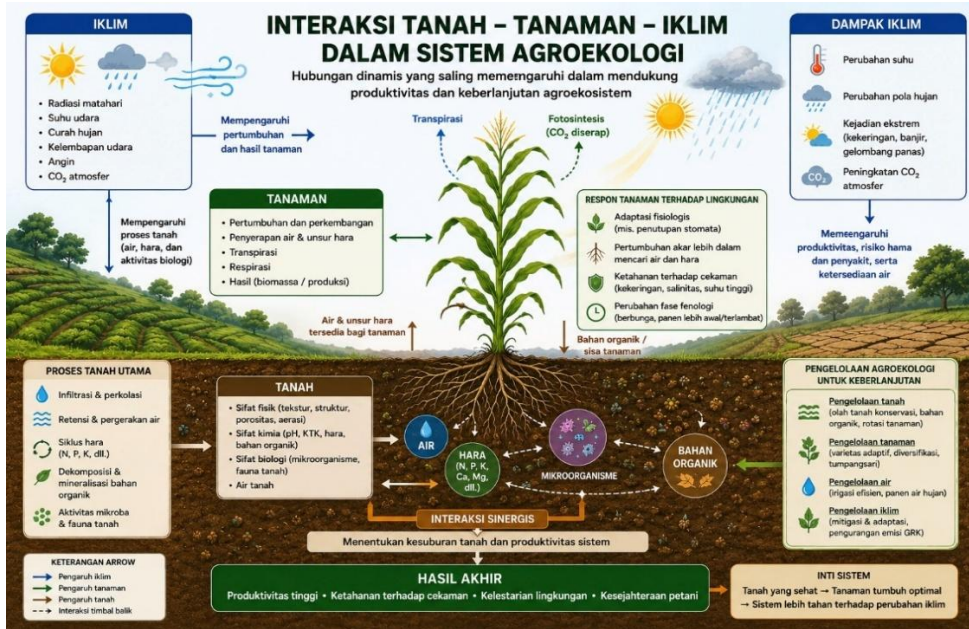
Tabel 9.1: Dampak Perubahan Iklim terhadap Produksi Padi di Indonesia.....	145
Tabel 10.1: Komponen Utama Neraca Air dalam Agroekosistem.....	156
Tabel 10.2: Keterkaitan Infiltrasi, Perkolasi, dan Aliran Permukaan dalam Agroekosistem	158
Tabel 10.3: Evapotranspirasi dalam Agroekosistem.....	161
Tabel 10.4: Strategi Pengelolaan Air	165
Tabel 10.5: Peran Vegetasi dalam Konservasi Air.....	168
Tabel 13.1: Keuntungan agroekologis polikultur dibanding monokultur	208
Tabel 13.2: Perbandingan polikultur tradisional dan modern di Indonesia.....	215
Tabel 14.1: Klasifikasi Agroforestri Berdasarkan Komponen Penyusun.....	218
Tabel 14.2: Klasifikasi Agroforestri Berdasarkan Pola Ruang dan Waktu.....	218
Tabel 14.3: Interaksi Pohon-Tanaman Semusim dalam Sistem Agroforestri	221
Tabel 14.4: Peran Agroforestri sebagai Strategi Konservasi	230
Tabel 14.5: Peran Agroforestri dalam Ketahanan Pangan	232
Tabel 14.6: Model Agroforestri Lokal di Kepulauan Indonesia	234
Tabel 14.7: Kontribusi Agroforestri Lokal terhadap Konservasi dan Ketahanan Pangan.....	234

BAB 1

PENGANTAR AGROEKOLOGI

Agroekologi berasal dari gabungan dua konsep utama, yaitu “agro” yang berarti pertanian dan “ekologi” yang berkaitan dengan hubungan timbal balik antara organisme hidup dan lingkungannya. Secara konseptual, agroekologi dapat didefinisikan sebagai pendekatan ilmiah yang mengintegrasikan prinsip-prinsip ekologi dalam sistem pertanian guna menciptakan praktik budidaya yang efisien, produktif, dan berkelanjutan. Melalui agroekologi, proses-proses alami yang terjadi di ekosistem dimanfaatkan untuk mendukung produktivitas pertanian tanpa mengabaikan keseimbangan ekologis.

Pendekatan agroekologi menekankan pada optimalisasi interaksi antar komponen biotik dan abiotik di dalam suatu sistem pertanian. Komponen biotik meliputi tanaman, hewan, mikroorganisme, serta manusia, sedangkan komponen abiotik terdiri atas tanah, air, udara, cahaya, suhu, dan unsur hara. Hubungan timbal balik antara kedua komponen tersebut diatur oleh prinsip-prinsip dasar ekologi, seperti aliran energi, siklus hara, serta keseimbangan populasi. Memahami dinamika ini, sistem pertanian dapat dikelola agar produktif sekaligus menjaga keberlanjutan sumber daya alam. Secara ilustrasi digambarkan sebagai berikut.



Gambar 1.1: Ilustrasi Interaksi Tanah–Tanaman–Iklim dalam Sistem Agroekologi

(Penulis, 2026)

1.1 Definisi dan Ruang Lingkup Agroekologi

1.1.1 Definisi Agroekologi

Agroekologi adalah pendekatan ilmiah, praktik pertanian, sekaligus gerakan sosial yang mengintegrasikan prinsip-prinsip ekologi ke dalam sistem pertanian untuk menciptakan produksi pangan yang berkelanjutan, ramah lingkungan, dan berkeadilan sosial. Agroekologi tidak hanya berfokus pada peningkatan hasil, tetapi juga pada keseimbangan antara manusia, tanaman, hewan, dan lingkungan.

Agroekologi mempelajari desain dan pengelolaan agroekosistem yang berkelanjutan dengan mempraktekkan proses alami serta menerapkan konsep dan prinsip ekologi dalam sistem pangan. Menurut Miguel Altieri, agroekologi merupakan ilmu yang mempelajari desain dan pengelolaan agroekosistem yang berkelanjutan dengan meniru proses alami. Sementara itu, Stephen R. Gliessman mendefinisikan agroekologi sebagai penerapan konsep

dan prinsip ekologi dalam merancang dan mengelola sistem pangan yang berkelanjutan.

1.1.2 Ruang Lingkup Agroekologi

Ruang lingkup agroekologi sangat luas karena mencakup berbagai dimensi yang saling terkait, yaitu:

1. Aspek Ekologis
 - Interaksi antara tanaman, tanah, air, mikroorganisme, dan hewan
 - Siklus nutrisi dan energi dalam agroekosistem
 - Keanekaragaman hayati (biodiversity)
2. Aspek Agronomis
 - Teknik budidaya ramah lingkungan (tanpa atau minim bahan kimia sintetis)
 - Sistem tanam seperti tumpangsari, rotasi tanaman, dan agroforestri
 - Pengelolaan tanah dan kesuburan alami
3. Aspek Sosial dan Ekonomi
 - Kesejahteraan petani
 - Keadilan akses terhadap sumber daya (lahan, air, benih)
 - Sistem pasar lokal dan ekonomi berbasis komunitas
4. Aspek Teknologi dan Inovasi Lokal
 - Pemanfaatan pengetahuan lokal (local wisdom)
 - Teknologi tepat guna dan adaptif terhadap lingkungan setempat
5. Aspek Kebijakan dan Kelembagaan
 - Regulasi pertanian berkelanjutan
 - Peran pemerintah dan lembaga dalam mendukung praktik agroekologi

Cakupan Sistem dalam Agroekologi

Agroekologi tidak hanya melihat lahan pertanian sebagai unit produksi, tetapi sebagai agroekosistem yang kompleks, meliputi:

- Produksi tanaman (pangan, hortikultura, perkebunan)
- Peternakan terintegrasi
- Perikanan berbasis ekosistem
- Pengelolaan limbah dan daur ulang nutrisi

Agroekologi merupakan pendekatan holistik yang menggabungkan ilmu, praktik, dan nilai sosial dalam pertanian. Ruang lingkupnya mencakup aspek ekologis, teknis, sosial, hingga kebijakan, dengan tujuan utama menciptakan sistem pangan yang berkelanjutan, tangguh, dan adil.

1.2 Sejarah Perkembangan Agroekologi sebagai Disiplin Ilmu

Agroekologi merupakan disiplin ilmu yang memadukan prinsip-prinsip ekologi dengan sistem pertanian. Perkembangannya berlangsung secara bertahap, mulai dari pembahasan hubungan tanaman dengan lingkungan hingga menjadi pendekatan ilmiah, praktik pertanian, dan gerakan pembangunan berkelanjutan. Agroekologi berkembang dari integrasi antara ilmu ekologi dan pertanian yang mulai mendapat perhatian sejak pertengahan abad ke-20. Pada awalnya, pendekatan ini lebih banyak digunakan untuk memahami interaksi antara tanaman, tanah, dan organisme lain dalam sistem pertanian secara alami. Namun, dalam dua dekade terakhir, agroekologi mengalami perluasan makna menjadi tidak hanya pendekatan ilmiah, tetapi juga praktik pertanian dan gerakan sosial yang menekankan keberlanjutan dan keadilan sistem pangan (Wezel et al., 2020).

Perkembangan agroekologi modern tidak terlepas dari kritik terhadap sistem pertanian intensif berbasis Revolusi Hijau yang dinilai menyebabkan degradasi lingkungan, kehilangan biodiversitas, dan ketergantungan terhadap input eksternal seperti pupuk kimia dan pestisida. Seiring meningkatnya kesadaran global terhadap perubahan iklim dan ketahanan pangan, agroekologi mulai diakui sebagai pendekatan yang mampu menjawab

tantangan tersebut melalui sistem produksi yang lebih adaptif dan berbasis ekosistem (HLPE, 2021). Dalam konteks global, agroekologi juga telah diadopsi dalam berbagai kebijakan pangan dan pertanian berkelanjutan, termasuk oleh FAO sebagai salah satu strategi transformasi sistem pangan dunia.

Sejarah perkembangan Agroekologi sebagai berikut:

1. Periode Awal: Dasar Ekologi Pertanian (1900–1930)

Pada awal abad ke 20, para ilmuwan mulai menerapkan konsep ekologi dalam sektor pertanian. Fokus utama saat itu adalah memahami hubungan antara tanaman budidaya dengan faktor lingkungan seperti tanah, iklim, air, dan organisme lain.

Tokoh penting pada periode ini adalah Basil Bensin yang pada tahun 1928 menggunakan istilah "agroecology" untuk menggambarkan penerapan metode ekologi terhadap tanaman pertanian.

Karakteristik periode ini:

- Agroekologi dipandang sebagai cabang agronomi.
- Fokusnya tertuju pada tanaman individu dan lingkungannya.
- Pendekatan masih bersifat biofisik dan ekologis murni.

2. Periode Ekologi Sistem Pertanian (1930–1960)

Perkembangan ilmu ekologi mendorong para peneliti untuk melihat lahan pertanian sebagai suatu ekosistem. Sistem pertanian tidak lagi dipahami hanya sebagai kumpulan tanaman, tetapi sebagai interaksi antara:

- Tanaman
- Tanah
- Mikroorganisme
- Hama dan musuh alami
- Iklim
- Manusia sebagai pengelola

Pada periode ini lahir konsep **agroekosistem** (agroecosystem), yaitu ekosistem yang dibentuk dan dikelola manusia untuk menghasilkan pangan dan produk pertanian.

3. Periode Kritik terhadap Revolusi Hijau (1960–1980)

Keberhasilan Revolusi Hijau meningkatkan produksi pangan dunia melalui penggunaan:

- Varietas unggul
- Pupuk sintetis
- Pestisida kimia
- Mekanisasi pertanian

Namun, berbagai dampak negatif mulai muncul, antara lain:

- Degradasi tanah
- Pencemaran air
- Hilangnya keanekaragaman hayati
- Resistensi hama
- Ketergantungan petani pada input eksternal

Kondisi tersebut mendorong ilmuwan untuk mencari sistem pertanian yang lebih berkelanjutan. Agroekologi mulai berkembang sebagai alternatif terhadap pertanian industrial.

4. Periode Agroekologi Modern (1980–2000)

Periode ini ditandai oleh kontribusi besar dari Miguel Altieri yang dianggap sebagai salah satu pelopor agroekologi modern.

Altieri mendefinisikan agroekologi sebagai ilmu yang mempelajari struktur, fungsi, dan pengelolaan agroekosistem berdasarkan prinsip-prinsip ekologi.

Konsep-konsep penting yang berkembang:

- Diversifikasi tanaman
- Pengendalian hayati

- Daur ulang unsur hara
- Konservasi tanah dan air
- Integrasi tanaman–ternak
- Kearifan lokal petani

Pada fase ini agroekologi mulai menjadi disiplin ilmu yang berdiri sendiri dan diajarkan di berbagai perguruan tinggi.

5. Periode Agroekologi sebagai Pendekatan Pembangunan Berkelanjutan (2000–Sekarang)

Sejak awal abad ke-21, agroekologi berkembang tidak hanya sebagai ilmu, tetapi juga sebagai:

1. **Disiplin ilmiah** (science)
2. **Praktik pertanian** (practice)
3. **Gerakan sosial** (movement)

Pendekatan agroekologi mencakup aspek:

- Ekologi
- Ekonomi
- Sosial
- Budaya
- Kebijakan

Organisasi internasional seperti Food and Agriculture Organization mendorong agroekologi sebagai salah satu strategi mencapai sistem pangan berkelanjutan, ketahanan pangan, dan adaptasi perubahan iklim.

Prinsip-prinsip yang banyak digunakan saat ini meliputi:

- Keanekaragaman (diversity)
- Sinergi (synergy)
- Efisiensi sumber daya
- Daur ulang (recycling)

- Ketahanan (resilience)
- Nilai sosial dan budaya
- Tata kelola yang bertanggung jawab

Perkembangan agroekologi menunjukkan pergeseran paradigma dari pertanian yang berorientasi pada peningkatan produksi semata menuju sistem pertanian yang memperhatikan keseimbangan ekologi, kesejahteraan petani, dan keberlanjutan lingkungan. Saat ini agroekologi tidak hanya menjadi cabang ilmu dalam pertanian, tetapi telah berkembang menjadi pendekatan multidisiplin yang mengintegrasikan ilmu lingkungan, agronomi, sosial ekonomi, dan pembangunan berkelanjutan untuk mewujudkan sistem pangan yang tangguh dan berkelanjutan.

1.3 Prinsip-Prinsip Dasar Agroekologi

Agroekologi didasarkan pada sejumlah prinsip yang menekankan keseimbangan antara produktivitas, keberlanjutan lingkungan, dan kesejahteraan sosial. Salah satu prinsip utama adalah diversifikasi sistem pertanian, yang bertujuan meningkatkan stabilitas ekosistem dan mengurangi risiko kegagalan panen. Diversifikasi dapat dilakukan melalui rotasi tanaman, tumpangsari, maupun integrasi tanaman dan ternak (Tamburini et al., 2020).

Prinsip lain adalah efisiensi penggunaan sumber daya alami, seperti air, nutrisi tanah, dan energi, dengan meminimalkan ketergantungan pada input eksternal. Agroekologi juga menekankan pentingnya daur ulang biomassa dan peningkatan kesehatan tanah melalui praktik organik dan konservasi (Dumont et al., 2021). Selain aspek biofisik, agroekologi mencakup dimensi sosial, seperti partisipasi petani, pengetahuan lokal, dan keadilan dalam distribusi sumber daya. Hal ini menunjukkan bahwa agroekologi bukan hanya pendekatan teknis, tetapi juga sistem nilai yang mengintegrasikan aspek ekologi dan sosial dalam pertanian (HLPE, 2021).

Sepuluh Prinsip-prinsip agroekologi bertujuan meningkatkan produktivitas pertanian sekaligus menjaga kelestarian lingkungan, kesejahteraan petani, dan keberlanjutan sumber daya alam yang diuraikan sebagai berikut.

1. Keanekaragaman (Diversity)

Keanekaragaman merupakan prinsip utama agroekologi. Sistem pertanian yang beragam cenderung lebih stabil, produktif, dan tahan terhadap gangguan lingkungan.

Penerapan:

- Polikultur (tanam campuran)
- Rotasi tanaman
- Agroforestri
- Integrasi tanaman dan ternak
- Pemanfaatan varietas lokal

Manfaat:

- Mengurangi risiko gagal panen
- Menekan serangan hama dan penyakit
- Meningkatkan stabilitas produksi
- Memperkaya keanekaragaman hayati

2. Sinergi (Synergy)

Agroekologi mengembangkan hubungan saling menguntungkan antar komponen agroekosistem.

Contoh:

- Leguminosa mengikat nitrogen untuk tanaman lain.
- Ternak menghasilkan pupuk organik bagi tanaman.
- Musuh alami membantu mengendalikan populasi hama.

Manfaat:

- Meningkatkan efisiensi sistem
- Mengurangi kebutuhan input eksternal
- Memperkuat keseimbangan ekologis

3. Daur Ulang Sumber Daya (Recycling)

Agroekologi menekankan pemanfaatan kembali biomassa dan limbah pertanian sehingga siklus unsur hara dapat berlangsung secara alami.

Penerapan:

- Pengomposan
- Pupuk kandang
- Pupuk hijau
- Pemanfaatan residu tanaman

Manfaat:

- Mengurangi limbah
- Memperbaiki kesuburan tanah
- Menurunkan ketergantungan pada pupuk sintetis

4. Efisiensi Penggunaan Sumber Daya (Efficiency)

Sistem agroekologi berupaya memaksimalkan pemanfaatan sumber daya lokal secara efisien.

Meliputi:

- Air
- Energi
- Unsur hara
- Lahan
- Tenaga kerja

Contoh:

- Irigasi hemat air
- Mulsa organik
- Pemanfaatan mikroorganisme tanah

Manfaat:

- Menurunkan biaya produksi
- Mengurangi dampak lingkungan
- Meningkatkan keuntungan usaha tani

5. Ketahanan dan Resiliensi (Resilience)

Agroekosistem harus mampu beradaptasi terhadap gangguan seperti:

- Perubahan iklim
- Kekeringan
- Banjir
- Serangan organisme pengganggu tanaman
- Fluktuasi pasar

Penerapan:

- Diversifikasi usaha tani
- Penggunaan varietas adaptif
- Konservasi tanah dan air

Manfaat:

- Mengurangi kerentanan petani
- Menjaga keberlanjutan produksi

6. Konservasi dan Peningkatan Kesehatan Tanah

Tanah dipandang sebagai sumber daya hidup yang harus dijaga kualitas fisik, kimia, dan biologinya.

Penerapan:

- Penambahan bahan organik
- Tanaman penutup tanah
- Pengolahan tanah minimum
- Pengendalian erosi

Manfaat:

- Meningkatkan produktivitas jangka panjang
- Memperbaiki siklus unsur hara
- Meningkatkan kapasitas simpan air

7. Pengendalian Hayati dan Regulasi Ekologis

Agroekologi memanfaatkan mekanisme alami dalam mengendalikan organisme pengganggu tanaman.

Contoh:

- Pemanfaatan predator dan parasitoid
- Tanaman refugia
- Diversifikasi habitat

Manfaat:

- Mengurangi penggunaan pestisida kimia
- Menjaga keseimbangan ekosistem
- Menurunkan risiko resistensi hama

8. Keadilan Sosial dan Ekonomi

Agroekologi tidak hanya memperhatikan aspek lingkungan tetapi juga kesejahteraan masyarakat.

Prinsip ini mencakup:

- Keadilan akses sumber daya
- Peningkatan pendapatan petani
- Kesetaraan gender
- Perlindungan hak petani

Tujuan:

- Mewujudkan pembangunan pertanian yang inklusif dan berkelanjutan.

9. Pelestarian Pengetahuan Lokal

Agroekologi menghargai dan mengintegrasikan pengetahuan tradisional masyarakat dengan inovasi ilmiah modern.

Contoh:

- Sistem pertanian adat
- Penggunaan varietas lokal
- Teknik konservasi tradisional

Manfaat:

- Memperkuat identitas lokal
- Mendukung inovasi berbasis kearifan lokal
- Menjaga keberlanjutan sumber daya genetik

10. Tata Kelola yang Bertanggung Jawab (Responsible Governance)

Pengelolaan sistem pangan dan pertanian harus melibatkan berbagai pemangku kepentingan secara partisipatif.

Melibatkan:

- Petani
- Pemerintah
- Akademisi
- Dunia usaha
- Masyarakat

Tujuan:

- Menciptakan kebijakan yang mendukung pertanian berkelanjutan.

Ringkasan Prinsip Agroekologi Menurut FAO

Food and Agriculture Organization mengembangkan 10 elemen agroekologi yang menjadi acuan internasional:

1. Keanekaragaman (*Diversity*)
2. Sinergi (*Synergy*)
3. Efisiensi (*Efficiency*)
4. Ketahanan (*Resilience*)
5. Daur ulang (*Recycling*)
6. Ko-kreasi dan berbagi pengetahuan (*Co-creation and sharing of knowledge*)
7. Nilai kemanusiaan dan sosial (*Human and social values*)
8. Budaya dan tradisi pangan (*Culture and food traditions*)
9. Tata kelola yang bertanggung jawab (*Responsible governance*)
10. Ekonomi sirkular dan solidaritas (*Circular and solidarity economy*)

Agroekologi menjadi landasan penting dalam mewujudkan pertanian produktif, ramah lingkungan, dan berkelanjutan. Prinsip-prinsip dasar agroekologi menekankan pengelolaan agroekosistem yang memanfaatkan proses-proses ekologis alami, menjaga keanekaragaman hayati, meningkatkan efisiensi penggunaan sumber daya, memperkuat ketahanan sistem pertanian, serta memperhatikan aspek sosial dan ekonomi masyarakat.

1.4 Hubungan Agroekologi dengan Ilmu Pertanian Konvensional

Agroekologi dan pertanian konvensional memiliki hubungan yang kompleks, baik dalam bentuk perbedaan pendekatan maupun potensi integrasi. Pertanian konvensional umumnya berfokus pada peningkatan produksi melalui penggunaan teknologi modern, varietas unggul, dan input kimia dalam skala besar. Pendekatan ini terbukti mampu meningkatkan hasil panen dalam jangka pendek, namun seringkali mengabaikan dampak jangka panjang terhadap lingkungan (Bezner Kerr et al., 2021).

Sebaliknya, agroekologi menekankan pendekatan berbasis ekosistem yang mempertimbangkan interaksi alami dalam sistem pertanian. Meskipun demikian, kedua pendekatan ini tidak selalu harus diposisikan sebagai oposisi. Dalam praktiknya, terdapat peluang untuk mengintegrasikan prinsip

agroekologi ke dalam sistem pertanian konvensional, seperti melalui pengurangan input kimia, peningkatan biodiversitas, dan penerapan praktik konservasi tanah (Tamburini et al., 2020). Integrasi ini penting untuk menciptakan sistem pertanian yang lebih berkelanjutan tanpa mengorbankan produktivitas.

Namun, asumsi bahwa integrasi tersebut mudah dilakukan perlu diuji secara kritis. Hambatan struktural seperti kebijakan pertanian, pasar, dan preferensi petani terhadap sistem yang sudah mapan sering menjadi kendala utama. Oleh karena itu, transformasi menuju sistem agroekologi memerlukan perubahan tidak hanya pada tingkat teknis, tetapi juga pada aspek kelembagaan dan kebijakan (HLPE, 2021).

1.5 Peran Agroekologi dalam Pembangunan Pertanian Berkelanjutan

Pembangunan berkelanjutan menurut Undang- Undang Republik Indonesia Nomor 32 Tahun 2009 tentang Perlindungan dan pengelolaan lingkungan hidup adalah Pembangunan berkelanjutan adalah upaya sadar dan terencana yang memadukan aspek lingkungan hidup, sosial, dan ekonomi ke dalam strategi pembangunan untuk menjamin keutuhan lingkungan hidup serta keselamatan, kemampuan, kesejahteraan, dan mutu hidup generasi masa kini dan generasi masa depan.

Agroekologi adalah pendekatan ilmiah, praktik pertanian, sekaligus gerakan sosial yang mengintegrasikan prinsip-prinsip ekologi ke dalam sistem pertanian untuk menciptakan produksi pangan yang berkelanjutan, ramah lingkungan, dan berkeadilan sosial. Agroekologi tidak hanya berfokus pada peningkatan hasil, tetapi juga pada keseimbangan antara manusia, tanaman, hewan, dan lingkungan.

Menurut Undang- Undang Republik Indonesia Nomor 32 Tahun 2009 Rencana perlindungan dan pengelolaan lingkungan hidup yang selanjutnya disingkat RPPLH adalah perencanaan tertulis yang memuat potensi, masalah lingkungan hidup, serta Upaya perlindungan dan pengelolaannya dalam kurun waktu tertentu.

Ekosistem adalah tatanan unsur lingkungan hidup yang merupakan kesatuan utuh menyeluruh dan saling mempengaruhi dalam membentuk keseimbangan, stabilitas, dan

produktivitas lingkungan hidup.

1. Agroekologi sebagai Pendekatan Pengelolaan Sumber Daya Alam

Agroekologi memandang lahan pertanian sebagai suatu agroekosistem yang terdiri atas komponen biotik dan abiotik yang saling berinteraksi.

Melalui pendekatan ini, pengelolaan tanah, air, tanaman, hewan, mikroorganisme, dilakukan secara terpadu untuk menjaga fungsi ekologis ekosistem pertanian.

Kontribusi terhadap keberlanjutan: Mencegah degradasi lahan, Mengurangi erosi tanah., Mempertahankan kesuburan tanah, Menjaga kualitas sumber daya air, Mengurangi pencemaran lingkungan.

2. Meningkatkan Kesehatan dan Kesuburan Tanah

Tanah merupakan fondasi utama sistem pertanian. Agroekologi berupaya mempertahankan dan meningkatkan kesehatan tanah melalui: penggunaan bahan organik, pupuk hijau, kompos, mulsa, tanaman penutup tanah, pengolahan tanah minimum. Hal tersebut berdampak positif pada peningkatan kandungan bahan organik tanah, aktivitas mikroorganisme tanah lebih tinggi, struktur tanah lebih baik, kapasitas menahan air meningkat, dan produktivitas lahan berkelanjutan.

3. Konservasi Keanekaragaman Hayati

Sistem pertanian konvensional sering menyebabkan penyederhanaan ekosistem melalui praktik monokultur. Agroekologi mendorong diversifikasi sistem produksi dalam bentuk penerapan: Polikultur; Rotasi tanaman; Agroforestri; Integrasi tanaman dan ternak; Pemanfaatan varietas lokal. Sistem ini bermanfaat untuk menjaga keanekaragaman genetic, meningkatkan stabilitas ekosistem, menyediakan habitat bagi organisme bermanfaat dan memperkuat jasa ekosistem.

4. Mengurangi Ketergantungan terhadap Input Kimia

Agroekologi mengutamakan proses biologis dan ekologis dibandingkan penggunaan input sintetis. Penggantian input kimia dengan kompos, pupuk kandang, pupuk hijau. Juga penggantian pestisida kimia dengan pengendalian hayati, Herbisida dengan pengelolaan gulma terpadu. Hal ini akan memberikan manfaat untuk menurunkan biaya produksi, mengurangi pencemaran lingkungan, dan menjaga kesehatan petani dan konsumen.

5. Mendukung Ketahanan Pangan

Agroekologi berkontribusi terhadap ketahanan pangan melalui peningkatan produktivitas yang berkelanjutan dan diversifikasi produksi. Kontribusinya dalam hal menjamin ketersediaan pangan, meningkatkan kualitas gizi, mengurangi risiko gagal panen dan menstabilkan produksi dalam jangka panjang. Sistem pertanian yang beragam menghasilkan berbagai jenis pangan yang mendukung keamanan dan kedaulatan pangan masyarakat.

6. Meningkatkan Ketahanan terhadap Perubahan Iklim

Perubahan iklim menjadi tantangan utama pembangunan pertanian abad ke-21. Agroekologi membantu petani beradaptasi melalui Diversifikasi tanaman; Agroforestri; Konservasi air; Penggunaan varietas adaptif; Pengelolaan bahan organik tanah.

Sistem Agroekologi memberikan manfaat pada mengurangi dampak kekeringan, mengurangi risiko banjir, menstabilkan produksi, meningkatkan kemampuan adaptasi petani. Selain itu, agroekologi berkontribusi pada mitigasi perubahan iklim melalui peningkatan penyimpanan karbon dalam tanah dan vegetasi.

7. Mendukung Ekonomi Petani yang Berkelanjutan

Pembangunan pertanian berkelanjutan tidak hanya berkaitan dengan lingkungan tetapi juga kesejahteraan petani. Sistem Agroekologi dapat membantu dalam pengurangan biaya input eksternal, memanfaatkan sumber daya lokal, meningkatkan nilai tambah produk dan membuka peluang pasar produk ramah lingkungan dan organik. Hal tersebut

berdampak ekonomi pada pendapatan petani lebih stabil, risiko usaha tani menurun, dan kemandirian petani meningkat.

8. Memperkuat Dimensi Sosial dan Budaya

Bentuk implementasi dari pelestarian varietas lokal, pengembangan teknologi berbasis masyarakat dan partisipasi petani dalam pengambilan keputusan, pengetahuan lokal dan kearifan tradisional, pengelolaan sumber daya alam, dan penguatan kelembagaan petani. dalam meningkatkan kapasitas masyarakat, berdampak positif pada penguatan dimensi sosial budaya.

9. Mendukung Pencapaian Tujuan Pembangunan Berkelanjutan (SDGs)

Agroekologi berkontribusi langsung terhadap berbagai tujuan dalam United Nations Sustainable Development Goals (SDGs). SDGs yang terkait antara lain SDGs 1: Tanpa kemiskinan, SDGs 2: Tanpa kelaparan, SDGs 3: Kehidupan sehat, SDGs 6: Air bersih, SDGs 12: Konsumsi dan produksi berkelanjutan, SDGs 13: Penanganan perubahan iklim, SDGs 15: Ekosistem daratan.

Agroekologi memiliki peran strategis dalam pembangunan pertanian berkelanjutan karena mampu mengintegrasikan aspek ekologi, ekonomi, dan sosial secara seimbang. Melalui konservasi sumber daya alam, peningkatan kesehatan tanah, pengurangan ketergantungan terhadap input kimia, penguatan ketahanan pangan, adaptasi perubahan iklim, serta pemberdayaan masyarakat tani, agroekologi menjadi salah satu pendekatan yang paling relevan untuk mewujudkan sistem pertanian yang produktif, tangguh, adil, dan berkelanjutan.

Perspektif ilmu lingkungan dan agroekologi modern, keberhasilan pembangunan pertanian tidak hanya diukur dari peningkatan hasil produksi, tetapi juga dari kemampuan sistem pertanian dalam menjaga fungsi ekosistem, meningkatkan kesejahteraan petani, dan menjamin keberlanjutan sumber daya alam bagi generasi mendatang.

BAB 2

TANAH SEBAGAI KOMPONEN UTAMA AGROEKOSISTEM

2.1 Definisi, Fungsi, dan Peran Tanah dalam Ekosistem Pertanian

Tanah merupakan komponen utama dalam agroekosistem yang berperan menjadi media tumbuh untuk tanaman sekaligus penyedia elemen hara yang diperlukan untuk mendukung pertumbuhan serta perkembangan tanaman. Secara ilmiah, tanah terdefinisikan merupakan lapisan permukaan bumi yang dibentuk dari hasil pelapukan batuan serta bahan organik melalui proses fisika, kimia, dan biologi dalam jangka waktu yang panjang. Dalam konteks pertanian, tanah selain mempunyai fungsi menjadi tempat perakaran, juga merupakan sistem kompleks yang mengatur ketersediaan air, udara, serta aktivitas mikroorganisme yang berperan dalam siklus nutrisi. Tanah yang sehat akan mampu mendukung produktivitas tanaman secara optimal, sedangkan tanah yang mengalami degradasi akan berdampak pada penurunan hasil pertanian (Hartmann and Six, 2022).

Fungsi tanah dalam ekosistem pertanian sangat beragam, mencakup fungsi fisik, kimia, dan biologis yang saling berinteraksi satu sama lain secara dinamis. Secara fisik, tanah berperan sebagai penopang tanaman dan pengatur tata air melalui kemampuan menyimpan serta mengalirkan air. Secara kimia, tanah menjadi sumber utama unsur hara makro dan mikro yang diperlukan tanaman untuk proses metabolisme. Sementara itu, secara biologis, tanah menjadi habitat untuk beragam organisme semisal bakteri, fungi, serta *fauna* tanah yang berperan pada dekomposisi bahan organik serta siklus hara. Peran tanah dalam agroekosistem juga berkaitan erat dengan keberlanjutan produksi pertanian, karena kualitas tanah akan menentukan tingkat kesuburan dan efisiensi penggunaan input pertanian. Pengelolaan tanah yang tepat

menjadi kunci dalam menjaga keseimbangan ekosistem pertanian secara keseluruhan dan berkelanjutan (Audette *et al.*, 2021).

Peran tanah dalam agroekosistem tidak dapat dipisahkan dari kemampuannya dalam mendukung siklus biogeokimia yang menjadi dasar keberlanjutan sistem pertanian. Tanah berfungsi sebagai tempat berlangsungnya transformasi unsur hara melalui proses mineralisasi, immobilisasi, nitrifikasi, dan denitrifikasi yang dilakukan oleh mikroorganisme tanah. Proses-proses tersebut sangat penting dalam menentukan ketersediaan unsur hara bagi tanaman secara alami. Selain itu, tanah juga berperan dalam menyaring dan menetralkan berbagai zat berbahaya sehingga mampu menjaga kualitas lingkungan pertanian. Kemampuan tanah dalam menahan dan melepaskan unsur hara secara bertahap menjadikannya sebagai sistem penyangga yang penting dalam menjaga stabilitas produksi pertanian. Oleh karena itu, tanah selain berperan sebagai media pasif, juga sebagai komponen aktif yang menentukan keberhasilan sistem agroekosistem secara keseluruhan dalam jangka panjang dan berkelanjutan.

Dalam pertanian modern, fungsi tanah sering mengalami tekanan akibat penggunaan input kimia yang berlebihan serta pengelolaan lahan yang kurang memperhatikan prinsip keberlanjutan. Penggunaan pupuk sintetis dan pestisida secara terus-menerus tanpa diimbangi dengan pengelolaan bahan organik dapat menyebabkan ketidakseimbangan dalam sistem tanah. Secara fisik, tanah menjadi lebih padat dan kehilangan struktur remah yang penting bagi pertumbuhan akar. Dari sisi kimia, terjadi penurunan kandungan unsur hara tertentu serta gangguan keseimbangan pH tanah. Sementara itu, secara biologis, aktivitas mikroorganisme tanah cenderung menurun akibat paparan bahan kimia yang berlebihan. Kondisi ini menunjukkan bahwa pengelolaan tanah yang tidak bijaksana dapat mengganggu fungsi alami tanah sebagai sistem hidup yang kompleks dan dinamis.

Dampak dari degradasi tanah tersebut dapat terlihat dari menurunnya produktivitas tanaman serta meningkatnya ketergantungan terhadap input eksternal seperti pupuk dan pestisida. Berkurangnya kandungan bahan organik menyebabkan tanah kehilangan kemampuan dalam menyimpan air dan unsur hara, sehingga tanaman menjadi lebih rentan terhadap stres lingkungan. Selain itu, menurunnya aktivitas mikroorganisme tanah menghambat proses

dekomposisi dan mineralisasi, yang berperan penting dalam menyediakan nutrisi bagi tanaman. Erosi tanah yang meningkat juga memperparah kondisi ini dengan menghilangkan lapisan atas tanah yang paling subur. Jika kondisi ini terus berlanjut, maka keberlanjutan sistem pertanian akan terancam, baik dari segi produktivitas maupun kelestarian lingkungan.

Pendekatan pengelolaan tanah yang ramah lingkungan serta berkesinambungan adalah solusi utama untuk menjaga fungsi tanah tetap optimal. Praktik seperti pemakaian pupuk organik, rotasi tanaman, penanaman tanaman penutup tanah, serta pengolahan tanah minimum dapat membantu memperbaiki kondisi tanah secara menyeluruh. Penerapan konservasi tanah serta air juga penting untuk mencegah erosi serta menjaga kestabilan struktur tanah. Pendekatan tersebut selain ditujukan demi meningkatkan produktivitas tanaman, juga agar memelihara keseimbangan ekosistem tanah. Pengelolaan tanah secara berkelanjutan adalah kunci menciptakan sistem pertanian secara efisien, produktif, serta ramah lingkungan (Li *et al.*, 2025).

Tanah juga mempunyai peranan krusial untuk memelihara kesetimbangan air dalam agroekosistem melalui kemampuannya dalam menyerap, menyimpan, dan mendistribusikan air. Struktur tanah yang baik mendukung infiltrasi air berjalan optimal sehingga dapat mengurangi limpasan permukaan dan risiko erosi. Selain itu, porositas tanah yang ideal akan mendukung ketersediaan air bagi tanaman dalam jumlah yang cukup, terutama pada kondisi kekeringan. Tanah dengan kandungan bahan organik tinggi berkecenderungan mempunyai kapasitas menahan air yang relatif baik daripada tanah yang miskin bahan organik. Oleh karena itu, pengelolaan bahan organik menjadi salah satu faktor penting dalam meningkatkan fungsi hidrologis tanah. Peran ini sangat krusial dalam sistem pertanian yang bergantung pada ketersediaan air, sehingga kualitas tanah harus selalu dijaga untuk memastikan produktivitas tanaman tetap stabil sepanjang musim tanam berlangsung.

Selain sebagai media tumbuh, tanah juga berperan sebagai penyimpan karbon yang berkontribusi dalam mitigasi perubahan iklim global. Kandungan bahan organik di tanah adalah bentuk penyimpanan karbon yang berasal dari sisa-sisa tanaman dan organisme yang terdekomposisi. Tanah yang dikelola dengan baik mampu menyimpan karbon dalam jumlah besar sehingga dapat mengurangi emisi karbon dioksida ke atmosfer. Sebaliknya, pengelolaan tanah

yang buruk dapat menyebabkan pelepasan karbon ke udara sehingga mempercepat proses pemanasan global. Oleh karena itu, praktik pertanian konservasi seperti pengolahan tanah minimum, penggunaan mulsa, dan penanaman tanaman penutup tanah menjadi sangat penting dalam menjaga kandungan karbon tanah. Tanah selain berperan dalam produksi pertanian, juga menjaga keseimbangan lingkungan global berkelanjutan dalam jangka panjang (Liang *et al.*, 2025).

Peran strategis tanah dalam agroekosistem selain sebagai media tumbuh tanaman, juga sebagai pusat kehidupan berbagai organisme yang membentuk suatu ekosistem yang kompleks dan dinamis. Tanah menjadi habitat bagi mikroorganisme seperti bakteri, jamur, dan aktinomisetes, serta *fauna* tanah seperti cacing, nematoda, dan serangga. Keberadaan organisme-organisme tersebut berkontribusi dalam menjaga keseimbangan ekosistem tanah melalui berbagai aktivitas biologis. Misalnya, mikroorganisme mempunyai peranan pada proses mineralisasi unsur hara, sedangkan *fauna* tanah membantu pencampuran bahan organik dengan mineral tanah, sehingga meningkatkan kesuburan tanah alami.

Organisme tanah memiliki peranan krusial pula untuk perbaikan sifat fisik tanah, seperti struktur dan porositas. Aktivitas cacing tanah, misalnya, dapat membentuk liang-liang yang meningkatkan aerasi dan infiltrasi air, sehingga tanah menjadi lebih gembur dan mampu menahan air dengan baik. Kondisi ini sangat mendukung pertumbuhan akar tanaman karena akar dapat berkembang dengan lebih optimal dalam tanah yang memiliki struktur baik. Proses dekomposisi bahan organik oleh mikroorganisme menghasilkan humus yang berfungsi sebagai perekat agregat tanah serta sumber nutrisi yang tersedia secara bertahap bagi tanaman.

Interaksi antara organisme tanah dengan tanaman juga menjadi faktor kunci dalam meningkatkan efisiensi penyerapan unsur hara. Salah satu contoh yang paling penting adalah hubungan simbiosis antara akar tanaman dan mikoriza, yang mampu memperluas daerah jelajah akar sehingga penyerapan unsur hara, terutama fosfor, menjadi lebih efektif. Keberadaan bakteri pelarut fosfat dan bakteri penambat nitrogen turut mendukung ketersediaan unsur hara esensial bagi tanaman. Dengan demikian, keanekaragaman hayati dalam tanah selain

mencerminkan tingkat kesehatan tanah, juga berperan langsung dalam meningkatkan produktivitas dan keberlanjutan sistem pertanian.

2.2 Komponen Fisik, Kimia, dan Biologi Tanah

Tanah tersusun atas berbagai komponen yang saling berinteraksi membentuk suatu sistem yang kompleks dan dinamis. Secara umum, komponen tanah bisa dipilah ke dalam tiga kelompok pokok, yakni komponen fisik, kimia, serta biologis. Ketiga komponen tersebut memiliki peran yang sangat krusial pada penentuan tingkat kesuburan serta produktivitas tanah. Komponen fisik berkaitan dengan sifat tanah yang bisa diamati secara langsung seperti tekstur, struktur, porositas, dan kerapatan massa tanah. Komponen kimia mencakup kandungan unsur hara, pH tanah, kapasitas tukar kation, serta kandungan bahan organik yang berperan dalam menyediakan nutrisi bagi tanaman. Komponen biologis melibatkan keberadaan organisme hidup dalam tanah yang memiliki peran pada proses dekomposisi serta siklus hara. Interaksi ketiga komponen ini sangat menentukan kualitas tanah dalam mendukung pertumbuhan tanaman secara optimal (Kumar *et al.*, 2025).

Komponen fisik tanah merupakan aspek yang sangat penting dalam menentukan kemampuan tanah dalam mendukung pertumbuhan tanaman. Tekstur tanah yang terdiri dari perbandingan fraksi pasir, debu, dan liat akan memengaruhi kemampuan tanah dalam menahan air dan unsur hara. Tanah dengan tekstur halus semisal liat cenderung mempunyai kapasitas menahan air sangat tinggi, namun memiliki drainase kurang baik. Sebaliknya, tanah dengan tekstur kasar semisal pasir mempunyai drainase baik tetapi kemampuan menahan air dan hara relatif rendah. Struktur tanah juga berperan penting dalam menentukan aerasi dan pergerakan air dalam tanah. Struktur tanah yang baik akan membentuk agregat yang stabil sehingga mendukung pertumbuhan akar tanaman.

Selain tekstur dan struktur, sifat fisik tanah lainnya yang tidak kalah penting adalah porositas dan kerapatan massa tanah. Porositas tanah menunjukkan jumlah ruang pori yang tersedia dalam tanah yang berfungsi sebagai tempat pergerakan air dan udara. Tanah dengan porositas semakin baik sanggup memasok oksigen secara memadai untuk akar tanaman dan mikroorganisme tanah. Kerapatan massa tanah atau *bulk density* juga menjadi indikator penting

dalam menilai tingkat kepadatan tanah. Tanah yang terlalu padat akan menghambat pertumbuhan akar serta mengurangi infiltrasi air. Kondisi ini dapat menyebabkan genangan air dan menurunkan produktivitas tanaman. Pengelolaan tanah secara tepat semisal penambahan bahan organik serta pengolahan tanah secara baik sangat diperlukan untuk menjaga keseimbangan sifat fisik tanah dalam mendukung pertumbuhan tanaman secara optimal dalam sistem agroekosistem (Santos *et al.*, 2025).

Komponen kimia tanah berkaitan dengan ketersediaan elemen hara yang sangatlah diperlukan tanaman untuk proses perkembangan serta pertumbuhan. Unsur hara dalam tanah dibedakan menjadi unsur hara makro seperti nitrogen, fosfor, dan kalium serta unsur hara mikro seperti besi, seng, dan boron. Ketersediaan unsur hara ini sangat dipengaruhi oleh pH tanah yang menentukan tingkat kelarutan dan ketersediaan unsur tersebut bagi tanaman. Tanah dengan pH terlalu rendah atau terlalu tinggi dapat menyebabkan unsur hara menjadi tidak tersedia bagi tanaman. Selain itu, kapasitas tukar kation juga menjadi indikator penting dalam menentukan kemampuan tanah dalam menyimpan dan menyediakan unsur hara. Tanah dengan kapasitas tukar kation tinggi umumnya memiliki tingkat kesuburan yang lebih baik sehingga mampu mendukung produktivitas tanaman secara optimal dalam sistem pertanian berkelanjutan.

Bahan organik merupakan salah satu komponen kimia tanah yang memiliki peran sangat penting dalam meningkatkan kesuburan tanah. Bahan organik berasal dari sisa-sisa tanaman atau hewan yang melalui proses dekomposisi oleh mikroorganisme tanah. Kehadiran bahan organik dalam tanah dapat meningkatkan kapasitas tukar kation, melakukan perbaikan struktur tanah, serta menaikkan kapabilitas tanah untuk menahan air. Bahan organik juga menjadi sumber energi bagi mikroorganisme tanah yang berperan dalam siklus hara. Tanah yang kaya bahan organik relatif mempunyai produktivitas yang lebih tinggi daripada tanah yang miskin bahan organik. Pengelolaan bahan organik melalui penambahan pupuk organik dan kompos menjadi salah satu strategi penting dalam meningkatkan kualitas tanah. Upaya ini juga berkontribusi dalam menjaga keberlanjutan sistem pertanian berjangka panjang (Bienes *et al.*, 2021).

Komponen biologi tanah mencakup berbagai organisme hidup dengan peranan kritikal untuk memelihara kesetimbangan ekosistem tanah. Organisme tersebut terdiri dari mikroorganisme seperti bakteri, jamur, dan aktinomiset, serta makroorganisme seperti cacing tanah, rayap, dan berbagai jenis serangga. Mikroorganisme tanah berperan utama dalam proses dekomposisi bahan organik menjadi senyawa yang relatif sederhana. Proses ini sangat penting karena menghasilkan unsur hara yang dibutuhkan oleh tanaman untuk pertumbuhan dan perkembangan. Mikroorganisme juga berperan dalam siklus biogeokimia seperti siklus nitrogen, fosfor, dan karbon. Melalui aktivitas biologis tersebut, tanah mampu mempertahankan kesuburan secara alami. Keberadaan dan aktivitas organisme tanah menjadi indikator penting dalam menilai kualitas dan kesehatan tanah dalam suatu sistem agroekosistem yang berkelanjutan.

Mikroorganisme tanah selain berperan dalam dekomposisi, juga dalam transformasi unsur hara menjadi bentuk yang tersedia bagi tanaman. Bakteri tertentu, misalnya, mampu melakukan pengikatan nitrogen dari udara dan melakukan pengubahan menjadi senyawa yang bisa diserap tanaman. Jamur tanah, termasuk mikoriza, membantu meningkatkan luas permukaan penyerapan akar sehingga efisiensi penyerapan hara meningkat. Sementara itu, makroorganisme seperti cacing tanah berperan dalam memperbaiki sifat fisik tanah melalui aktivitas penggalian dan pencampuran tanah. Lubang-lubang yang dihasilkan cacing tanah dapat meningkatkan aerasi dan infiltrasi air, sehingga tanah menjadi lebih gembur dan subur. Aktivitas ini juga membantu distribusi bahan organik ke dalam lapisan tanah yang lebih dalam, sehingga mempercepat proses pembentukan humus yang sangat bermanfaat bagi kesuburan tanah.

Keberadaan serta aktivitas organisme tanah sangatlah ditentukan oleh kondisi lingkungan semisal kelembapan, temperatur, pH tanah, beserta ketersediaan bahan organik. Lingkungan yang mendukung akan meningkatkan populasi dan keanekaragaman organisme tanah, sehingga proses biologis dapat berlangsung secara optimal. Sebaliknya, kondisi lingkungan yang ekstrem atau penggunaan bahan kimia berlebihan dapat menurunkan jumlah organisme tanah dan mengganggu keseimbangan ekosistem. Tanah yang sehat umumnya memiliki keanekaragaman hayati yang tinggi, yang ditandai dengan

aktifnya berbagai proses biologis seperti dekomposisi, mineralisasi, dan pembentukan struktur tanah. Keanekaragaman ini juga berfungsi sebagai sistem penyangga yang mampu meningkatkan ketahanan tanah terhadap gangguan lingkungan.

Interaksi antara komponen fisik, kimia, dan biologi tanah membentuk suatu sistem yang saling terintegrasi dan tidak dapat dipisahkan dalam mendukung fungsi tanah sebagai media tumbuh tanaman. Sifat fisik tanah seperti tekstur, struktur, dan porositas akan memengaruhi kondisi kimia tanah, termasuk ketersediaan unsur hara dan kapasitas tukar kation. Pada saat yang sama, kondisi fisik tersebut juga menentukan aktivitas organisme tanah, karena mikroorganisme membutuhkan lingkungan dengan aerasi dan kelembapan yang sesuai untuk berkembang. Sebagai contoh, tanah yang memiliki struktur baik akan memungkinkan sirkulasi udara serta air yang optimal, sehingga membantu aktivitas mikroba dalam proses dekomposisi bahan organik. Keseimbangan antara komponen fisik, kimia, dan biologi menjadi kunci utama dalam menjaga fungsi tanah secara optimal dalam sistem agroekosistem (Fang *et al.*, 2021).

Perubahan pada salah satu komponen tanah akan memberikan dampak yang luas terhadap komponen lainnya, baik secara langsung atau tidak langsung. Misalnya, peningkatan kandungan bahan organik dalam tanah selain memperbaiki sifat kimia melalui peningkatan ketersediaan unsur hara, juga berperan dalam memperbaiki struktur tanah sehingga menjadi lebih remah dan mudah diolah. Bahan organik menjadi sumber energi untuk mikroorganisme tanah yang mempunyai peranan pada proses mineralisasi. Perubahan pH tanah juga memiliki pengaruh yang signifikan terhadap ketersediaan unsur hara tertentu, seperti fosfor dan nitrogen, serta aktivitas enzim mikroba. Kondisi pH yang tidak sesuai dapat menghambat aktivitas mikroorganisme dan menurunkan efisiensi penyerapan hara oleh tanaman, sehingga berdampak pada pertumbuhan dan hasil tanaman.

Pengelolaan tanah harus dilakukan secara terpadu dengan mempertimbangkan keseimbangan antara komponen fisik, kimia, dan biologis. Pendekatan ini mencakup penerapan praktik-praktik pertanian berkelanjutan seperti penambahan bahan organik, pengolahan tanah yang tepat, serta penggunaan pupuk secara bijaksana sesuai kebutuhan tanaman. Konservasi tanah dan air

juga menjadi bagian penting dalam menjaga stabilitas sistem tanah. Dengan memahami interaksi antar komponen tanah, petani bisa membuat keputusan semakin akurat dalam menentukan strategi pengelolaan lahan, sehingga selain menaikkan produktivitas tanaman, juga memelihara kelestarian sumber daya tanah.

2.3 Profil dan Horison Tanah serta Kaitannya dengan Produktivitas

Profil tanah merupakan gambaran vertikal tanah dari permukaan hingga ke lapisan bawah yang menunjukkan susunan lapisan atau horison tanah yang terbentuk melalui proses pembentukan tanah dalam jangka waktu sangat panjang. Setiap lapisan tanah mempunyai karakteristik beragam pada aspek warna, tekstur, struktur, ataupun kandungan bahan organik. Profil tanah umumnya terdiri dari beberapa horison utama yaitu horison O, A, B, C, dan R yang masing-masing memiliki fungsi dan peran tertentu dalam mendukung kehidupan tanaman. Horison O adalah lapisan paling atas yang kaya akan bahan organik, sedangkan horison A dikenal sebagai lapisan topsoil yang sangat penting bagi pertumbuhan tanaman.

Horison tanah terbentuk melalui proses pedogenesis yang dipengaruhi oleh berbagai faktor semisal iklim, organisme, bahan induk, topografi, serta waktu. Horison A sebagai lapisan atas merupakan zona yang paling aktif secara biologis karena banyak mengandung akar tanaman dan mikroorganisme. Lapisan ini biasanya mempunyai warna lebih gelap akibat tingginya kandungan bahan organik. Di bawahnya terdapat horison B yang dikenal sebagai subsoil, yang berfungsi sebagai tempat akumulasi mineral hasil pencucian dari lapisan atas. Horison ini umumnya mempunyai kandungan bahan organik relatif rendah daripada horison A, tetapi kaya akan mineral seperti besi dan aluminium. Horison C merupakan lapisan bahan induk yang belumlah mengalami pelapukan. Setiap horison memiliki peran penting dalam menentukan sifat tanah secara keseluruhan dan berpengaruh terhadap pertumbuhan tanaman dalam sistem pertanian (Sauvadet *et al.*, 2021).

Kaitan antara profil tanah dengan produktivitas pertanian sangat erat karena setiap lapisan tanah memiliki peran spesifik dalam mendukung pertumbuhan tanaman. Horison A atau lapisan topsoil merupakan bagian paling penting

karena mengandung bahan organik, mikroorganisme, serta unsur hara yang dibutuhkan tanaman. Tanah dengan horison A yang tebal dan subur umumnya memiliki kapasitas menahan air dan menyediakan nutrisi yang lebih baik, sehingga mampu mendukung pertumbuhan tanaman secara optimal. Struktur tanah pada lapisan ini lebih gembur, sehingga memudahkan perkembangan akar dan meningkatkan efisiensi penyerapan hara. Keberadaan topsoil yang berkualitas menjadi salah satu indikator utama penentuan tingkat produktivitas suatu lahan pertanian.

Tanah dengan lapisan topsoil yang tipis atau telah mengalami erosi cenderung memiliki tingkat produktivitas yang rendah. Erosi menyebabkan hilangnya lapisan tanah paling subur yang kaya akan bahan organik dan unsur hara, sehingga tanah menjadi kurang mampu mendukung pertumbuhan tanaman. Selain itu, tanah yang terdegradasi biasanya memiliki struktur yang kurang baik dan kapasitas menahan air yang rendah, sehingga tanaman lebih rentan terhadap kekeringan. Dalam kondisi seperti ini, petani sering harus menambahkan input eksternal seperti pupuk dalam jumlah besar untuk mempertahankan hasil produksi. Namun, jika tidak dikelola dengan baik, hal ini justru memperburuk kondisi tanah.

Selain horison A, kondisi horison B juga memiliki pengaruh penting terhadap produktivitas pertanian, terutama dalam hal pergerakan air dan perkembangan akar tanaman. Horison B yang terlampau padat ataupun mengalami pemadatan bisa menghalangi penetrasi akar dalam lapisan tanah yang lebih dalam. Akibatnya, akar tanaman tidaklah bisa menjangkau cadangan air serta unsur hara yang tersedia di bawah permukaan. Kondisi ini membatasi pertumbuhan tanaman, terutama pada musim kering. Horison B yang memiliki struktur baik akan mendukung pergerakan air secara vertikal serta memungkinkan akar berkembang lebih luas. Kondisi profil tanah yang ideal menjadi faktor kunci dalam meningkatkan efisiensi penyerapan hara dan produktivitas tanaman secara keseluruhan (Gorooei *et al.*, 2023).

Ketebalan dan kualitas setiap horison tanah sangat menentukan kemampuan tanah dalam menyediakan lingkungan tumbuh yang optimal bagi tanaman. Horison A yang tebal dan gembur akan memudahkan perkembangan akar serta menaikkan kapabilitas tanah dalam melakukan penyimpanan air dan unsur hara. Kandungan bahan organik yang tinggi pada lapisan ini juga berperan

dalam meningkatkan aktivitas mikroorganisme tanah yang mendukung proses dekomposisi dan mineralisasi. Jika horison A mengalami degradasi akibat erosi atau pengelolaan yang tidak tepat, maka produktivitas tanah akan menurun secara signifikan. Kondisi ini sering terjadi pada lahan pertanian yang tidak menerapkan teknik konservasi tanah. Menjaga ketebalan dan kualitas horison atas menjadi langkah penting untuk menaikkan produktivitas lahan pertanian secara berkelanjutan dalam berbagai kondisi lingkungan dan sistem budidaya tanaman yang berbeda.

Selain horison A, kondisi horison B juga memiliki peran penting dalam mendukung produktivitas tanah, terutama dalam hal penyimpanan air dan unsur hara. Horison ini sering menjadi tempat akumulasi liat dan mineral lainnya yang tercuci dari lapisan atas. Jika struktur horison B baik, maka air dapat disimpan dan dimanfaatkan oleh tanaman pada saat kondisi kekeringan. Namun, jika lapisan ini terlalu padat atau mengalami pemadatan, maka akan menghambat pergerakan air dan pertumbuhan akar tanaman. Hal tersebut bisa mengakibatkan tanaman menjadi lebih rentan pada stres air dan kekurangan unsur hara. Pengelolaan tanah yang memperhatikan kondisi lapisan bawah sangat penting dalam mendukung pertumbuhan tanaman secara optimal. Upaya seperti pengolahan tanah yang tepat dan penambahan bahan organik dapat membantu memperbaiki kondisi horison ini (Vittori Antisari *et al.*, 2021).

Profil tanah memiliki peran krusial pada penentuan kemampuan tanah dalam menahan serta mengalirkan air, yang menjadi faktor krusial dalam sistem pertanian. Setiap horison tanah memiliki karakteristik yang berbeda dalam menyimpan air, tergantung pada tekstur, struktur, dan kandungan bahan organik yang dimilikinya. Tanah dengan profil yang baik umumnya mampu menahan air dalam jumlah cukup untuk kebutuhan tanaman, sekaligus memiliki sistem drainase yang memadai untuk mencegah genangan. Kondisi ini sangat penting karena kelebihan air dapat menyebabkan penurunan kadar oksigen dalam tanah, yang berujung pada terganggunya respirasi akar. Dengan adanya keseimbangan antara retensi air dan drainase, tanaman dapat tumbuh secara optimal tanpa mengalami stres akibat kekeringan maupun kelebihan air.

Distribusi pori dalam setiap horison tanah sangat memengaruhi pergerakan air dan udara di dalam tanah. Pori makro berperan dalam mempercepat aliran air dan meningkatkan aerasi, sedangkan pori mikro berfungsi dalam menyimpan air yang dapat dimanfaatkan oleh tanaman. Kombinasi yang seimbang antara kedua jenis pori tersebut akan menciptakan kondisi lingkungan tanah yang ideal bagi pertumbuhan akar. Akar tanaman membutuhkan suplai oksigen yang cukup untuk proses respirasi, sehingga tanah yang memiliki aerasi yang baik akan mendukung perkembangan sistem perakaran yang sehat. Di sisi lain, pori-pori tanah juga menjadi habitat bagi mikroorganisme yang berperan dalam proses dekomposisi dan siklus unsur hara.

Kualitas profil tanah selain berpengaruh terhadap ketersediaan air, juga terhadap aktivitas biologis dan kesuburan tanah secara keseluruhan. Tanah dengan distribusi pori yang seimbang akan mampu mendukung interaksi antara akar tanaman dan mikroorganisme secara optimal. Oleh karena itu, pengelolaan tanah yang baik perlu memperhatikan kondisi profil tanah, seperti melalui penambahan bahan organik dan pengolahan tanah yang tepat, guna mempertahankan struktur dan porositas tanah. Upaya ini penting untuk memastikan bahwa tanah tetap mampu menyediakan air dan udara secara seimbang, sehingga produktivitas tanaman dapat ditingkatkan secara berkelanjutan (Tiefenbacher *et al.*, 2021).

2.4 Klasifikasi Tanah dan Distribusi Tanah Pertanian di Indonesia

Klasifikasi tanah merupakan sistem pengelompokan tanah berdasarkan karakteristik tertentu yang bertujuan untuk memudahkan pengelolaan dan pemanfaatannya, terutama dalam bidang pertanian. Sistem klasifikasi tanah yang umum digunakan antara lain *Soil Taxonomy*, FAO, dan klasifikasi tanah nasional yang disesuaikan dengan kondisi Indonesia. Setiap sistem klasifikasi memiliki kriteria yang berbeda, seperti sifat morfologi, kimia, fisika, serta proses pembentukan tanah. Di Indonesia, klasifikasi tanah sangat penting karena kondisi geografis dan iklim yang beragam menghasilkan jenis tanah yang berbeda-beda di setiap wilayah. Dengan adanya klasifikasi tanah, petani dan peneliti dapat menentukan jenis tanaman yang sesuai dengan kondisi tanah tertentu. Klasifikasi tanah mendukung pula dalam perencanaan

penggunaan lahan dan pengelolaan sumber daya tanah secara lebih efisien dan berkelanjutan dalam mendukung produktivitas pertanian nasional yang optimal (Bhunias *et al.*, 2021).

Indonesia memiliki berbagai jenis tanah yang tersebar di seluruh wilayah dengan karakteristik yang berbeda-beda. Beberapa jenis tanah yang umum ditemukan antara lain tanah aluvial, latosol, regosol, grumosol, andosol, dan podsolik. Tanah aluvial biasanya ditemukan di daerah dataran rendah dan memiliki tingkat kesuburan yang cukup tinggi karena berasal dari endapan material sungai. Tanah latosol banyak ditemukan di daerah beriklim tropis basah dan memiliki struktur yang baik, namun sering mengalami pencucian unsur hara. Tanah andosol yang berasal dari abu vulkanik dikenal memiliki kandungan bahan organik tinggi dan sangat subur untuk pertanian. Sementara itu, tanah podsolik cenderung memiliki tingkat keasaman tinggi dan kandungan hara yang rendah. Keberagaman jenis tanah ini menunjukkan kondisi lingkungan yang kompleks dan memerlukan pengelolaan yang berbeda sesuai dengan karakteristik masing-masing tanah.

Distribusi tanah pertanian di Indonesia dipengaruhi oleh faktor-faktor seperti iklim, topografi, bahan induk, serta dinamika vulkanik yang cukup tinggi. Wilayah Pulau Jawa dikenal memiliki tanah yang relatif subur karena banyak dipengaruhi oleh aktivitas gunung berapi yang menghasilkan tanah andosol dan latosol. Sementara itu, wilayah Sumatera dan Kalimantan didominasi oleh tanah podsolik yang memiliki tingkat kesuburan lebih rendah sehingga memerlukan pengelolaan yang lebih intensif. Di daerah pesisir, tanah aluvial banyak dimanfaatkan untuk sektor pertanian karena memiliki tekstur yang baik dan mudah diolah. Perbedaan distribusi tanah ini memengaruhi pola penggunaan lahan serta jenis komoditas yang dibudidayakan di masing-masing wilayah (Prawito *et al.*, 2021).

Setiap jenis tanah di Indonesia memiliki karakteristik spesifik yang sangat memengaruhi tingkat kesuburan serta kesesuaiannya terhadap berbagai jenis komoditas pertanian. Tanah andosol, yang banyak ditemukan di daerah vulkanik, dikenal memiliki struktur remah, kandungan bahan organik tinggi, serta kemampuan menahan air yang baik. Kondisi ini menjadikan tanah andosol sangat ideal untuk pengembangan tanaman hortikultura seperti sayuran dan buah-buahan. Selain itu, kapasitas tukar kation yang tinggi pada

tanah ini juga mendukung ketersediaan unsur hara bagi tanaman. Tanah aluvial yang terbentuk dari endapan sungai umumnya memiliki tekstur yang relatif halus, mudah diolah, serta kandungan hara yang cukup baik. Tanah aluvial banyak dimanfaatkan untuk budidaya tanaman pangan, terutama padi sawah yang membutuhkan kondisi tanah yang subur dan mampu menahan air.

Berbeda dengan andosol dan aluvial, tanah podsolik memiliki tingkat kesuburan yang relatif rendah karena sifatnya yang asam, kandungan bahan organik rendah, serta ketersediaan unsur hara yang terbatas. Tanah ini umumnya banyak dijumpai di wilayah tropis dengan curah hujan tinggi, sehingga mengalami pencucian hara yang intensif. Untuk meningkatkan produktivitasnya, diperlukan perlakuan khusus seperti pengapuran guna menaikkan pH tanah serta pemupukan yang tepat dan berimbang. Sementara itu, tanah grumosol yang memiliki kandungan liat tinggi cenderung memiliki sifat mengembang dan mengerut tergantung pada kadar air. Tanah ini cukup subur, namun memiliki kendala dalam pengolahan karena menjadi sangat keras saat kering dan lengket saat basah. Oleh karena itu, pengelolaan air yang baik sangat diperlukan agar kondisi tanah tetap mendukung pertumbuhan tanaman secara optimal. Pemilihan komoditas yang tepat berdasarkan kesesuaian lahan akan mengurangi risiko kegagalan panen serta mengoptimalkan pemanfaatan sumber daya yang tersedia. Selain itu, pendekatan ini juga mendukung praktik pertanian berkelanjutan karena memperhatikan keseimbangan antara kemampuan tanah dan kebutuhan tanaman. Pengelolaan lahan yang berbasis pada karakteristik tanah menjadi langkah strategis dalam meningkatkan hasil pertanian di Indonesia, sekaligus menjaga kelestarian sumber daya tanah dalam jangka panjang.

Pemanfaatan klasifikasi tanah dalam bidang pertanian sangat membantu dalam menentukan strategi pengelolaan lahan yang tepat sesuai dengan karakteristik tanah. Dengan mengetahui jenis tanah, petani dapat menentukan kebutuhan pupuk, teknik pengolahan tanah, serta sistem irigasi yang sesuai. Selain itu, klasifikasi tanah juga dapat digunakan sebagai dasar dalam perencanaan rotasi tanaman dan konservasi lahan. Informasi ini sangat penting dalam meningkatkan efisiensi penggunaan input pertanian serta mengurangi risiko kerusakan lingkungan. Penggunaan teknologi seperti pemetaan tanah

dan sistem informasi geografis juga semakin mendukung pengelolaan tanah berbasis klasifikasi (Mujiyo *et al.*, 2023).

Distribusi tanah pertanian di Indonesia selain dipengaruhi oleh faktor fisik seperti jenis tanah dan iklim, juga sangat ditentukan oleh faktor sosial dan ekonomi yang berkaitan dengan pola pemanfaatan lahan. Wilayah dengan tingkat kesuburan tanah yang tinggi, seperti di Pulau Jawa, cenderung dimanfaatkan secara intensif untuk sektor pertanian. Hal ini didukung oleh ketersediaan infrastruktur yang memadai, seperti jaringan irigasi, jalan distribusi, serta kedekatan dengan pasar. Selain itu, kepadatan penduduk yang tinggi juga mendorong optimalisasi penggunaan lahan melalui sistem pertanian yang lebih intensif dan berkelanjutan. Kondisi ini menjadikan Pulau Jawa sebagai salah satu pusat produksi pangan utama di Indonesia, meskipun menghadapi tekanan alih fungsi lahan yang cukup besar.

Wilayah seperti Kalimantan dan Papua yang memiliki luas lahan yang besar justru belum dimanfaatkan secara optimal untuk sektor pertanian. Hal ini disebabkan oleh berbagai kendala, seperti keterbatasan akses transportasi, minimnya infrastruktur pendukung, serta rendahnya tingkat adopsi teknologi pertanian modern. Kondisi tanah di beberapa wilayah tersebut juga memerlukan perlakuan khusus agar dapat digunakan secara produktif, seperti pengelolaan tanah gambut atau tanah dengan tingkat keasaman tinggi. Faktor sosial seperti keterbatasan sumber daya manusia dan kurangnya akses terhadap pendidikan serta pelatihan pertanian juga turut memengaruhi rendahnya pemanfaatan lahan. Potensi besar yang dimiliki wilayah tersebut belum dapat dioptimalkan.

Upaya pengembangan sektor pertanian di Indonesia perlu dilakukan secara komprehensif dengan memperhatikan faktor sosial, ekonomi, dan teknologi. Peningkatan kapasitas petani melalui pelatihan, penyuluhan, serta akses terhadap informasi dan inovasi pertanian menjadi langkah penting dalam mendorong pemanfaatan lahan secara lebih efisien. Selain itu, pembangunan infrastruktur seperti jalan, irigasi, dan sarana distribusi juga harus menjadi prioritas untuk membuka akses wilayah yang selama ini terisolasi. Pengembangan teknologi pertanian yang adaptif terhadap kondisi lokal, dapat menjadi solusi dalam meningkatkan produktivitas lahan di berbagai wilayah.

Dengan pendekatan yang terpadu, pemanfaatan tanah pertanian di Indonesia dapat dioptimalkan secara berkelanjutan dan merata. (Maçik *et al.*, 2025).

2.5 Tanah sebagai Sistem Hidup: Perspektif Agroekologi

Dalam perspektif agroekologi, tanah dipandang selain merupakan media tumbuh tanaman, juga merupakan sistem hidup yang kompleks dan dinamis yang tersusun atas beragam elemen biotik serta abiotik yang saling berinteraksi. Tanah merupakan habitat bagi jutaan organisme yang berperan penting untuk memelihara kesetimbangan ekosistem. Mikroorganisme semisal bakteri, jamur, serta aktinomiset berperan dalam proses dekomposisi bahan organik serta transformasi unsur hara menjadi bentuk yang tersedia bagi tanaman. Selain itu, *fauna* tanah seperti cacing juga berperan dalam memperbaiki struktur tanah dan meningkatkan aerasi. Dalam sistem agroekologi, keberadaan organisme tanah dianggap sebagai indikator kesehatan tanah yang sangat penting. Pengelolaan tanah selain terfokus atas kenaikan produksi, juga terhadap upaya menjaga keseimbangan ekosistem tanah dalam jangka panjang dan berkelanjutan (Zhan *et al.*, 2025).

Pendekatan agroekologi menekankan pentingnya menjaga keseimbangan antara komponen biotik dan abiotik dalam tanah untuk mendukung keberlanjutan sistem pertanian. Tanah yang sehat adalah tanah yang memiliki aktivitas biologis tinggi serta mampu menyediakan unsur hara secara alami tanpa ketergantungan berlebihan pada input eksternal. Dalam konteks ini, penggunaan bahan organik seperti kompos dan pupuk hijau menjadi sangat penting dalam meningkatkan kesuburan tanah. Praktik pertanian semisal rotasi tanaman serta penanaman tanaman penutup tanah bisa pula menaikkan keanekaragaman hayati dalam tanah. Pendekatan tersebut selain menaikkan produktivitas tanaman, juga memelihara kelestarian lingkungan. Agroekologi menjadi salah satu solusi dalam menghadapi tantangan pertanian modern yang berkaitan dengan degradasi tanah dan perubahan iklim secara global (Siol, Majer and Thrän, 2025).

Tanah sebagai sistem hidup juga memiliki kemampuan untuk melakukan regenerasi secara alami apabila dikelola dengan baik. Proses regenerasi ini melibatkan aktivitas mikroorganisme yang berperan dalam memperbaiki struktur tanah serta meningkatkan kandungan bahan organik. Tanah yang

dikelola secara berkelanjutan akan mampu mempertahankan kesuburannya dalam jangka panjang tanpa mengalami degradasi yang signifikan. Praktik pertanian yang tidak ramah lingkungan semisal penggunaan bahan kimia berlebihan dan pengolahan tanah yang intensif dapat merusak keseimbangan ekosistem tanah. Hal tersebut menyebabkan degradasi mutu tanah dan produktivitas pertanian.

Dalam sistem agroekologi, interaksi antara tanaman, tanah, dan organisme hidup merupakan fondasi utama dalam menciptakan keseimbangan ekosistem pertanian yang berkelanjutan. Tanaman selain bergantung pada tanah sebagai penyedia unsur hara, juga berinteraksi secara aktif dengan berbagai mikroorganisme yang hidup di sekitar perakaran. Zona perakaran atau rizosfer menjadi tempat terjadinya berbagai aktivitas biologis yang kompleks, di mana mikroorganisme membantu menguraikan bahan organik dan menyediakan nutrisi bagi tanaman. Hubungan ini bersifat dinamis dan saling menguntungkan, karena tanaman menyediakan senyawa organik sebagai sumber energi bagi mikroorganisme. Dengan demikian, interaksi ini menciptakan sistem yang efisien dalam mendaur ulang unsur hara serta menjaga kesuburan tanah secara alami dalam jangka panjang.

Bentuk interaksi yang paling penting dalam agroekologi adalah hubungan simbiosis antara akar tanaman dan mikoriza. Jamur mikoriza mampu memperluas jangkauan sistem perakaran melalui hifa yang menjalar ke dalam tanah, sehingga meningkatkan kapasitas tanaman untuk penyerapan unsur hara, terutama fosfor yang ketersediaannya sering terbatas. Selain itu, keberadaan bakteri penambat nitrogen, seperti *Rhizobium* pada tanaman leguminosa, berperan dalam mengubah nitrogen bebas di udara menjadi bentuk yang dapat dimanfaatkan oleh tanaman. Interaksi ini selain meningkatkan ketersediaan unsur hara, juga mengurangi kebutuhan akan pupuk anorganik. Dengan mekanisme biologis tersebut, sistem pertanian bisa berjalan semakin efisien serta ramah lingkungan tanpa mengurangi produktivitas tanaman.

Interaktivitas antara komponen biotik dan abiotik dalam tanah menunjukkan bahwa tanah bukan sekadar media pasif, melainkan sistem hidup yang kompleks dan aktif. Mikroorganisme tanah berperan dalam menjaga keseimbangan ekosistem dengan mengendalikan patogen, meningkatkan

ketahanan tanaman, serta memperbaiki struktur tanah. Pendekatan agroekologi yang menekankan pemanfaatan interaksi alami ini mampu mereduksi dependensi terhadap input kimia semisal pupuk serta pestisida sintetis. Hal ini sejalan dengan konsep pertanian berkelanjutan yang mengutamakan efisiensi pemakaian sumber daya serta pelestarian lingkungan (Zhang *et al.*, 2020).

Pengelolaan tanah dalam perspektif agroekologi menekankan pada penggunaan praktik-praktik yang ramah lingkungan serta berkelanjutan. Salah satu pendekatan yang dapat dilakukan yakni dengan menekan penggunaan bahan kimia sintetis yang bisa merusakkan keseimbangan ekosistem tanah. Sebagai alternatif, penggunaan pupuk organik, kompos, dan biofertilizer menjadi solusi yang lebih aman dan berkelanjutan. Teknik konservasi tanah semisal terasering, penanaman tanaman penutup tanah, serta pengolahan tanah minimum juga dapat membantu menjaga struktur dan kesuburan tanah. Pendekatan tersebut selain meningkatkan produktivitas tanaman, juga menjaga kelestarian lingkungan. Pengelolaan tanah yang berbasis agroekologi menjadi strategi yang efektif dalam menghadapi tantangan pertanian modern yang semakin kompleks dan menuntut keberlanjutan dalam jangka panjang di berbagai kondisi agroekosistem yang dinamis.

Tanah sebagai sistem hidup memiliki peran yang sangatlah kritikal dalam memelihara keseimbangan lingkungan global, terutama dalam kaitannya dengan siklus karbon dan perubahan iklim. Tanah berfungsi sebagai salah satu penyimpan karbon terbesar di Bumi melalui akumulasi bahan organik hasil dekomposisi sisa tanaman dan organisme. Karbon tersebut tersimpan dalam bentuk humus yang relatif stabil, sehingga tidak mudah terlepas ke atmosfer sebagai karbon dioksida. Proses penyerapan dan penyimpanan karbon ini dikenal sebagai sekuestrasi karbon, yang berperan penting dalam mengurangi konsentrasi gas rumah kaca di atmosfer. Tanah yang sehat dan kaya akan bahan organik dapat menjadi solusi alami dalam mitigasi perubahan iklim yang menjadi tantangan global yang semakin mendesak.

Selain berperan dalam siklus karbon, tanah juga memiliki fungsi vital dalam siklus hidrologi, khususnya dalam menyerap, menyimpan, dan mendistribusikan air. Tanah yang memiliki struktur baik dan porositas seimbang mampu meningkatkan infiltrasi air hujan, sehingga mengurangi

risiko limpasan permukaan dan erosi. Air yang masuk ke dalam tanah akan disimpan dalam pori-pori tanah dan tersedia bagi tanaman dalam jangka waktu tertentu. Tanah juga berfungsi sebagai penyaring alami yang mampu menahan berbagai polutan seperti logam berat, pestisida, dan bahan kimia lainnya. Melalui proses filtrasi dan aktivitas mikroorganisme, kualitas air yang meresap ke dalam tanah dapat ditingkatkan sebelum mencapai lapisan air tanah. Hal ini menjadikan tanah sebagai komponen penting dalam menjaga ketersediaan dan kualitas sumber daya air.

Menjaga kesehatan tanah menjadi sangat penting, selain untuk mendukung produktivitas pertanian, juga dalam menjaga kelestarian lingkungan secara luas. Praktik pengelolaan tanah secara berkelanjutan, seperti penambahan bahan organik, pengurangan penggunaan bahan kimia berlebihan, serta konservasi tanah serta air, bisa meningkatkan fungsi ekologis tanah. Tanah yang sehat akan mempunyai kemampuan yang semakin baik untuk menyimpan karbon, mengatur siklus air, serta mendukung keanekaragaman hayati. Pengelolaan tanah yang tepat dapat memberikan kontribusi signifikan dalam menghadapi tantangan perubahan iklim dan degradasi lingkungan. Tanah selain menjadi sumber kehidupan bagi pertanian, juga sebagai penopang utama keseimbangan ekosistem Bumi (Mei *et al.*, 2021).

BAB 3

SIFAT FISIKA TANAH DAN PENGARUHNYA TERHADAP PERTUMBUHAN TANAMAN

3.1 Tekstur dan Struktur Tanah

Tanah merupakan salah satu komponen utama ekosistem yang memiliki peranan sangat penting dalam menunjang kehidupan di bumi. Selain berfungsi sebagai media tumbuh bagi tanaman, tanah juga berperan sebagai reservoir atau penyimpan air, penyedia unsur hara, pengatur siklus biogeokimia, serta habitat bagi berbagai organisme, mulai dari mikroorganisme, fauna tanah, hingga organisme makro yang berkontribusi terhadap pembentukan dan pemeliharaan kesuburan tanah. Keberadaan tanah yang sehat dan produktif menjadi salah satu faktor penentu keberhasilan sistem pertanian, kelestarian lingkungan, dan keberlanjutan sumber daya alam (Zega, 2024). Oleh karena itu, pemahaman yang komprehensif mengenai karakteristik tanah menjadi sangat penting dalam upaya pengelolaan lahan yang efektif dan berkelanjutan.

Dalam bidang pertanian, produktivitas tanaman tidak hanya ditentukan oleh ketersediaan unsur hara, tetapi juga sangat dipengaruhi oleh kondisi fisik tanah. Sifat fisika tanah menentukan kemampuan tanah dalam menyediakan ruang tumbuh bagi akar, mengatur pergerakan dan penyimpanan air, mempertahankan ketersediaan udara di dalam tanah, serta mendukung aktivitas organisme yang berperan dalam menjaga keseimbangan ekosistem tanah (Gulo and Gulo, 2024). Di antara berbagai sifat fisika tanah, tekstur dan struktur tanah merupakan dua komponen dasar yang memiliki pengaruh sangat besar terhadap kemampuan tanah dalam mendukung pertumbuhan dan perkembangan tanaman.

Tekstur tanah merujuk pada komposisi relatif dan distribusi ukuran partikel mineral penyusun tanah, yaitu pasir, debu, dan liat. Perbedaan proporsi ketiga

fraksi tersebut akan menghasilkan karakteristik tanah yang berbeda (Solekhah and Priyadarshini, 2024), seperti kemampuan menyimpan air, kapasitas menahan unsur hara, tingkat aerasi, serta laju infiltrasi dan drainase. Sementara itu, struktur tanah menggambarkan bagaimana partikel-partikel primer tersebut saling berikatan dan membentuk agregat yang menentukan susunan ruang pori di dalam tanah. Struktur tanah yang baik akan menciptakan kondisi lingkungan perakaran yang optimal, sedangkan struktur tanah yang buruk dapat menyebabkan berbagai permasalahan, seperti pemadatan tanah, genangan air, rendahnya ketersediaan oksigen, serta terhambatnya pertumbuhan akar tanaman.

Pemahaman mengenai tekstur dan struktur tanah memiliki peranan yang sangat penting dalam berbagai aspek pengelolaan lahan, tidak hanya pada sektor pertanian, tetapi juga pada bidang kehutanan, konservasi tanah dan air, rehabilitasi lahan terdegradasi, serta pengelolaan lingkungan secara umum. Informasi mengenai kedua sifat fisika tanah tersebut dapat digunakan sebagai dasar dalam menentukan jenis tanaman yang sesuai, merancang sistem irigasi dan drainase, menetapkan teknik pengolahan tanah, serta menyusun strategi konservasi yang tepat untuk mencegah degradasi lahan. Pengelolaan yang tidak memperhatikan karakteristik tekstur dan struktur tanah dapat menurunkan kualitas tanah dan berdampak pada penurunan produktivitas lahan dalam jangka panjang.

3.1.1 Tekstur

Tekstur tanah merupakan salah satu sifat fisika tanah yang menunjukkan perbandingan relatif fraksi pasir, debu, dan liat yang menyusun suatu massa tanah (Zebua *et al.*, 2026). Tekstur tanah menjadi karakteristik dasar yang sangat penting karena memengaruhi berbagai proses fisik, kimia, dan biologi yang berlangsung di dalam tanah (Hura *et al.*, 2024). Berbeda dengan beberapa sifat tanah lainnya yang dapat berubah dalam waktu relatif singkat akibat pengelolaan lahan, tekstur tanah merupakan sifat yang relatif permanen karena ditentukan oleh bahan induk dan proses pelapukan yang berlangsung selama pembentukan tanah.

Komposisi ketiga fraksi penyusun tanah tersebut menentukan kemampuan tanah dalam menyimpan dan menyediakan air, mengatur sirkulasi udara,

mempertahankan unsur hara, serta mendukung pertumbuhan dan perkembangan sistem perakaran tanaman. Oleh karena itu, pemahaman mengenai tekstur tanah menjadi dasar dalam menentukan strategi pengelolaan lahan yang tepat, termasuk pemilihan jenis tanaman, teknik irigasi, pemupukan, dan konservasi tanah.

Berdasarkan ukuran partikelnya, mineral tanah dibedakan menjadi tiga fraksi utama (Zalwa *et al.*, 2002), sebagai berikut :

1. Fraksi Pasir (Sand)

Pasir merupakan fraksi tanah dengan ukuran partikel paling besar, yaitu berkisar antara 0,05 mm hingga 2,00 mm. Ukuran partikel yang besar menyebabkan tanah berpasir memiliki pori-pori besar (makropori) yang memungkinkan air dan udara bergerak dengan cepat, sehingga memiliki drainase dan aerasi yang baik serta risiko genangan yang rendah. Selain itu, tanah berpasir umumnya mudah diolah dan mendukung perkembangan perakaran tanaman. Namun, tanah berpasir memiliki kemampuan yang rendah dalam menahan air dan unsur hara karena air mudah meresap ke lapisan tanah yang lebih dalam, sehingga lebih rentan mengalami kekeringan dan kehilangan unsur hara akibat pencucian (*leaching*). Oleh karena itu, tanah berpasir memerlukan pengelolaan yang tepat, seperti penambahan bahan organik dan pemupukan yang lebih intensif, untuk menjaga kesuburan dan produktivitas lahan.

2. Fraksi Debu (Silt)

Debu merupakan fraksi tanah dengan ukuran partikel antara 0,002 mm hingga 0,05 mm. Ukuran partikel debu berada di antara pasir dan liat sehingga sifat-sifatnya juga berada di antara kedua fraksi tersebut. Tanah yang mengandung debu dalam jumlah cukup umumnya memiliki kemampuan menahan air yang lebih baik dibandingkan tanah berpasir, namun masih mampu menyediakan aerasi yang memadai bagi pertumbuhan akar. Partikel debu memiliki permukaan yang lebih luas dibandingkan pasir sehingga lebih efektif dalam mengikat air dan unsur hara. Selain itu, tanah berdebu biasanya memiliki tekstur yang halus dan terasa licin ketika disentuh. Meskipun demikian, tanah yang kaya debu

cenderung lebih mudah mengalami erosi oleh air maupun angin apabila tidak terlindungi oleh vegetasi atau tindakan konservasi yang memadai.

3. Fraksi Liat (Clay)

Liat merupakan fraksi tanah dengan ukuran partikel paling kecil, yaitu kurang dari 0,002 mm, namun memiliki luas permukaan yang sangat besar sehingga mampu menyimpan air dan unsur hara dalam jumlah lebih banyak dibandingkan pasir dan debu. Tanah yang didominasi oleh fraksi liat memiliki banyak pori-pori kecil (mikropori) yang menyebabkan kemampuan menahan air sangat tinggi, tetapi pergerakan udara dan drainase menjadi lebih lambat. Tanah liat umumnya bersifat lengket saat basah dan keras ketika kering sehingga relatif lebih sulit diolah. Meskipun demikian, keberadaan liat sangat penting karena dapat meningkatkan kapasitas tanah dalam menyediakan air dan unsur hara yang dibutuhkan untuk pertumbuhan tanaman.

3.1.2 Struktur Tanah

Struktur tanah adalah susunan partikel-partikel primer tanah (pasir, debu, dan liat) yang bergabung membentuk agregat atau ped. Struktur tanah menunjukkan bagaimana partikel-partikel tersebut tersusun dan membentuk ruang pori yang memengaruhi pergerakan air, udara, serta perkembangan akar tanaman. Berbeda dengan tekstur tanah yang relatif tetap, struktur tanah bersifat dinamis dan dapat berubah akibat faktor alam maupun aktivitas manusia. Struktur tanah yang baik sangat penting bagi pertumbuhan tanaman karena mampu menciptakan keseimbangan antara fase padat, cair, dan gas di dalam tanah. Kondisi ini mendukung penyerapan air dan unsur hara, meningkatkan aktivitas mikroorganisme, serta memperlancar pertumbuhan akar. Pembentukan dan stabilitas struktur tanah dipengaruhi oleh beberapa faktor (Zalwa *et al.*, 2002), yaitu:

1. Bahan Organik

Bahan organik berfungsi sebagai perekat alami yang mengikat partikel tanah menjadi agregat yang stabil. Semakin tinggi kandungan bahan organik, umumnya semakin baik struktur tanah yang terbentuk.

2. Mineral Liat

Partikel liat memiliki muatan listrik yang membantu proses pembentukan agregat. Kandungan liat yang cukup dapat meningkatkan kestabilan struktur tanah.

3. Aktivitas Organisme Tanah

Mikroorganisme, cacing tanah, dan fauna tanah lainnya membantu pembentukan agregat melalui aktivitas biologis dan produksi senyawa perekat alami.

4. Siklus Basah dan Kering

Proses mengembang dan mengerut akibat perubahan kadar air tanah dapat membantu pembentukan struktur tanah.

5. Pengolahan Tanah

Pengolahan tanah yang tepat dapat memperbaiki struktur tanah, sedangkan pengolahan yang berlebihan dapat merusak agregat dan menyebabkan pemadatan.

Struktur tanah dapat dibedakan berdasarkan bentuk, ukuran, dan susunan agregat (ped) yang terbentuk dari penggabungan partikel-partikel tanah. Perbedaan bentuk agregat tersebut akan memengaruhi porositas tanah, infiltrasi air, aerasi, penetrasi akar, serta kemampuan tanah dalam menyimpan air dan unsur hara. Oleh karena itu, identifikasi tipe struktur tanah sangat penting dalam evaluasi kesuburan fisik tanah dan pengelolaan lahan pertanian. Secara umum, struktur tanah dibedakan menjadi beberapa tipe utama, yaitu :

1. Struktur Remah (*Crumb*)

Agregat berbentuk bulat kecil dan gembur. Struktur ini sangat baik untuk pertanian karena memiliki aerasi dan drainase yang baik.

2. Struktur Granular

Mirip dengan struktur remah, tetapi agregat lebih padat. Umumnya ditemukan pada lapisan tanah atas.

3. Struktur Gumpal (*Blocky*)

Berbentuk kubus atau balok dan banyak ditemukan pada lapisan bawah tanah. Struktur ini masih cukup baik untuk pertumbuhan akar.

4. Struktur Prismatik

Berbentuk kolom vertikal memanjang dan umumnya ditemukan pada tanah daerah kering.

5. Struktur Kolumnar

Mirip struktur prismatik, tetapi bagian atas agregat membulat. Umumnya ditemukan pada tanah dengan kandungan natrium tinggi.

6. Struktur Lempeng (*Platy*)

Berbentuk pipih dan tersusun horizontal. Struktur ini kurang baik karena dapat menghambat infiltrasi air dan pertumbuhan akar.



Gambar 3.1: Penampakan ilustrasi struktur tanah

3.2 Porositas, Aerasi, dan Kapasitas Memegang Air

Selain tekstur dan struktur, sifat fisika tanah lainnya yang sangat berpengaruh terhadap pertumbuhan tanaman adalah porositas, aerasi, dan kapasitas memegang air (Budi and Neolainad, 2024). Ketiga sifat tersebut saling berhubungan dalam menentukan kemampuan tanah menyediakan air dan udara bagi akar tanaman. Kondisi porositas yang baik akan menciptakan keseimbangan antara ruang yang terisi air dan ruang yang terisi udara sehingga

akar dapat tumbuh dan berfungsi secara optimal. Oleh karena itu, pemahaman mengenai porositas, aerasi, dan kapasitas memegang air sangat penting dalam pengelolaan tanah untuk mendukung produktivitas tanaman.

3.2.1 Porositas

Porositas tanah adalah persentase ruang pori yang terdapat di antara partikel-partikel tanah terhadap volume total tanah. Ruang pori tersebut dapat terisi oleh air, udara, atau keduanya, sehingga berperan penting dalam menyediakan kebutuhan air dan oksigen bagi tanaman. Besarnya porositas dipengaruhi oleh tekstur, struktur, kandungan bahan organik, dan tingkat pemadatan tanah. Berdasarkan ukurannya, pori tanah dibedakan menjadi makropori dan mikropori (Hisyam, Permana and Hutagalung, 2024). Makropori berfungsi sebagai jalur pergerakan air dan udara, sedangkan mikropori berperan dalam menyimpan air yang dapat dimanfaatkan oleh tanaman. Keseimbangan antara kedua jenis pori tersebut sangat penting untuk mendukung pertumbuhan akar dan aktivitas mikroorganisme tanah. Tanah dengan porositas yang baik umumnya memiliki infiltrasi air, aerasi, dan perkembangan akar yang lebih optimal, sedangkan porositas yang rendah akibat pemadatan dapat menghambat pergerakan air, udara, dan pertumbuhan tanaman.

3.2.2 Aerasi Tanah

Aerasi tanah adalah proses pertukaran udara antara tanah dan atmosfer melalui ruang pori tanah. Udara di dalam tanah mengandung oksigen yang diperlukan oleh akar tanaman dan mikroorganisme untuk respirasi serta karbon dioksida yang dihasilkan dari proses tersebut. Aerasi yang baik menjamin ketersediaan oksigen bagi akar sehingga mendukung penyerapan air dan unsur hara (Shafansyah *et al.*, 2025) secara optimal. Sebaliknya, aerasi yang buruk dapat menghambat pertumbuhan akar dan menurunkan produktivitas tanaman. Aerasi tanah dipengaruhi oleh tekstur, struktur, kadar air, dan porositas tanah. Tanah berpasir umumnya memiliki aerasi lebih baik dibandingkan tanah liat karena memiliki lebih banyak pori-pori besar (makropori).

3.2.3 Kapasitas Memegang Air Tanah

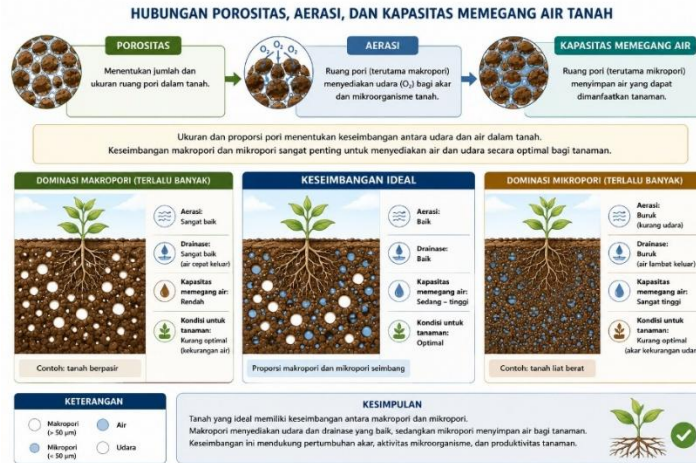
Kapasitas memegang air tanah adalah kemampuan tanah untuk menahan dan menyimpan air yang dapat dimanfaatkan oleh tanaman setelah kelebihan air

mengalir keluar akibat gaya gravitasi. Kemampuan ini dipengaruhi oleh tekstur dan struktur tanah, di mana tanah yang kaya liat dan bahan organik umumnya mampu menyimpan air lebih banyak dibandingkan tanah berpasir. Dalam ilmu tanah dikenal istilah kapasitas lapang (*field capacity*), yaitu kondisi ketika tanah menyimpan air dalam jumlah optimal bagi tanaman setelah air gravitasi mengalir keluar, serta titik layu permanen (*permanent wilting point*), yaitu kondisi ketika air dalam tanah tidak lagi dapat diserap oleh akar tanaman (Shafansyah *et al.*, 2025). Selisih antara kapasitas lapang dan titik layu permanen disebut air tersedia (*available water*), yaitu jumlah air yang dapat digunakan tanaman untuk mendukung pertumbuhan dan perkembangan secara optimal.

3.2.4 Hubungan porositas, aerasi, dan kapasitas tanah

Porositas, aerasi, dan kapasitas memegang air merupakan tiga sifat fisika tanah yang saling berkaitan erat. Porositas menentukan jumlah dan ukuran ruang pori yang tersedia dalam tanah. Ukuran pori tersebut selanjutnya memengaruhi kemampuan tanah dalam menyimpan air dan menyediakan udara bagi akar tanaman.

Tanah dengan proporsi makropori yang tinggi cenderung memiliki aerasi dan drainase yang baik, tetapi kemampuan memegang air lebih rendah (Shafansyah *et al.*, 2025). Sebaliknya, tanah dengan dominasi mikropori mampu menyimpan air lebih banyak, tetapi sering mengalami keterbatasan aerasi. Oleh karena itu, kondisi tanah yang ideal adalah tanah yang memiliki keseimbangan antara makropori dan mikropori sehingga mampu menyediakan air dan udara secara optimal bagi tanaman.



Gambar 3.2: Ilustrasi Hubungan porositas, aerasi, dan kapasitas tanah

3.3 Suhu Tanah dan Pengaruhnya terhadap Aktivitas Biologis

Suhu tanah merupakan salah satu sifat fisika tanah yang menunjukkan tingkat panas atau dinginnya tanah dan berperan penting dalam mengatur berbagai proses fisik, kimia, dan biologis di dalam tanah. Suhu tanah memengaruhi perkecambahan benih, pertumbuhan akar, penyerapan air dan unsur hara, serta aktivitas mikroorganisme yang berkontribusi terhadap kesuburan tanah (Shafansyah *et al.*, 2025). Suhu tanah ditentukan oleh keseimbangan antara energi panas yang diterima, terutama dari radiasi matahari, dan energi yang dilepaskan kembali ke lingkungan melalui radiasi, konduksi, konveksi, dan penguapan. Nilai suhu tanah dipengaruhi oleh berbagai faktor, seperti intensitas penyinaran matahari, kadar air, tekstur, warna tanah, kandungan bahan organik, tutupan vegetasi, serta kondisi cuaca, dan umumnya mengalami fluktuasi yang lebih besar pada lapisan permukaan dibandingkan lapisan tanah yang lebih dalam. Terdapat pengaruh suhu tanah terhadap aktivitas biologi antara lain:

1. Aktivitas Mikroorganisme Tanah

Mikroorganisme tanah, seperti bakteri, jamur, dan aktinomisetes, sangat dipengaruhi oleh suhu tanah. Suhu yang sesuai dapat meningkatkan aktivitas mikroorganisme sehingga proses dekomposisi bahan organik dan

pelepasan unsur hara berlangsung lebih cepat. Sebaliknya, suhu yang terlalu rendah akan memperlambat aktivitas mikroorganisme, sedangkan suhu yang terlalu tinggi dapat menyebabkan stres atau kematian mikroorganisme sehingga mengganggu keseimbangan biologis tanah.

2. Dekomposisi Bahan Organik

Suhu tanah memengaruhi proses dekomposisi bahan organik melalui aktivitas mikroorganisme pengurai. Pada suhu optimum, proses penguraian berlangsung lebih cepat sehingga unsur hara lebih mudah tersedia bagi tanaman. Namun, suhu yang terlalu tinggi dalam waktu lama dapat mempercepat kehilangan bahan organik tanah dan berpotensi menurunkan kualitas serta kesuburan tanah.

3. Pertumbuhan dan Perkembangan Akar

Suhu tanah berpengaruh langsung terhadap pertumbuhan dan perkembangan akar tanaman. Suhu yang optimal dapat merangsang pertumbuhan akar sehingga penyerapan air dan unsur hara berlangsung lebih efektif. Sebaliknya, suhu yang terlalu rendah dapat menghambat pertumbuhan akar, sedangkan suhu yang terlalu tinggi dapat merusak jaringan akar dan menurunkan kemampuan tanaman dalam menyerap air serta unsur hara.

4. Perkecambahan Benih

Proses perkecambahan sangat dipengaruhi oleh suhu tanah. Setiap jenis tanaman memiliki suhu minimum, optimum, dan maksimum untuk berkecambah. Pada suhu optimum, benih akan berkecambah lebih cepat dan seragam. Apabila suhu terlalu rendah atau terlalu tinggi, proses perkecambahan dapat terhambat atau bahkan gagal terjadi.

5. Ketersediaan Unsur Hara

Suhu tanah memengaruhi berbagai reaksi kimia dan biologis yang berkaitan dengan ketersediaan unsur hara. Pada suhu yang sesuai, aktivitas mikroorganisme dan proses pelapukan mineral berlangsung lebih efektif sehingga unsur hara lebih mudah tersedia bagi tanaman. Sebaliknya, suhu yang tidak sesuai dapat menghambat proses tersebut dan mengurangi efisiensi penyerapan hara.

Suhu tanah merupakan faktor lingkungan yang sangat berpengaruh terhadap aktivitas biologis di dalam tanah. Suhu yang sesuai akan meningkatkan aktivitas mikroorganisme, mempercepat dekomposisi bahan organik, mendukung pertumbuhan akar, memperbaiki perkecambahan benih, dan meningkatkan ketersediaan unsur hara bagi tanaman (Shafansyah *et al.*, 2025). Sebaliknya, suhu yang terlalu rendah atau terlalu tinggi dapat menghambat berbagai proses biologis tersebut. Oleh karena itu, pengelolaan suhu tanah yang baik menjadi salah satu kunci dalam menjaga kesuburan tanah dan meningkatkan produktivitas pertanian secara berkelanjutan.

3.4 Pemadatan Tanah dan Dampaknya terhadap Sistem Perakaran

Pemadatan tanah adalah proses meningkatnya kerapatan tanah akibat berkurangnya volume ruang pori karena adanya tekanan dari luar. Tekanan tersebut dapat berasal dari penggunaan alat dan mesin pertanian, lalu lintas kendaraan di lahan, pengolahan tanah yang berlebihan, injakan ternak, maupun curah hujan yang tinggi pada tanah dengan struktur yang kurang stabil. Pada tanah yang mengalami pemadatan, agregat tanah menjadi lebih rapat sehingga ruang yang tersedia untuk pergerakan air, udara, dan pertumbuhan akar semakin terbatas. Pemadatan dapat terjadi pada lapisan permukaan (topsoil) maupun lapisan bawah tanah (subsoil), yang masing-masing memberikan dampak berbeda terhadap pertumbuhan tanaman. Beberapa faktor yang dapat menyebabkan pemadatan tanah antara lain (Shafansyah *et al.*, 2025):

1. **Penggunaan alat dan mesin pertanian berat**, terutama saat kondisi tanah basah.
2. **Pengolahan tanah secara intensif dan berulang** pada kedalaman yang sama.
3. **Lalu lintas kendaraan pertanian** yang berulang pada jalur tertentu.
4. **Injakan ternak** pada lahan penggembalaan.
5. **Rendahnya kandungan bahan organik tanah** yang menyebabkan agregat tanah kurang stabil.

6. **Curah hujan tinggi** yang menyebabkan partikel tanah mudah tersusun rapat.

Sistem perakaran merupakan organ tanaman yang berfungsi menyerap air dan unsur hara serta menopang pertumbuhan tanaman. Perkembangan akar sangat dipengaruhi oleh kondisi fisik tanah, terutama tingkat kepadatan tanah. Beberapa dampak pemadatan terhadap sistem perakaran yaitu:

1. Menghambat Penetrasi Akar

Tanah yang padat memiliki hambatan mekanis yang lebih besar terhadap pertumbuhan akar. Akar harus mengeluarkan energi lebih banyak untuk menembus tanah sehingga pertumbuhannya menjadi lebih lambat. Pada kondisi pemadatan yang berat, akar bahkan tidak mampu menembus lapisan tanah tertentu dan hanya berkembang pada lapisan permukaan.

2. Mengurangi Panjang dan Sebaran Akar

Pemadatan menyebabkan sistem perakaran menjadi lebih pendek dan dangkal. Akar tidak dapat berkembang secara optimal ke arah horizontal maupun vertikal. Akibatnya, volume tanah yang dapat dijangkau akar menjadi lebih kecil sehingga kemampuan tanaman dalam memperoleh air dan unsur hara berkurang.

3. Menurunkan Ketersediaan Oksigen

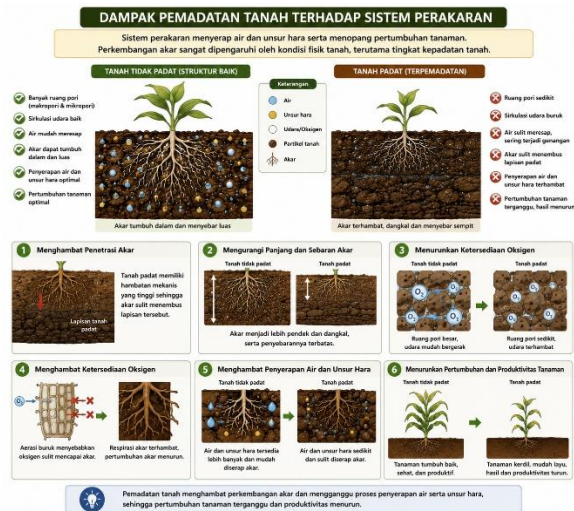
Berkurangnya ruang pori akibat pemadatan menyebabkan pertukaran udara di dalam tanah menjadi terhambat. Kondisi ini mengurangi ketersediaan oksigen yang dibutuhkan akar untuk respirasi. Kekurangan oksigen dapat menghambat pertumbuhan akar dan menurunkan aktivitas mikroorganisme tanah yang berperan dalam siklus hara.

4. Menghambat Penyerapan Air dan Unsur Hara

Sistem perakaran yang terbatas menyebabkan luas bidang serapan akar berkurang. Selain itu, kondisi aerasi yang buruk dapat menurunkan aktivitas fisiologis akar sehingga penyerapan air dan unsur hara menjadi kurang efisien. Dampaknya, tanaman lebih rentan mengalami cekaman kekeringan dan defisiensi hara.

5. Menurunkan Pertumbuhan dan Produktivitas Tanaman

Gangguan perkembangan akar pada akhirnya akan memengaruhi pertumbuhan tajuk, pembentukan biomassa, dan hasil panen. Tanaman yang tumbuh pada tanah padat umumnya memiliki tinggi tanaman lebih rendah, jumlah daun lebih sedikit, dan produksi yang lebih rendah dibandingkan tanaman yang tumbuh pada tanah dengan struktur yang baik.



Gambar 3.3: Ilustrasi Hubungan porositas, aerasi, dan kapasitas tanah

3.5 Pengelolaan Sifat Fisika Tanah dalam Sistem Agroekologis

Kondisi fisik tanah yang baik akan mendukung perkembangan akar, meningkatkan efisiensi penggunaan air dan unsur hara, serta memperbaiki aktivitas organisme tanah yang berkontribusi terhadap kesuburan tanah (Gofar, *et al.*, 2021). Dalam sistem agroekologis, pengelolaan tanah tidak hanya bertujuan meningkatkan hasil produksi, tetapi juga menjaga keseimbangan ekosistem dan keberlanjutan sumber daya alam. Pendekatan agroekologi menekankan pemanfaatan proses-proses alami, peningkatan keanekaragaman hayati, serta pengurangan ketergantungan terhadap input eksternal yang berpotensi merusak lingkungan. Oleh karena itu, pengelolaan sifat fisika tanah menjadi bagian penting dalam mendukung terciptanya agroekosistem yang sehat dan produktif.

3.5.1 Konsep Sistem Agroekologis

Sistem agroekologis merupakan pendekatan pertanian yang menerapkan prinsip-prinsip ekologi dalam pengelolaan lahan pertanian. Sistem ini memandang lahan pertanian sebagai suatu ekosistem yang terdiri atas interaksi antara tanah, tanaman, hewan, mikroorganisme, air, dan faktor lingkungan lainnya. Tujuan utama agroekologi adalah menciptakan sistem produksi yang produktif, ramah lingkungan, efisien dalam penggunaan sumber daya, serta mampu mempertahankan produktivitas dalam jangka panjang.

Dalam konteks pengelolaan tanah, agroekologi berupaya meningkatkan kualitas fisik, kimia, dan biologi tanah melalui pemanfaatan sumber daya lokal, daur ulang bahan organik, konservasi tanah dan air, serta peningkatan biodiversitas. Dengan demikian, tanah tidak hanya dipandang sebagai media tumbuh, tetapi juga sebagai komponen hidup yang harus dijaga kesehatannya. Porositas yang seimbang memungkinkan tersedianya air dan udara dalam jumlah yang cukup bagi tanaman dan organisme tanah. Selain itu, kapasitas memegang air yang baik membantu tanaman bertahan pada periode kekeringan serta meningkatkan efisiensi penggunaan air. Sebaliknya, kerusakan sifat fisika tanah, seperti pemadatan, penurunan bahan organik, dan degradasi struktur tanah, dapat menyebabkan penurunan produktivitas lahan, meningkatnya erosi, berkurangnya infiltrasi air, serta terganggunya aktivitas biologis tanah. Oleh karena itu, pengelolaan sifat fisika tanah menjadi langkah strategis dalam menjaga keberlanjutan agroekosistem.

3.5.2 Strategi Pengelolaan Sifat Fisika Tanah dalam Sistem Agroekologis

1. Penambahan Bahan Organik

Penambahan kompos, pupuk kandang, pupuk hijau, biochar, dan sisa tanaman dapat memperbaiki struktur tanah melalui pembentukan agregat yang lebih stabil. Bahan organik juga meningkatkan porositas, kapasitas memegang air, aktivitas organisme tanah, serta mengurangi risiko pemadatan tanah.

2. Penggunaan Tanaman Penutup Tanah (*Cover Crop*)

Tanaman penutup tanah berfungsi melindungi permukaan tanah dari erosi, meningkatkan kandungan bahan organik, dan memperbaiki struktur tanah melalui sistem perakarannya. Beberapa jenis leguminosa juga mampu menambat nitrogen sehingga membantu meningkatkan kesuburan tanah.

3. Mulsa Organik

Mulsa organik, seperti jerami dan sisa tanaman, membantu menjaga kelembapan tanah, mengurangi penguapan air, menekan pertumbuhan gulma, serta melindungi tanah dari erosi. Hasil dekomposisi mulsa juga menambah bahan organik tanah.

4. Pengelolaan Tanah Konservasi

Sistem olah tanah konservasi, seperti *minimum tillage* dan *no-tillage*, bertujuan mempertahankan struktur tanah, mengurangi gangguan terhadap organisme tanah, serta meningkatkan akumulasi bahan organik. Metode ini juga efektif dalam mengurangi erosi dan meningkatkan infiltrasi air.

5. Rotasi dan Diversifikasi Tanaman

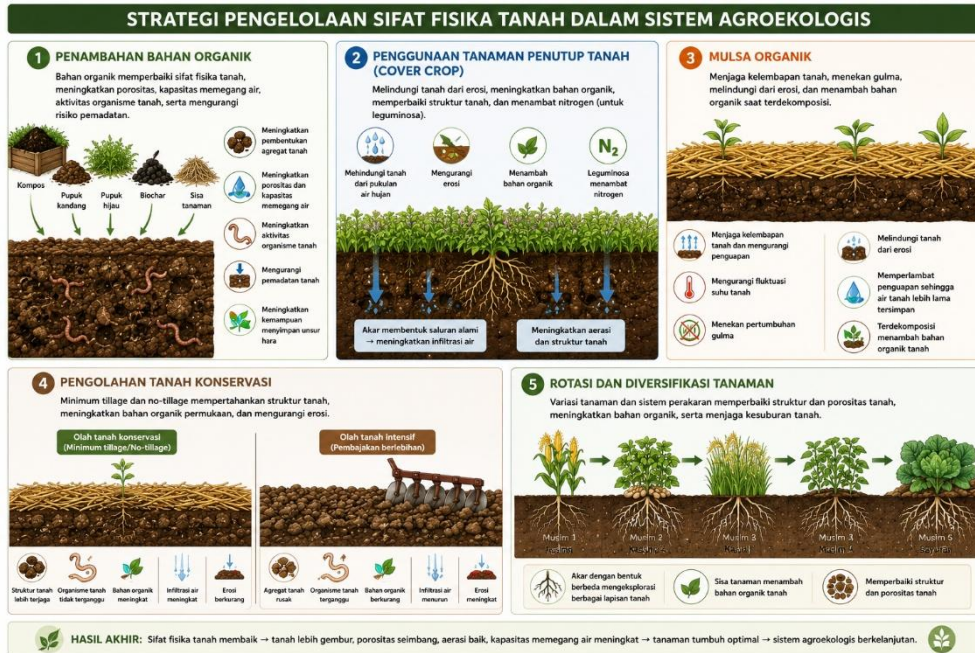
Rotasi dan diversifikasi tanaman membantu memperbaiki struktur dan porositas tanah melalui variasi sistem perakaran serta residu tanaman yang dihasilkan. Praktik ini juga mendukung peningkatan bahan organik dan menjaga produktivitas tanah secara berkelanjutan.

6. Pengendalian Pemadatan Tanah

Pemadatan tanah dapat dikurangi dengan membatasi penggunaan alat berat, menghindari pengolahan tanah saat kondisi terlalu basah, dan meningkatkan kandungan bahan organik. Upaya ini membantu menjaga porositas, aerasi, dan perkembangan akar tanaman.

7. Konservasi Tanah dan Air

Pemadatan tanah dapat dikurangi dengan membatasi penggunaan alat berat, menghindari pengolahan tanah saat kondisi terlalu basah, dan meningkatkan kandungan bahan organik. Upaya ini membantu menjaga porositas, aerasi, dan perkembangan akar tanaman.



Gambar 3.4: Strategi Pengelolaan Sifat Fisika Tanah dalam Sistem Agroekologis

BAB 4

SIFAT KIMIA TANAH DAN KETERSEDIAAN HARA UNTUK TANAMAN

Pendahuluan

Kimia tanah merupakan disiplin ilmu fundamental yang mendalami komposisi kimia, reaksi, dan transformasi yang terjadi di dalam sistem tanah. Ilmu ini berfungsi sebagai jembatan ilmiah yang menghubungkan mineralogi, geologi, biologi, dan ilmu lingkungan, sehingga memungkinkan pemahaman komprehensif tentang bagaimana tanah berfungsi sebagai media hidup. Dalam sistem agroekologi, tanah tidak hanya berfungsi sebagai media tumbuh, tetapi juga sebagai lingkungan kimia yang dinamis tempat berlangsungnya transformasi unsur hara, interaksi mineral, dan aktivitas biologis yang mendukung pertumbuhan tanaman.

Dalam sistem yang kompleks ini, ketersediaan nutrisi, penting untuk mendorong pertumbuhan dan produktivitas tanaman. Seperti yang ditekankan oleh Tan, (2011), kimia tanah berfokus pada interaksi antar fase tanah, di mana reaksi kimia mengontrol distribusi dan mobilitas unsur-unsur yang penting untuk nutrisi tanaman dan keberlanjutan lingkungan.

Pemahaman mengenai sifat kimia tanah menjadi penting dalam pengelolaan pertanian berkelanjutan karena berkaitan langsung dengan efisiensi pemupukan, produktivitas tanaman, dan kesehatan tanah dalam jangka panjang. Oleh karena itu, pembahasan pada bab ini difokuskan pada reaksi tanah (pH), kapasitas tukar kation, dinamika unsur hara, peran bahan organik, serta berbagai kendala kimia tanah yang memengaruhi pertumbuhan tanaman.

4.1 Reaksi Tanah (pH) dan Pengaruhnya terhadap Ketersediaan Nutrien

Reaksi tanah, yang umumnya dinyatakan sebagai pH, merupakan salah satu karakteristik kimia paling berpengaruh yang mengatur perilaku tanah dan pertumbuhan tanaman. Di dalam lingkungan tanah, banyak reaksi terjadi secara bersamaan antara mineral, bahan organik, mikroorganisme, air, dan ion terlarut. Interaksi ini secara kolektif menentukan ketersediaan nutrisi dan pada akhirnya memengaruhi produktivitas tanaman (Hun and Sarun, 2026). Karena pH memengaruhi kelarutan, mobilitas, dan transformasi biologis nutrisi, pH secara luas diakui sebagai pengatur utama proses kimia tanah (Tan, 2011; Brady and Weil, 2016)

Dari sudut pandang kimia, pH tanah mencerminkan kelimpahan relatif ion hidrogen (H^+) dan ion hidroksil (OH^-) dalam larutan tanah. Ketika ion hidrogen mendominasi, tanah menunjukkan karakteristik asam, sedangkan dominasi ion hidroksil menghasilkan kondisi basa. Keseimbangan ini tidak statis tetapi dipengaruhi secara dinamis oleh pelapukan mineral, proses biologis, dan praktik pengelolaan lahan (Brady and Weil, 2016). Sifat logaritmik skala pH berarti bahwa bahkan pergeseran numerik kecil pun mewakili perubahan kimia yang substansial. Misalnya, penurunan satu unit pH menunjukkan peningkatan sepuluh kali lipat dalam aktivitas ion hidrogen, menekankan bagaimana fluktuasi kecil dapat secara signifikan mengubah kimia nutrisi dan respons tanaman (Brady and Weil, 2016).

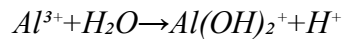
Dalam ekosistem pertanian, pH tanah sering digambarkan sebagai “determinan utama” Karena pengaruhnya yang luas terhadap transformasi kimia dan biologi (Hun and Sarun, 2026). Banyak reaksi nutrisi, aktivitas mikroba, dan proses pelarutan mineral hanya terjadi dalam rentang pH tertentu. Akibatnya, pH tanah tidak hanya menggambarkan kondisi tanah; tetapi juga secara aktif mengaturnya (Tan, 2011).

4.1.1 Sifat Keasaman dan Alkalinitas Tanah

Keasaman tanah terbentuk melalui berbagai proses alami dan antropogenik. Salah satu kontributor paling signifikan terhadap keasaman tanah di daerah tropis lembap adalah pelarutan kation basa seperti kalsium (Ca^{2+}), magnesium (Mg^{2+}), dan kalium (K^+). Curah hujan yang tinggi mempercepat pergerakan

air ke bawah melalui profil tanah, membawa kation basa penting ini menjauh dari zona akar (Ansor Hasibuan *et al.*, 2025) dan menggantinya dengan ion hidrogen (H^+) dan aluminium (Al^{3+}) (Anwar and Sudadi, 2013).

Di antara mekanisme kimia yang berkontribusi terhadap keasaman tanah, hidrolisis ion aluminium memainkan peran yang sangat penting. Aluminium, yang menjadi larut dalam kondisi asam, bereaksi dengan air untuk melepaskan ion hidrogen tambahan, sehingga meningkatkan keasaman tanah. Proses ini dapat diwakili oleh reaksi berikut:



Melalui reaksi hidrolisis ini, aluminium bertindak sebagai sumber ion hidrogen yang berkelanjutan, mempertahankan atau bahkan meningkatkan keasaman tanah dari waktu ke waktu (Nursyamsi and Suprihati, 2005). Hidrolisis aluminium merupakan salah satu jalur kimia dominan yang bertanggung jawab atas keasaman yang terus-menerus pada tanah yang sangat lapuk. Alkalinitas tanah, di sisi lain, seringkali timbul dari akumulasi garam karbonat dan bikarbonat, terutama di daerah yang dicirikan oleh curah hujan rendah dan tingkat penguapan tinggi. Dalam kondisi seperti itu, kalsium karbonat ($CaCO_3$) dan bahan alkali lainnya terakumulasi di dalam profil tanah, meningkatkan pH tanah dan mengubah pola ketersediaan nutrisi (Brady and Weil, 2016). Praktik pertanian intensif turut memengaruhi dinamika pH tanah. Penggunaan pupuk berbasis amonium memicu proses nitrifikasi yang menghasilkan ion hidrogen dalam tanah. Dalam jangka panjang, penggunaan pupuk secara berulang dapat meningkatkan keasaman tanah serta memengaruhi kapasitas penyangga dan keseimbangan unsur hara.

4.1.2 pH Tanah dan Kelarutan Nutrien

Ketersediaan unsur hara penting bagi tanaman sangat bergantung pada pH tanah karena kelarutan unsur hara berubah secara drastis di seluruh spektrum pH. Setiap unsur hara menunjukkan kelarutan optimal dalam kondisi kimia tertentu, dan penyimpangan dari kisaran ini dapat mengurangi efisiensi penyerapan tanaman. Pada tanah asam, ketersediaan fosfor sering menurun karena ion fosfat bereaksi dengan aluminium dan besi membentuk senyawa yang tidak larut. Reaksi ini secara efektif memobilisasi fosfor, mencegahnya tetap berada dalam larutan tanah tempat akar tanaman dapat menyerapnya.

Akibatnya, kekurangan fosfor sering terjadi pada tanah tropis yang mengalami pelapukan hebat meskipun terdapat cadangan fosfor total yang signifikan (Marschner and Marschner, 2012).

Demikian pula, kondisi asam meningkatkan kelarutan ion aluminium dan mangan. Meskipun sejumlah kecil unsur-unsur ini bermanfaat, konsentrasi yang berlebihan dapat merusak jaringan akar dan membatasi penyerapan nutrisi. Toksisitas aluminium menjadi salah satu penyebab utama terganggunya pertumbuhan tanaman pada tanah masam, terutama di daerah tropis dengan tingkat pencucian dan pelapukan tanah yang tinggi (Fageria and Baligar, 2008).

Dalam kondisi pH tinggi, unsur hara mikro seperti besi (Fe), seng (Zn), tembaga (Cu), dan mangan (Mn) menjadi kurang larut karena reaksi pengendapan. Akibatnya, tanaman dapat mengalami defisiensi unsur mikro meskipun kandungan total unsur tersebut sebenarnya cukup (Marschner and Marschner, 2012). Secara umum, kisaran pH 5,5–7,5 memungkinkan tanaman tumbuh optimal. Dengan kondisi ini, ketersediaan unsur hara, aktivitas mikroba, dan pertumbuhan akar berlangsung lebih baik sehingga risiko kekurangan maupun toksisitas unsur hara dapat diminimalkan (Brady and Weil, 2016).

4.1.3 Kapasitas Penyangga Tanah dan Ketahanan terhadap Perubahan pH

Meskipun pH tanah memberikan gambaran sekilas tentang kondisi kimia tanah, pH tidak sepenuhnya menggambarkan seberapa tahan tanah terhadap perubahan. Beberapa tanah merespons dengan cepat terhadap penambahan asam atau basa, sedangkan yang lain mempertahankan tingkat pH yang relatif stabil bahkan setelah masukan bahan kimia berulang. Ketahanan terhadap perubahan pH ini dikenal sebagai kapasitas penyangga tanah dan hal ini merupakan faktor penting dalam pengelolaan kesuburan tanah jangka panjang. Kapasitas penyangga tanah dipengaruhi oleh kandungan lempung dan bahan organik yang mampu menahan ion hidrogen (H^+) dan aluminium (Al^{3+}), sehingga perubahan pH tidak terjadi secara drastis (Tan, 2011). Oleh karena itu, tanah berlempung umumnya memerlukan lebih banyak kapur untuk meningkatkan pH dibandingkan tanah berpasir dengan tingkat

keasaman yang sama (Brady and Weil, 2016). Selain itu, bahan organik juga membantu menjaga kestabilan pH melalui gugus fungsional yang dapat bereaksi secara reversibel dengan ion hidrogen.

4.2 Reaksi Tanah (pH) dan Pengaruhnya terhadap Ketersediaan Nutrien

Setelah membahas reaksi tanah dan peran pengaturannya dalam ketersediaan unsur hara, konsep penting selanjutnya dalam kimia tanah berkaitan dengan kemampuan tanah untuk menahan dan menukar ion unsur hara. Sementara pH tanah menentukan lingkungan kimia tempat terjadinya reaksi, kemampuan partikel tanah untuk menahan ion bermuatan. Pada akhirnya, hal ini mengatur bagaimana nutrisi tetap tersedia untuk diserap tanaman. Sifat ini dikenal sebagai Kapasitas Pertukaran Kation (KTK) dan merupakan salah satu indikator terpenting kesuburan tanah. Dalam sistem tanah, banyak unsur hara terdapat dalam bentuk ion dan membawa muatan listrik positif. Ion-ion bermuatan positif ini disebut sebagai kation. Termasuk unsur-unsur penting seperti kalsium (Ca^{2+}), magnesium (Mg^{2+}), kalium (K^{+}), amonium (NH_4^{+}), dan logam jejak seperti seng (Zn^{2+}) dan besi (Fe^{2+}). Tanpa mekanisme untuk menahan ion-ion ini, air hujan atau air irigasi akan dengan cepat mengangkutnya melewati zona perakaran. Koloid tanah, yang terutama terdiri dari mineral lempung dan bahan organik, menyediakan mekanisme retensi ini melalui daya tarik elektrostatis (Tan, 2011).

4.2.1 Konsep Dasar Pertukaran Kation

Kapasitas pertukaran kation mengacu pada jumlah total ion bermuatan positif yang dapat ditahan oleh partikel tanah pada permukaannya. Biasanya dinyatakan dalam satuan sentimol muatan per kilogram tanah (cmolc kg^{-1}). Pengukuran ini mencerminkan kelimpahan situs bermuatan negatif yang tersedia untuk mengikat kation dan mencegahnya hilang melalui pelarutan (Brady and Weil, 2016). Pada tingkat mikroskopis, partikel tanah berperilaku mirip dengan permukaan bermuatan dalam larutan kimia. Mineral lempung memiliki cacat struktural dan tepi yang pecah yang menciptakan muatan negatif permanen. Muatan negatif ini menarik kation dari larutan tanah di sekitarnya, membentuk sistem dinamis di mana ion terus menerus dipertukarkan antara permukaan padat dan fase.

Proses pertukaran itu sendiri bersifat reversibel dan selektif. Ketika kation baru masuk ke dalam larutan tanah, mereka bersaing dengan ion yang sudah ada untuk tempat perlekatan pada koloid tanah. Misalnya, ketika ion kalsium dimasukkan melalui pengapuran, mereka dapat menggantikan ion hidrogen dan aluminium yang sebelumnya melekat pada tempat pertukaran. Mekanisme penggantian ini menjelaskan mengapa pengapuran tidak hanya meningkatkan pH tetapi juga memperbaiki keseimbangan nutrisi dalam sistem tanah (Brady and Weil, 2016)

Reversibilitas pertukaran kation memainkan peran penting dalam nutrisi tanaman. Akar menyerap ion nutrisi langsung dari larutan tanah, tetapi ketika ion dihilangkan, kation tambahan dilepaskan dari situs pertukaran untuk menjaga keseimbangan. Dengan cara ini, koloid tanah berfungsi sebagai reservoir yang mengatur pasokan nutrisi dari waktu ke waktu daripada membiarkan penipisan yang cepat (Marschner and Marschner, 2012).

4.2.2 Pengaruh pH Tanah terhadap Kapasitas Pertukaran Kation

pH tanah tidak hanya memengaruhi kelarutan nutrisi tetapi juga secara langsung memengaruhi jumlah situs pertukaran yang tersedia di dalam tanah. Hubungan ini terjadi terutama melalui perubahan muatan yang bergantung pada pH yang terkait dengan bahan organik dan mineral bermuatan variabel.

Pada tingkat pH rendah, ion hidrogen menempati banyak situs pertukaran, mengurangi ketersediaan muatan negatif untuk retensi nutrisi. Seiring peningkatan pH melalui pengapuran atau proses alami, ion hidrogen dinetralkan dan digantikan oleh kation nutrisi seperti kalsium dan magnesium. Pergeseran ini meningkatkan KTK secara keseluruhan dan meningkatkan kesuburan tanah (Brady and Weil, 2016).

Tanah tropis yang sangat lapuk sering menunjukkan perilaku muatan yang sangat bergantung pada pH. Pada tanah seperti itu, peningkatan kecil pada pH dapat menghasilkan peningkatan substansial dalam kapasitas pertukaran, meningkatkan retensi nutrisi dan mengurangi toksisitas aluminium. Fenomena ini menjelaskan mengapa pengelolaan pH sangat penting dalam sistem pertanian tropis.

4.3 Bahan Organik Tanah dan Perannya dalam Ketersediaan Nutrien

Bahan organik tanah (SOM) adalah salah satu komponen terpenting yang memengaruhi ketersediaan nutrisi di tanah pertanian. Meskipun biasanya hanya mewakili sebagian kecil dari total massa tanah, kontribusinya terhadap sifat kimia tanah sangat besar. Bahan organik bertindak sebagai sumber nutrisi, dan sebuah pengatur pelepasan nutrisi ke dalam larutan tanah.

Dalam konteks nutrisi tanaman, bahan organik tanah berfungsi sebagai pemasok nutrisi dan agen penstabil. Saat bahan organik seperti sisa tanaman, akar, dan mikroorganisme terurai, nutrisi penting secara bertahap dilepaskan ke dalam bentuk yang dapat diserap tanaman. Proses ini memainkan peran yang sangat penting dalam mempertahankan ketersediaan nutrisi dari waktu ke waktu, terutama pada tanah yang menerima masukan eksternal terbatas (Tan, 2011). Bahan organik membantu meningkatkan kapasitas tukar kation tanah melalui gugus bermuatan negatif yang mampu menahan unsur hara, sehingga ketersediaan nutrisi menjadi lebih stabil (Brady and Weil, 2016). Selain itu, bahan organik juga mendukung aktivitas mikroba yang berperan dalam mendaur ulang unsur hara melalui proses mineralisasi dan imobilisasi (Gliessman, 2015)

4.3.1 Konsep Dasar Pertukaran Kation

Bahan organik tanah berasal dari akumulasi dan dekomposisi sisa-sisa tumbuhan, sisa-sisa hewan, dan biomassa mikroba. Seiring waktu, bahan-bahan ini mengalami transformasi melalui proses biologis dan kimia, menghasilkan campuran senyawa organik dengan berbagai tingkat stabilitas.

Bahan organik yang masuk ke dalam tanah meliputi daun-daun yang gugur, sisa-sisa tanaman, pelapukan akar, dan pupuk kandang. Bahan-bahan ini kaya akan senyawa yang mudah terurai seperti gula, protein, dan asam amino. Mikroorganisme dengan cepat memanfaatkan senyawa-senyawa ini sebagai sumber energi, memulai proses dekomposisi (Tan, 2011). Saat dekomposisi berlanjut, senyawa yang lebih tahan seperti selulosa dan lignin tetap ada. Zat-zat ini terurai perlahan dan berkontribusi pada pembentukan humus, yang mewakili fraksi stabil dari bahan organik tanah. Humus sangat penting untuk ketersediaan nutrisi karena mengandung banyak gugus fungsional bermuatan

negatif yang mengikat kation nutrisi dan mencegah kehilangannya dari profil tanah (Hun and Sarun, 2026).

Kandungan bahan organik tanah dipengaruhi oleh iklim, vegetasi, dan pengelolaan lahan (Kumar *et al.*, 2025). Di daerah tropis, suhu dan curah hujan yang tinggi mempercepat dekomposisi sehingga kadar bahan organik cenderung lebih rendah (Anwar and Sudadi, 2013). Namun, penambahan bahan organik secara berkelanjutan melalui sisa tanaman atau bahan organik lainnya dapat membantu mempertahankan kesuburan dan ketersediaan unsur hara.

4.3.2 Bahan Organik Tanah dan Ketersediaan Fosfor

Ketersediaan fosfor (P) dalam tanah seringkali terbatas karena unsur ini mudah membentuk senyawa yang tidak larut dengan aluminium, besi, atau kalsium, tergantung pada kondisi pH tanah. Di banyak tanah, terutama tanah tropis yang asam, fosfor terikat oleh aluminium dan besi, sehingga ketersediaannya untuk penyerapan tanaman menjadi berkurang. Bahan organik tanah memainkan peran penting dalam meningkatkan ketersediaan fosfor melalui beberapa mekanisme kimia (Arévalo-Gardini *et al.*, 2015).

Menurut Arévalo-Gardini *et al.*, (2015), salah satu mekanisme penting melibatkan pelepasan asam organik selama dekomposisi bahan organik. Asam organik ini dapat berikatan dengan aluminium (Al^{3+}) dan besi (Fe^{3+}), mengurangi kemampuan keduanya untuk bereaksi dengan ion fosfat. Akibatnya, lebih banyak fosfor tetap dalam bentuk terlarut yang dapat diserap oleh akar tanaman. Bahan organik membantu meningkatkan ketersediaan fosfor dengan membentuk kompleks bersama ion logam seperti aluminium dan besi yang biasanya mengikat fosfor dalam tanah ((Brady and Weil, 2016)). Selain itu, bahan organik juga menjadi sumber fosfor melalui proses mineralisasi sisa tanaman dan senyawa organik oleh mikroorganisme (Anwar and Sudadi, 2013; Arévalo-Gardini *et al.*, 2015). Melalui proses tersebut, bahan organik berperan penting dalam menjaga ketersediaan fosfor bagi tanaman, terutama pada tanah yang memiliki tingkat fiksasi fosfor tinggi.

4.3.3 Ketersediaan Bahan Organik Tanah dan Unsur Hara Mikro

Mikronutrien seperti besi (Fe), seng (Zn), tembaga (Cu), dan mangan (Mn) dibutuhkan dalam jumlah kecil tetapi sangat penting untuk proses metabolisme tanaman. Ketersediaan nutrisi ini sangat dipengaruhi oleh bahan organik tanah, terutama melalui pembentukan kompleks organik. Senyawa organik dalam tanah mengandung gugus fungsional yang mampu mengikat logam mikronutrien. Ikatan ini membentuk kompleks stabil yang mencegah mikronutrien menjadi tidak larut atau tidak tersedia. Dengan cara ini, bahan organik membantu menjaga mikronutrien dalam bentuk yang tetap dapat diakses oleh akar tanaman (Marschner and Marschner, 2012).

Proses ini sangat penting pada tanah netral hingga basa, di mana unsur hara mikro seperti besi dan seng seringkali menjadi tidak tersedia karena reaksi pengendapan. Kompleks organik membantu menjaga unsur-unsur ini tetap larut dalam larutan tanah, mengurangi risiko kekurangan unsur hara mikro (Hun and Sarun, 2026).

Pada tanah asam, bahan organik juga membantu mengatur ketersediaan unsur hara mikro dengan mencegah kelarutan yang berlebihan. Tanpa stabilisasi organik, unsur hara mikro tertentu terutama mangan dan besi dapat mencapai tingkat toksik dalam kondisi asam yang kuat (Tan, 2011).

Dengan demikian, bahan organik tanah berkontribusi dalam menjaga ketersediaan unsur hara mikro dalam kisaran optimal, mencegah kekurangan dan keracunan.

4.4 Sifat Kimia Tanah yang Mempengaruhi Ketersediaan Makronutrien

Makronutrien dibutuhkan oleh tanaman dalam jumlah yang relatif besar dan memainkan peran penting dalam pertumbuhan, perkembangan, dan proses metabolisme. Ketersediaan makronutrien dalam tanah tidak hanya ditentukan oleh jumlah totalnya, tetapi juga oleh bentuk kimianya dan interaksinya dengan komponen tanah. Sifat-sifat tanah seperti pH, kapasitas pertukaran kation (KTK), kandungan bahan organik, dan komposisi mineral sangat memengaruhi apakah nutrisi tetap tersedia untuk diserap tanaman.

Di antara unsur hara makro, nitrogen (N), fosfor (P), dan kalium (K) paling sering menjadi unsur hara pembatas di tanah pertanian. Unsur hara ini mengalami berbagai reaksi kimia di dalam tanah yang memengaruhi mobilitas, retensi, dan transformasinya menjadi bentuk yang tersedia bagi tanaman. Memahami perilaku kimia unsur hara ini sangat penting untuk menjaga pasokan unsur hara yang efisien dan mempertahankan produktivitas tanaman (Brady and Weil, 2016).

Selain unsur hara primer (N, P, K), unsur hara sekunder seperti kalsium (Ca), magnesium (Mg), dan sulfur (S) juga memberikan kontribusi signifikan terhadap pertumbuhan tanaman. Ketersediaan unsur hara tersebut bergantung pada kondisi kimia tanah, khususnya pH dan proses pertukaran yang dibahas pada bagian sebelumnya (Tan, 2011).

4.4.1 Ketersediaan Nitrogen dalam Tanah

Nitrogen adalah salah satu nutrisi paling penting yang dibutuhkan untuk pertumbuhan tanaman. Nitrogen merupakan komponen utama protein, enzim, klorofil, dan asam nukleat. Meskipun nitrogen terdapat dalam jumlah besar di atmosfer, tanaman terutama bergantung pada nitrogen yang ada di tanah dalam bentuk amonium (NH_4^+) dan nitrat (NO_3^-).

Sebagian besar nitrogen dalam tanah ditemukan dalam bentuk organik dan hanya tersedia bagi tanaman setelah dekomposisi mikroba. Melalui mineralisasi, senyawa nitrogen organik diubah menjadi amonium, yang kemudian dapat mengalami nitrifikasi untuk membentuk nitrat. Kedua bentuk tersebut mudah diserap oleh akar tanaman (Tan, 2011).

pH tanah memainkan peran utama dalam mengatur transformasi nitrogen. Bakteri nitrifikasi berfungsi paling efisien di tanah dengan pH mendekati netral. Di tanah yang sangat asam, aktivitas mikroba menurun, mengurangi konversi amonium menjadi nitrat dan membatasi ketersediaan nitrogen.

Ketersediaan nitrogen juga dipengaruhi oleh proses pelindian. Ion nitrat sangat mudah larut dan tidak mengikat kuat pada partikel tanah, sehingga rentan terhadap pergerakan ke bawah bersama air. Di daerah dengan curah hujan tinggi, kehilangan nitrat melalui pelindian merupakan jalur utama penipisan nitrogen (Anwar and Sudadi, 2013).

4.4.2 Ketersediaan Fosfor dalam Tanah

Ketersediaan fosfor dalam tanah seringkali terbatas karena fosfor mudah bereaksi dengan unsur lain membentuk senyawa yang tidak larut. Meskipun tanah mungkin mengandung total fosfor yang cukup besar, hanya sebagian kecil yang tetap tersedia bagi tanaman pada waktu tertentu. Pada tanah asam, fosfor bereaksi dengan aluminium dan besi membentuk senyawa yang sulit diserap oleh tanaman (Nursyamsi and Suprihati, 2005). Pada tanah basa, fosfor cenderung bereaksi dengan kalsium, menghasilkan senyawa kalsium fosfat dengan kelarutan rendah. Reaksi-reaksi ini secara signifikan mengurangi konsentrasi ion fosfat yang tersedia bagi tanaman dalam larutan tanah.

pH tanah sangat memengaruhi ketersediaan fosfor. Ketersediaan maksimum umumnya terjadi pada kondisi sedikit asam hingga netral, biasanya antara pH 6,0 dan 7,0. Dalam kisaran ini, reaksi fiksasi fosfor diminimalkan, sehingga memungkinkan penyerapan nutrisi yang lebih besar oleh akar tanaman (Hun and Sarun, 2026).

Bahan organik juga berkontribusi terhadap ketersediaan fosfor dengan melepaskan asam organik yang mengurangi fiksasi fosfor. Seperti yang dibahas di Bagian 4.3, proses ini membantu menjaga fosfor dalam bentuk terlarut yang sesuai untuk penyerapan tanaman.

4.4.3 Ketersediaan Kalium dalam Tanah

Kalium adalah unsur hara makro esensial yang berperan dalam aktivasi enzim, pengaturan air, dan transportasi karbohidrat di dalam tanaman. Tidak seperti nitrogen dan fosfor, kalium tidak membentuk bagian dari senyawa organik tetapi terutama terdapat sebagai ion yang larut atau dapat dipertukarkan di dalam tanah.

Ketersediaan kalium sangat berkaitan dengan KTK tanah dan komposisi mineral. Kalium yang dapat dipertukarkan tertahan pada permukaan tanah yang bermuatan negatif dan dilepaskan ke dalam larutan tanah saat tanaman menyerap nutrisi. Tanah dengan KTK tinggi umumnya menahan kalium lebih efektif daripada tanah dengan KTK rendah (Hun and Sarun, 2026).

Selain kalium yang dapat dipertukarkan, sebagian kalium juga terdapat dalam bentuk mineral seperti feldspar dan mika. Mineral-mineral ini melepaskan kalium secara perlahan melalui proses pelapukan, sehingga menyediakan sumber nutrisi jangka panjang (Brady and Weil, 2016).

Namun, kalium juga dapat hilang melalui pelindian, terutama pada tanah berpasir dengan kapasitas pertukaran yang terbatas. Kondisi ini sering menyebabkan kekurangan kalium di daerah dengan curah hujan tinggi.

4.4.4 Ketersediaan Kalsium dan Magnesium

Kalsium (Ca) dan magnesium (Mg) diklasifikasikan sebagai makronutrien sekunder karena tanaman membutuhkannya dalam jumlah sedang dibandingkan dengan nitrogen, fosfor, dan kalium. Meskipun dibutuhkan dalam jumlah yang lebih kecil daripada nutrisi primer, kalsium dan magnesium memainkan peran penting dalam pertumbuhan tanaman dan keseimbangan kimia tanah. Kalsium berperan dalam menjaga struktur dinding sel dan stabilitas membran, sedangkan magnesium merupakan komponen utama klorofil dan berfungsi dalam aktivasi enzim (Brady and Weil, 2016). Di dalam tanah, kedua unsur ini umumnya berada dalam bentuk kation dapat dipertukarkan yang terikat pada partikel bermuatan negatif. Ketersediaannya dipengaruhi oleh kapasitas tukar kation (KTK) tanah. Tanah dengan KTK tinggi cenderung mampu menahan kalsium dan magnesium lebih baik, sedangkan tanah berpasir dengan KTK rendah lebih mudah kehilangan kedua unsur tersebut melalui pelindian, terutama pada daerah dengan curah hujan tinggi

4.4.5 Ketersediaan Sulfur

Sulfur (S) adalah unsur hara makro sekunder penting lainnya yang berkontribusi pada pertumbuhan tanaman dan proses metabolisme. Sulfur merupakan komponen dari asam amino, vitamin, dan enzim tertentu, serta berperan dalam sintesis protein dan pembentukan klorofil. Ketersediaan sulfur dalam tanah sangat berkaitan dengan kandungan bahan organik dan aktivitas mikroba.

Sebagian besar sulfur dalam tanah terdapat dalam bentuk organik. Mirip dengan nitrogen, sulfur hanya tersedia bagi tanaman setelah mineralisasi oleh

mikroorganisme tanah. Selama proses ini, senyawa sulfur organik diubah menjadi sulfat (SO_4^{2-}), bentuk yang diserap tanaman melalui akarnya (Tan, 2011).

Ion sulfat mudah bergerak di dalam tanah dan rentan tercuci, terutama pada tanah berpasir dengan kandungan bahan organik rendah. Di daerah bercurah hujan tinggi, kondisi ini dapat menyebabkan kekurangan sulfur pada tanaman. Selain itu, pH tanah turut memengaruhi proses mineralisasi sulfur oleh mikroorganisme. Kondisi tanah yang terlalu asam atau basa dapat menurunkan aktivitas mikroba sehingga pelepasan sulfat ke dalam tanah menjadi lebih lambat (Anwar and Sudadi, 2013).

4.5 Kendala Kimia yang Membatasi Ketersediaan Nutrien

Meskipun tanah mengandung jumlah nutrisi yang cukup, kondisi kimia tertentu dapat membatasi ketersediaan nutrisi bagi tanaman. Faktor pembatas ini seringkali timbul dari keasaman tanah, salinitas, atau konsentrasi unsur tertentu yang berlebihan yang mengganggu penyerapan nutrisi. Kendala kimia semacam itu tidak hanya mengurangi efisiensi nutrisi tetapi juga dapat menyebabkan gejala toksisitas yang berdampak negatif pada pertumbuhan tanaman.

Di antara kendala kimia yang paling umum di banyak tanah pertanian, terutama di daerah tropis adalah toksisitas aluminium, toksisitas besi, dan salinitas (Ansor Hasibuan *et al.*, 2025). Faktor-faktor ini memengaruhi ketersediaan nutrisi melalui reaksi kimia yang mengubah kelarutan, mobilitas, dan penyerapan nutrisi oleh akar tanaman.

Memahami kendala-kendala ini sangat penting untuk meningkatkan pengelolaan kesuburan tanah karena memperbaiki kondisi kimia yang membatasi dan seringkali menghasilkan peningkatan yang signifikan dalam ketersediaan nutrisi dan produktivitas tanaman.

4.5.1 Toksisitas Aluminium pada Tanah Asam

Toksisitas aluminium adalah salah satu keterbatasan kimia paling signifikan yang memengaruhi ketersediaan nutrisi di tanah asam. Aluminium secara alami terdapat di sebagian besar tanah sebagai bagian dari mineral lempung. Namun, dalam kondisi yang sangat asam biasanya di bawah pH 5,5,

aluminium menjadi larut dan melepaskan ion aluminium (Al^{3+}) ke dalam larutan tanah. Aluminium terlarut mengganggu pertumbuhan akar dengan merusak sel-sel akar dan menghambat pemanjangan akar. Ketika perkembangan akar terhambat, kemampuan tanaman untuk menyerap nutrisi penting seperti nitrogen, fosfor, kalsium, dan magnesium menurun secara signifikan (Tan, 2011).

Selain memengaruhi pertumbuhan akar, aluminium juga bereaksi dengan ion fosfat membentuk senyawa aluminium fosfat yang tidak larut. Reaksi ini mengurangi ketersediaan fosfor, bahkan ketika kadar fosfor total dalam tanah tampak mencukupi (Nursyamsi and Suprihati, 2005).

Salah satu metode paling efektif untuk mengurangi toksisitas aluminium adalah dengan pengapuran tanah asam. Penambahan kapur meningkatkan pH tanah dan mengubah aluminium yang larut menjadi bentuk yang tidak larut sehingga kurang berbahaya bagi tanaman. Pengapuran juga meningkatkan ketersediaan kalsium, sehingga semakin meningkatkan kondisi kesuburan tanah (Anwar and Sudadi, 2013).

4.5.2 Toksisitas Besi pada Tanah dengan Drainase Buruk

Toksisitas besi umumnya terjadi pada tanah yang mengalami genangan air berkepanjangan atau drainase yang buruk. Dalam kondisi seperti itu, ketersediaan oksigen dalam tanah menurun, yang menyebabkan perubahan kimia yang meningkatkan kelarutan besi.

Pada tanah yang beraerasi baik, besi biasanya terdapat dalam bentuk ferri (Fe^{3+}), yang relatif tidak larut. Namun, dalam kondisi anaerobik, besi ferri direduksi menjadi besi fero (Fe^{2+}), bentuk yang lebih larut dan dapat terakumulasi dalam larutan tanah. Konsentrasi besi fero yang berlebihan dapat menjadi racun bagi tanaman (Brady and Weil, 2016).

Kadar zat besi terlarut yang tinggi dapat merusak jaringan akar dan mengganggu penyerapan nutrisi lain seperti fosfor, kalium, dan magnesium. Tanaman yang terkena keracunan zat besi sering menunjukkan gejala seperti daun menguning dan pertumbuhan akar berkurang (Tan, 2011).

Pengelolaan drainase tanah memainkan peran penting dalam mengendalikan toksisitas besi. Meningkatkan aerasi tanah melalui sistem drainase yang tepat

membantu menjaga besi dalam bentuk yang kurang larut dan mengurangi risiko toksisitas. Selain itu, menjaga keseimbangan pH tanah dan kandungan bahan organik mendukung kimia besi yang lebih stabil di dalam tanah (Anwar and Sudadi, 2013).

4.5.3 Salinitas dan Ketersediaan Nutrien

Salinitas tanah mengacu pada akumulasi garam terlarut dalam larutan tanah. Garam-garam ini dapat meliputi natrium (Na^+), kalsium (Ca^{2+}), magnesium (Mg^{2+}), dan klorida (Cl^-). Konsentrasi garam yang berlebihan menciptakan kondisi kimia yang mengurangi penyerapan nutrisi tanaman dan mengganggu penyerapan air.

Konsentrasi garam yang tinggi meningkatkan tekanan osmotik larutan tanah, sehingga menyulitkan akar tanaman untuk menyerap air. Karena penyerapan air menurun, penyerapan nutrisi juga berkurang, yang menyebabkan gejala kekurangan nutrisi meskipun nutrisi tersedia dalam jumlah yang cukup (Brady and Weil, 2016).

Natrium memainkan peran yang sangat penting dalam masalah salinitas. Tingkat natrium yang tinggi dapat menggantikan kalsium dan magnesium dari situs pertukaran, mengurangi stabilitas struktur tanah dan menurunkan kapasitas retensi nutrisi. Proses ini juga mengurangi permeabilitas tanah, yang selanjutnya membatasi pergerakan nutrisi di dalam profil tanah (Tan, 2011).

Praktik pengelolaan seperti irigasi yang tepat, perbaikan drainase, dan penggunaan bahan perbaikan tanah seperti gipsum dapat membantu mengurangi konsentrasi natrium dan memperbaiki keseimbangan kimia tanah (Anwar and Sudadi, 2013).

BAB 5

BIOLOGI TANAH DAN EKOLOGI MIKROBA TANAH

Tanah merupakan sistem hidup yang tersusun atas komponen fisik, kimia, dan biologi yang saling berinteraksi membentuk suatu ekosistem yang kompleks. Selama ini tanah sering dipandang hanya sebagai media tumbuh tanaman dan penyedia unsur hara, padahal di dalamnya terdapat berbagai organisme yang berperan penting dalam menjaga fungsi dan produktivitas lahan. Berbagai kelompok organisme, mulai dari cacing tanah, serangga, nematoda, hingga mikroorganisme seperti bakteri, cendawan, dan aktinomisetes, membentuk suatu komunitas yang aktif melakukan berbagai proses biologis (Brady & Weil, 2022). Aktivitas organisme tersebut berkontribusi terhadap dekomposisi bahan organik, daur ulang unsur hara, pembentukan struktur tanah, serta pemeliharaan keseimbangan ekosistem tanah secara keseluruhan. Oleh karena itu, aspek biologi tanah menjadi salah satu komponen penting yang perlu dipahami dalam upaya pengelolaan sumber daya lahan yang berkelanjutan.

Di antara berbagai organisme tanah, mikroorganisme menempati posisi yang sangat strategis karena berperan sebagai penggerak utama berbagai proses biogeokimia yang berlangsung di dalam tanah. Keberadaan mikroba tidak hanya memengaruhi ketersediaan unsur hara bagi tanaman, tetapi juga menentukan tingkat kesuburan dan kesehatan tanah dalam jangka panjang. Interaksi yang terjadi antara mikroorganisme dengan tanaman, bahan organik, serta faktor lingkungan lainnya membentuk suatu ranah keilmuan yang dikenal sebagai ekologi mikroba tanah (Paul, 2015). Pembahasan mengenai keanekaragaman organisme tanah, fungsi mikroba dalam siklus hara, peran cendawan mikoriza dan bakteri menguntungkan, serta keterkaitannya dengan kesehatan agroekosistem menjadi hal yang penting dalam pengembangan sistem pertanian yang produktif, efisien, dan ramah lingkungan. Bab ini akan membahas berbagai aspek biologi tanah dan ekologi mikroba tanah yang berperan dalam menjaga keberlanjutan fungsi ekosistem pertanian.

5.1 Keanekaragaman Organisme Tanah: Dari Makro hingga Mikro

Tanah merupakan ekosistem yang sangat kompleks dan dinamis. Selain berfungsi sebagai media tumbuh tanaman, tanah juga menjadi habitat bagi beragam organisme yang membentuk suatu komunitas biologis dengan interaksi yang sangat intensif (Hardjowigeno, 2015). Organisme tanah berperan dalam berbagai proses ekologis, mulai dari dekomposisi bahan organik, siklus hara, pembentukan struktur tanah, hingga pengendalian hayati terhadap organisme pengganggu tanaman.

Keanekaragaman hayati tanah mencakup organisme berukuran besar (makrofauna), sedang (mesofauna), hingga organisme mikroskopis (mikrofauna dan mikroflora). Masing-masing kelompok memiliki fungsi spesifik yang saling melengkapi dalam menjaga keseimbangan ekosistem tanah.

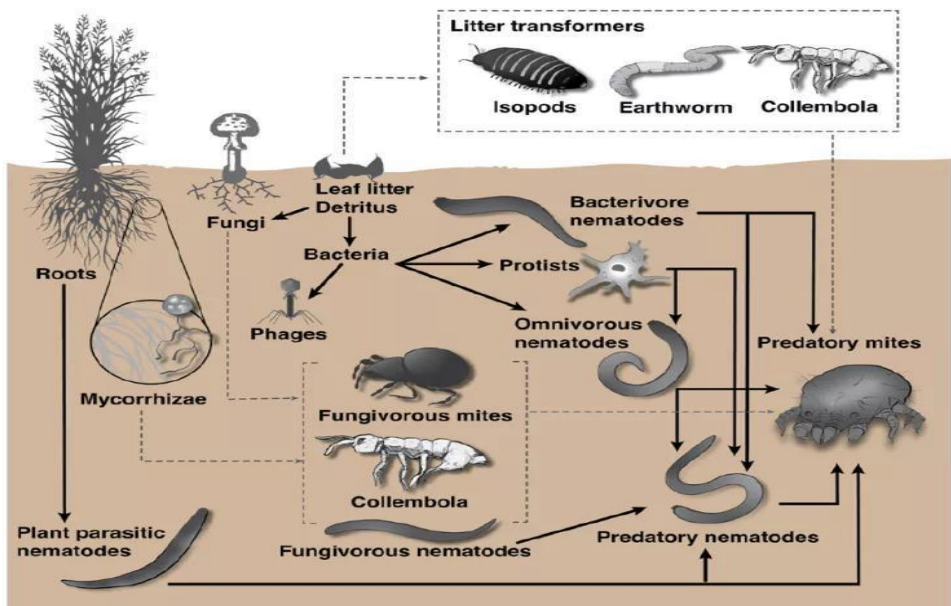
Makrofauna tanah umumnya memiliki ukuran tubuh lebih dari 2 mm. Kelompok ini meliputi cacing tanah, rayap, semut, kumbang tanah, dan berbagai jenis arthropoda lainnya. Cacing tanah sering disebut sebagai "insinyur ekosistem" karena aktivitasnya mampu memperbaiki struktur tanah, meningkatkan aerasi, mempercepat infiltrasi air, dan memperkaya kandungan bahan organik melalui produksi kasing (Kusumastuti, et al., 2022).

Mesofauna tanah memiliki ukuran antara 0,1–2 mm, seperti tungau (mites) dan collembola. Organisme ini berperan dalam penghancuran sisa-sisa organik menjadi partikel yang lebih kecil sehingga memudahkan proses dekomposisi oleh mikroorganisme (Kusumastuti, et al., 2022).

Mikrofauna terdiri atas protozoa dan nematoda. Protozoa berfungsi mengendalikan populasi bakteri melalui aktivitas pemangsaan sehingga menjaga keseimbangan komunitas mikroba. Nematoda memiliki peran yang beragam, mulai dari pemakan bakteri, pemakan jamur, predator, hingga parasit tanaman (Aminatun, et al., 2021).

Mikrofauna terdiri atas protozoa dan nematoda. Protozoa berfungsi mengendalikan populasi bakteri melalui aktivitas pemangsaan sehingga menjaga keseimbangan komunitas mikroba. Nematoda memiliki peran yang

beragam, mulai dari pemakan bakteri, pemakan jamur, predator, hingga parasit tanaman.



Gambar 5.1: Jaring-Jaring Makanan Ekosistem Tanah

Sumber: (FAO, 2021)

Jaring makanan tanah menggambarkan bahwa setiap kelompok organisme memiliki fungsi ekologis yang saling melengkapi. Bakteri dan cendawan berperan sebagai dekomposer utama yang menguraikan bahan organik. Protozoa dan nematoda mengendalikan populasi mikroba sekaligus mempercepat pelepasan unsur hara. Sementara itu, cacing tanah dan fauna tanah lainnya membantu memperbaiki struktur tanah melalui aktivitas bioturbasi. Keberadaan komunitas organisme yang beragam menjadi indikator penting dalam menilai kualitas dan keberlanjutan fungsi tanah.

Keanekaragaman organisme tanah sangat dipengaruhi oleh kondisi lingkungan seperti pH tanah, kelembapan, suhu, kandungan bahan organik, tekstur tanah, serta praktik pengelolaan lahan. Tanah yang kaya bahan organik umumnya memiliki biomassa dan aktivitas biologi yang lebih tinggi dibandingkan tanah yang miskin bahan organik.

Dalam sistem pertanian berkelanjutan, keberadaan organisme tanah perlu dipelihara karena menjadi fondasi utama dalam menjaga produktivitas lahan. Penurunan keanekaragaman organisme tanah sering kali menjadi indikasi awal terjadinya degradasi lahan akibat penggunaan pupuk kimia secara berlebihan, pengolahan tanah intensif, maupun pencemaran lingkungan.

5.2 Peran Mikroba dalam Siklus Hara dan Dekomposisi Bahan Organik

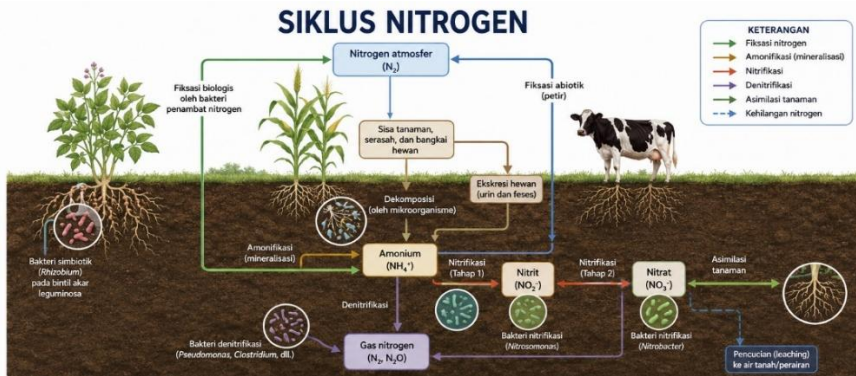
Mikroorganisme tanah merupakan penggerak utama berbagai proses biogeokimia yang menentukan ketersediaan unsur hara bagi tanaman. Tanpa keberadaan mikroba, sebagian besar unsur hara akan tetap berada dalam bentuk organik yang sulit dimanfaatkan oleh tanaman (Brady & Weil, 2022).

Salah satu fungsi utama mikroba tanah adalah mendekomposisi bahan organik. Bahan organik berasal dari sisa tanaman, akar mati, seresah daun, pupuk kandang, maupun organisme yang telah mati. Proses dekomposisi dilakukan melalui aktivitas enzimatik yang mengubah senyawa kompleks menjadi senyawa yang lebih sederhana. Cendawan dan bakteri menghasilkan berbagai enzim ekstraseluler seperti selulase, hemiselulase, lignase, protease, dan lipase. Enzim-enzim tersebut mampu menguraikan selulosa, hemiselulosa, lignin, protein, dan lemak menjadi molekul yang lebih sederhana.

Selama proses dekomposisi berlangsung, unsur hara yang terkandung dalam bahan organik dilepaskan kembali ke dalam tanah melalui proses mineralisasi. Nitrogen organik diubah menjadi amonium, fosfor organik menjadi fosfat, dan sulfur organik menjadi sulfat. Bentuk-bentuk anorganik tersebut kemudian dapat diserap oleh akar tanaman.

Dalam siklus nitrogen, mikroorganisme memiliki peran yang sangat penting. Nitrogen mengalami berbagai transformasi melalui proses amonifikasi, nitrifikasi, denitrifikasi, dan fiksasi nitrogen. Bakteri nitrifikasi seperti *Nitrosomonas* dan *Nitrobacter* mengubah amonium menjadi nitrat yang lebih mudah diserap tanaman. Selain nitrogen, mikroorganisme juga berperan dalam siklus karbon. Karbon yang tersimpan dalam biomassa tanaman dikembalikan ke atmosfer dalam bentuk karbon dioksida melalui respirasi

mikroba. Sebagian karbon lainnya mengalami humifikasi sehingga membentuk humus yang relatif stabil.



Gambar 5.2: Diagram Siklus Nitrogen dalam Ekosistem

Sumber: Diadaptasi dari Brady dan Weil (2022)

Siklus nitrogen merupakan proses peredaran unsur nitrogen di alam yang melibatkan transformasi berbagai bentuk nitrogen melalui aktivitas biologis, kimia, dan fisik. Proses ini diawali dengan fiksasi nitrogen, yaitu pengubahan nitrogen atmosfer (N_2) yang bersifat inert menjadi bentuk yang dapat dimanfaatkan organisme hidup.

Fiksasi dapat dilakukan secara biologis oleh bakteri penambat nitrogen, seperti *Rhizobium*, *Azotobacter*, dan *Azospirillum*, maupun secara abiotik melalui petir. Nitrogen hasil fiksasi kemudian masuk ke dalam tanah dan dimanfaatkan oleh tanaman atau mikroorganisme. Ketika tanaman, hewan, maupun organisme lain mati dan menghasilkan sisa-sisa organik, nitrogen organik yang terkandung di dalamnya akan diuraikan oleh mikroorganisme melalui proses amonifikasi (mineralisasi) menjadi amonium (NH_4^+). Selanjutnya, bakteri nitrifikasi seperti *Nitrosomonas* mengoksidasi amonium menjadi nitrit (NO_2^-), yang kemudian diubah lagi menjadi nitrat (NO_3^-) oleh *Nitrobacter* melalui proses nitrifikasi.

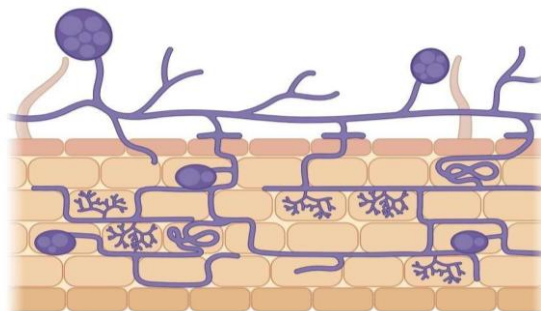
Nitrat yang terbentuk merupakan bentuk nitrogen yang paling mudah diserap oleh tanaman melalui proses asimilasi, kemudian digunakan untuk menyusun asam amino, protein, enzim, dan berbagai senyawa penting lainnya. Namun, tidak semua nitrat dapat dimanfaatkan oleh tanaman. Pada kondisi tanah yang miskin oksigen atau tergenang air, bakteri denitrifikasi seperti *Pseudomonas*

dan *Clostridium* akan mengubah nitrat menjadi gas nitrogen (N_2) atau dinitrogen oksida (N_2O) melalui proses denitrifikasi, sehingga nitrogen kembali ke atmosfer dan siklus berulang kembali. Selain itu, sebagian nitrat yang berada di dalam larutan tanah dapat terbawa aliran air ke lapisan tanah yang lebih dalam atau ke badan perairan melalui proses *leaching* (pencucian). Proses ini menyebabkan hilangnya nitrogen dari zona perakaran tanaman dan dapat menurunkan efisiensi pemupukan serta berpotensi menimbulkan pencemaran lingkungan, terutama pada daerah dengan curah hujan tinggi atau pengairan berlebihan.

5.3 Cendawan Mikoriza dan Simbiosis dengan Akar Tanaman

Mikoriza merupakan bentuk simbiosis mutualistik antara cendawan dan akar tanaman yang telah berkembang selama jutaan tahun dalam proses evolusi. Diperkirakan lebih dari 80% spesies tanaman di dunia mampu membentuk asosiasi mikoriza. Hubungan simbiosis ini memberikan keuntungan bagi kedua pihak. Tanaman menyediakan senyawa karbon hasil fotosintesis sebagai sumber energi bagi cendawan. Sebaliknya, cendawan membantu tanaman memperoleh air dan unsur hara dari tanah, terutama fosfor yang mobilitasnya relatif rendah.

Secara umum terdapat dua kelompok utama mikoriza, yaitu ektomikoriza dan endomikoriza. Dalam sistem pertanian, jenis yang paling banyak ditemukan adalah mikoriza arbuskular (*Arbuscular Mycorrhizal Fungi/AMF*) yang termasuk kelompok endomikoriza.



Gambar 5.3: Struktur Kolonisasi Jamur Endomikoriza pada Akar Tanaman

Sumber: Diadaptasi dari Read & Smith, (2010)

Hifa eksternal cendawan berkembang di luar akar dan menjelajah partikel-partikel tanah untuk memperoleh air serta unsur hara, terutama fosfor (P), yang mobilitasnya relatif rendah di dalam tanah. Setelah mencapai akar, hifa menembus epidermis dan berkembang di dalam sel-sel korteks akar tanpa merusak membran sel tanaman. Pada bagian tertentu, hifa membentuk struktur bercabang menyerupai pohon yang disebut arbuskula, yang berfungsi sebagai tempat utama pertukaran hara antara cendawan dan tanaman. Selain arbuskula, terbentuk pula struktur penyimpanan berbentuk bulat yang disebut vesikula, yang berfungsi sebagai cadangan nutrisi dan organ reproduksi bagi cendawan.

Hubungan simbiosis antara mikoriza dan tanaman bersifat mutualisme karena kedua organisme memperoleh keuntungan. Tanaman menyediakan senyawa karbon hasil fotosintesis sebagai sumber energi bagi cendawan, sedangkan cendawan meningkatkan kemampuan akar dalam menyerap air dan unsur hara dari tanah. Jaringan hifa yang luas mampu memperbesar daerah jelajah akar hingga beberapa kali lipat dibandingkan akar tanpa mikoriza. Keberadaan mikoriza juga berkontribusi dalam meningkatkan ketahanan tanaman terhadap cekaman kekeringan, salinitas, serangan patogen akar, serta membantu memperbaiki struktur tanah melalui pembentukan agregat yang lebih stabil (Sylvia, et al., 2021).

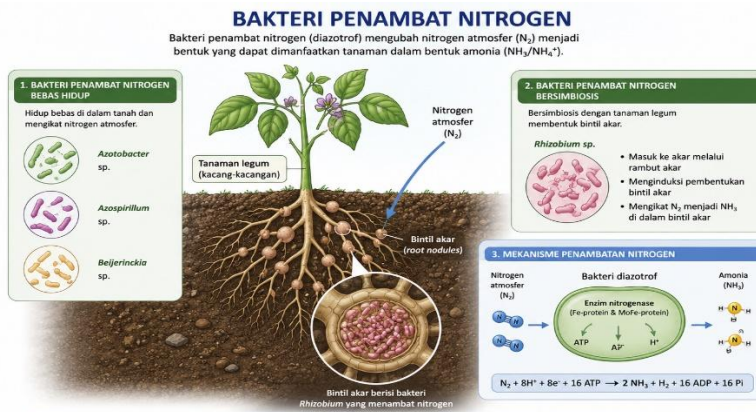
Manfaat lain mikoriza adalah meningkatkan toleransi tanaman terhadap cekaman lingkungan seperti kekeringan, salinitas, logam berat, dan serangan patogen akar. Hifa mikoriza dapat membentuk penghalang biologis yang menghambat perkembangan organisme patogen di sekitar sistem perakaran.

Mikoriza juga menghasilkan senyawa glomalin yang berperan dalam pembentukan agregat tanah. Agregat yang stabil meningkatkan porositas tanah, infiltrasi air, dan ketahanan terhadap erosi. Inokulasi mikoriza terbukti mampu meningkatkan efisiensi pemupukan fosfor dan mendukung sistem pertanian berkelanjutan. Keberhasilan kolonisasi mikoriza dipengaruhi oleh jenis tanaman, kondisi tanah, ketersediaan fosfor, serta keberadaan mikroorganisme lain di dalam rizosfer.

5.4 Bakteri Penambat Nitrogen dan Pelarut Fosfat

Nitrogen dan fosfor merupakan dua unsur hara esensial yang sering menjadi faktor pembatas pertumbuhan tanaman. Meskipun tersedia dalam jumlah besar di lingkungan, sebagian besar nitrogen dan fosfor berada dalam bentuk yang tidak dapat langsung dimanfaatkan oleh tanaman. Dalam kondisi ini, peran mikroorganisme menjadi sangat penting.

Bakteri penambat nitrogen merupakan kelompok mikroorganisme yang mampu mengubah nitrogen atmosfer menjadi amonia melalui proses fiksasi biologis nitrogen. Proses tersebut dimungkinkan oleh enzim nitrogenase yang hanya dimiliki oleh mikroorganisme tertentu.



Gambar 5.4: Infografis Bakteri Penambat Nitrogen

Sumber: Diadaptasi dari Sylvia *et al.* (2021)

Berdasarkan cara hidupnya, bakteri penambat nitrogen dibedakan menjadi tiga kelompok. Kelompok pertama adalah bakteri simbiotik seperti *Rhizobium* yang hidup berasosiasi dengan tanaman legum. Kelompok kedua adalah bakteri asosiasi seperti *Azospirillum* yang hidup di sekitar perakaran tanaman. Kelompok ketiga adalah bakteri hidup bebas seperti *Azotobacter* (Pratiwi, et al., 2019).

Pada hubungan simbiosis tersebut, bakteri menginfeksi rambut akar dan merangsang pembentukan bintil akar sebagai tempat berlangsungnya proses fiksasi nitrogen. Di dalam bintil akar, bakteri memanfaatkan energi yang berasal dari hasil fotosintesis tanaman untuk mengubah nitrogen atmosfer

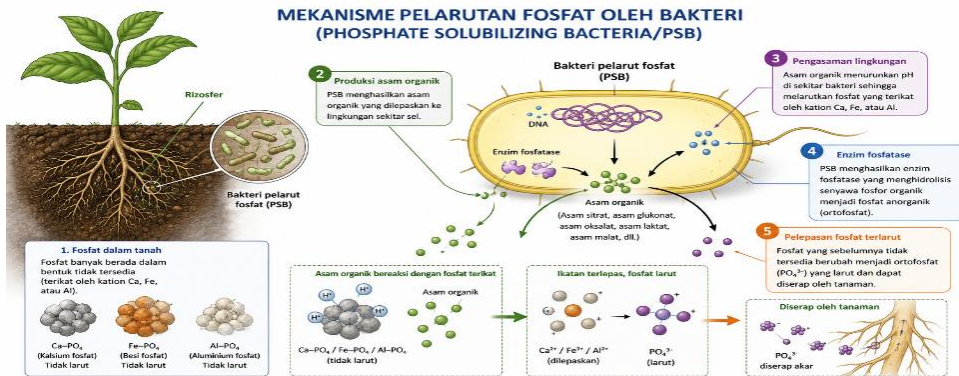
menjadi amonia (NH_3) dengan bantuan enzim nitrogenase. Amonia yang dihasilkan kemudian diubah menjadi bentuk nitrogen yang dapat dimanfaatkan tanaman untuk pertumbuhan dan perkembangan.

Keberadaan bakteri penambat nitrogen memiliki peran penting dalam menjaga kesuburan tanah dan meningkatkan produktivitas tanaman secara alami. Proses fiksasi nitrogen biologis membantu menambah cadangan nitrogen di dalam tanah tanpa harus bergantung sepenuhnya pada pupuk nitrogen sintetis. Selain meningkatkan ketersediaan nitrogen, aktivitas bakteri ini juga mendukung pertumbuhan akar, meningkatkan efisiensi penyerapan unsur hara, serta memperbaiki kualitas biologis tanah.

Temuan dari Apriani dan rekan-rekan pada tahun 2024 menunjukkan bahwa pengelolaan air dan bahan organik berpengaruh nyata terhadap populasi bakteri penambat nitrogen serta serapan nitrogen tanaman jagung. Kombinasi irigasi 100% kebutuhan air dan aplikasi pupuk kandang menghasilkan populasi bakteri penambat nitrogen tertinggi, yaitu sebesar $12,43 \times 10^6$ CFU g^{-1} tanah. Perlakuan irigasi 100% juga menghasilkan serapan nitrogen tanaman tertinggi sebesar $1,31 \text{ g tanaman}^{-1}$, sementara pemberian pupuk kandang meningkatkan serapan nitrogen hingga $1,35 \text{ g tanaman}^{-1}$. Fenomena ini menunjukkan bahwa ketersediaan air yang memadai dan penambahan bahan organik mampu menciptakan lingkungan yang lebih kondusif bagi aktivitas bakteri penambat nitrogen di daerah perakaran tanaman.

Selain bakteri penambat nitrogen, kelompok penting lainnya adalah bakteri pelarut fosfat. Banyak tanah mengandung fosfor total yang tinggi, tetapi sebagian besar berada dalam bentuk tidak larut sehingga tidak tersedia bagi tanaman.

Fosfor (P) merupakan salah satu unsur hara makro esensial yang berperan penting dalam berbagai proses fisiologis tanaman, seperti pembentukan energi (ATP), sintesis asam nukleat, perkembangan sistem perakaran, pembungaan, dan pembentukan hasil. Meskipun kandungan fosfor total dalam tanah relatif tinggi, sebagian besar berada dalam bentuk tidak larut karena terikat oleh kalsium (Ca), besi (Fe), atau aluminium (Al), sehingga tidak dapat diserap oleh tanaman.



Gambar 5.5: Mekanisme Pelarutan Fosfat oleh Bakteri (Phosphate Solubilizing Bacteria/PSB)

Sumber: Ilustrasi dibuat oleh penulis berdasarkan Mei, et al., (2021)

Bakteri pelarut fosfat seperti *Bacillus*, *Pseudomonas*, dan *Burkholderia* menghasilkan berbagai asam organik yang mampu melarutkan senyawa fosfat terikat. Asam organik tersebut menurunkan pH lokal dan melepaskan ion fosfat ke dalam larutan tanah. Selain mekanisme pelarutan, beberapa mikroorganisme menghasilkan enzim fosfatase yang mampu memineralisasi fosfor organik menjadi fosfat anorganik yang dapat diserap tanaman.

Bakteri pelarut fosfat (BPF) atau *Phosphate Solubilizing Bacteria* (PSB) merupakan kelompok mikroorganisme yang mampu mengubah fosfat tidak tersedia menjadi bentuk fosfat larut melalui produksi asam-asam organik, seperti asam sitrat, asam glukonat, asam oksalat, dan asam laktat. Selain itu, beberapa PSB juga menghasilkan enzim fosfatase yang berperan dalam mineralisasi fosfor organik menjadi fosfat anorganik yang dapat diserap oleh tanaman (Fitriatin, et al., 2022). Genus bakteri yang memiliki kemampuan melarutkan fosfat antara lain *Pseudomonas*, *Bacillus*, *Burkholderia*, *Enterobacter*, dan *Azotobacter*. Keberadaan bakteri ini di daerah rizosfer tidak hanya meningkatkan ketersediaan fosfor, tetapi juga mampu merangsang pertumbuhan tanaman melalui produksi fitohormon dan peningkatan aktivitas biologis tanah.

Temuan dari Rahman dan rekan-rekan pada tahun 2015 menunjukkan bahwa aplikasi mikroba fungsional tanah yang dikombinasikan dengan kompos mampu meningkatkan pertumbuhan tanaman cabai secara signifikan.

Perlakuan kompos yang dikombinasikan dengan bakteri pelarut fosfat dan mikoriza menghasilkan tinggi tanaman mencapai 81,00 cm pada umur 2 MST dan 83,67 cm pada umur 4 MST, serta jumlah daun sebanyak 59 helai pada umur 4 MST dan meningkat menjadi 97 helai pada umur 6 MST. Sementara itu, kombinasi kompos dan bakteri pelarut fosfat menghasilkan luas daun tertinggi, yaitu 84,63 cm² tanaman⁻¹ pada umur 4 MST dan 92,73 cm² tanaman⁻¹ pada umur 6 MST, dengan berat kering total mencapai 1,602 g tanaman⁻¹. Publikasi tersebut juga menunjukkan bahwa kombinasi kompos dan bakteri penambat nitrogen mampu menghasilkan laju tumbuh tanaman tertinggi, yaitu meningkat dari 0,082 g cm⁻² hari⁻¹ menjadi 0,26 g cm⁻² hari⁻¹ selama periode pengamatan. Hasil ini mengindikasikan bahwa kombinasi antara kompos, bakteri pelarut fosfat, bakteri penambat nitrogen, dan mikoriza mampu meningkatkan ketersediaan unsur hara, memperbaiki perkembangan sistem perakaran, serta meningkatkan efisiensi penyerapan hara oleh tanaman.

5.5 Ekologi Tanah sebagai Indikator Kesehatan Agroekosistem

Kesehatan tanah tidak hanya ditentukan oleh sifat fisik dan kimia, tetapi juga oleh kondisi biologinya. Dalam beberapa dekade terakhir, aspek biologi tanah semakin mendapat perhatian karena dinilai mampu memberikan gambaran yang lebih sensitif terhadap perubahan kualitas lingkungan. Ekologi tanah mempelajari hubungan antara organisme tanah dengan lingkungan fisik, kimia, serta organisme lainnya. Interaksi tersebut membentuk suatu sistem yang kompleks dan menentukan fungsi ekosistem tanah secara keseluruhan.

Tanah yang sehat umumnya dicirikan oleh tingginya keanekaragaman organisme, aktivitas mikroba yang aktif, siklus hara yang efisien, serta kemampuan mempertahankan produktivitas tanaman dalam jangka panjang. Sebaliknya, tanah yang mengalami degradasi sering menunjukkan penurunan biomassa mikroba, rendahnya aktivitas enzim tanah, dan berkurangnya keanekaragaman hayati. Beberapa indikator biologis yang sering digunakan untuk mengevaluasi kesehatan tanah meliputi biomassa mikroba tanah, respirasi tanah, aktivitas enzim, populasi cacing tanah, serta indeks keanekaragaman mikroorganisme.

Biomassa mikroba mencerminkan jumlah organisme hidup yang berperan dalam proses biologis tanah. Nilai biomassa yang tinggi biasanya menunjukkan ketersediaan bahan organik yang memadai dan kondisi lingkungan yang mendukung. Respirasi tanah menggambarkan aktivitas metabolisme organisme tanah. Tingkat respirasi yang seimbang menunjukkan bahwa proses dekomposisi dan transformasi hara berlangsung secara aktif.

Perkembangan teknologi molekuler telah memungkinkan identifikasi komunitas mikroba tanah secara lebih mendalam melalui pemeriksaan DNA. Pendekatan ini membantu memahami perubahan struktur komunitas mikroba akibat pengelolaan lahan maupun perubahan lingkungan. Dalam konteks agroekosistem, kesehatan tanah memiliki hubungan erat dengan produktivitas tanaman, efisiensi penggunaan pupuk, ketahanan terhadap cekaman lingkungan, dan keberlanjutan sistem pertanian.

Hubungan antara ekologi tanah dan kesehatan agroekosistem juga tercermin pada kemampuan tanah dalam mempertahankan produktivitas tanaman secara berkelanjutan. Tanah yang memiliki aktivitas biologis tinggi umumnya menunjukkan efisiensi penggunaan hara yang lebih baik, daya simpan air yang lebih tinggi, serta ketahanan yang lebih besar terhadap gangguan lingkungan seperti kekeringan, erosi, dan serangan penyakit tanaman. Selain itu, interaksi yang harmonis antara mikroorganisme tanah, akar tanaman, dan bahan organik mampu membentuk lingkungan rizosfer yang mendukung pertumbuhan tanaman secara optimal.

BAB 6

FISIOLOGI TANAMAN DALAM KONTEKS AGROEKOLOGI

6.1 Proses Fotosintesis dan Pengaruh Faktor Lingkungan

6.1.1 Pengertian dan Fungsi Fotosintesis

Fotosintesis adalah proses biokimia yang dilakukan oleh tumbuhan, alga, dan beberapa jenis bakteri untuk mengubah energi cahaya matahari menjadi energi kimia dalam bentuk glukosa (gula). Proses ini sangat penting karena merupakan sumber utama energi bagi hampir semua kehidupan di Bumi.

Fotosintesis berlangsung di dalam kloroplas, organel sel yang mengandung pigmen hijau yang disebut klorofil. Proses fotosintesis dapat dibagi dalam dua tahap utama, yaitu: (1) reaksi terang yang menghasilkan ATP dan NADPH; (2) reaksi gelap (Siklus Calvin) yang mereduksi CO₂ menjadi karbohidrat (gula)

Secara umum, persamaan kimia untuk fotosintesis adalah:



Karbon dioksida dan air, dengan bantuan cahaya matahari, diubah menjadi glukosa dan oksigen. Glukosa digunakan oleh tumbuhan sebagai sumber energi dan bahan bangunan, sementara oksigen dilepaskan ke atmosfer sebagai produk sampingan. Proses fotosintesis sangat penting bagi kehidupan di Bumi karena menyediakan oksigen yang kita hirup dan menjadi dasar dari hampir semua rantai makanan.

Beberapa fungsi penting dari proses fotosintesis adalah sebagai berikut:

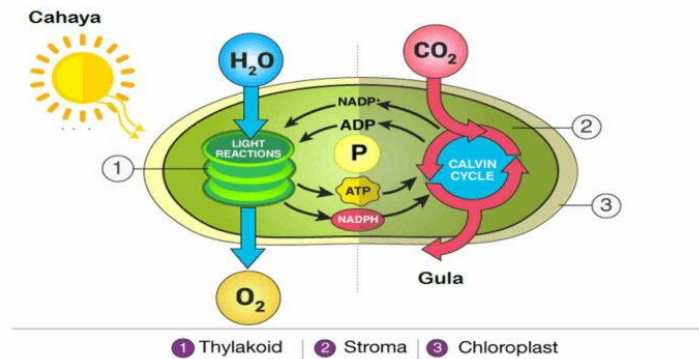
1. **Menghasilkan Glukosa:** Glukosa hasil fotosintesis merupakan sumber energi utama bagi tumbuhan dan organisme autotrof lainnya. Glukosa dapat disimpan sebagai pati atau diubah menjadi selulosa, yang digunakan untuk membangun struktur tumbuhan. Glukosa yang dihasilkan juga

menjadi dasar bagi rantai makanan karena digunakan oleh hewan dan manusia yang mengonsumsi tumbuhan.

2. Menghasilkan Oksigen: oksigen dihasilkan sebagai produk sampingan ketika air dipecah untuk mendapatkan elektron dan proton. Oksigen ini dilepaskan ke atmosfer (Fotolisis Air). Oksigen adalah gas esensial bagi respirasi aerobik, yang digunakan oleh sebagian besar makhluk hidup, termasuk manusia, untuk bertahan hidup.
3. Mengurangi Karbon Dioksida di Atmosfer: Fotosintesis menyerap karbon dioksida (CO_2) dari atmosfer untuk digunakan dalam pembentukan glukosa. Ini membantu mengurangi kadar CO_2 , yang merupakan salah satu gas rumah kaca. Pengurangan CO_2 berperan penting dalam mengatur suhu global dan membantu mengurangi dampak perubahan iklim.
4. Menyediakan Sumber Makanan: Hasil dari fotosintesis, yaitu glukosa dan senyawa organik lainnya, menjadi dasar dari rantai makanan. Tumbuhan sebagai produsen primer menyediakan makanan bagi herbivora, yang kemudian menjadi makanan bagi karnivora dan omnivora. Semua organisme heterotrof, termasuk manusia, bergantung langsung atau tidak langsung pada hasil fotosintesis untuk mendapatkan nutrisi.
5. Menyediaan Bahan Baku: Fotosintesis menghasilkan berbagai senyawa organik yang digunakan oleh tumbuhan untuk membentuk selulosa, lignin, dan komponen lain dari jaringan tumbuhan. Bahan-bahan ini menjadi sumber utama untuk produksi kayu, serat, dan bahan-bahan lain yang digunakan manusia dalam industri dan kehidupan sehari-hari.
6. Mendukung Siklus Karbon: Fotosintesis berperan penting dalam siklus karbon global dengan mengubah karbon dioksida atmosfer menjadi bahan organik yang dapat digunakan oleh organisme lain. Membantu menjaga keseimbangan karbon di Bumi, yang sangat penting untuk keberlanjutan ekosistem.
7. Mengatur Iklim dan Lingkungan: Dengan menyerap CO_2 dan melepaskan O_2 , fotosintesis membantu mengatur komposisi atmosfer dan mempengaruhi iklim global. Ini sangat penting dalam mencegah efek rumah kaca yang berlebihan dan menjaga kestabilan iklim.

6.1.2 Reaksi Terang dan Reaksi Gelap

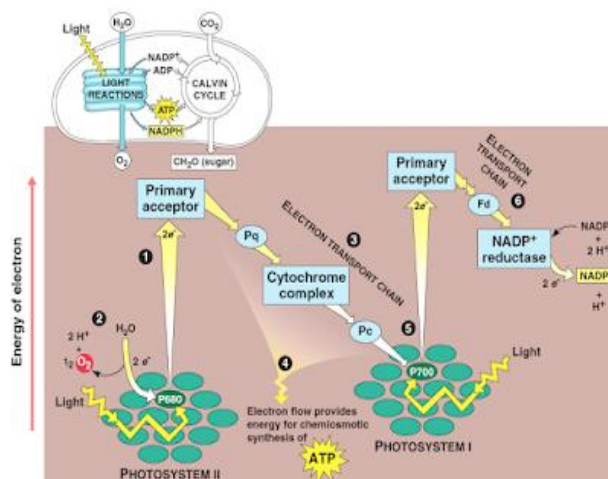
Fotosintesis terdiri dari dua tahap utama: reaksi terang dan reaksi gelap. Kedua reaksi ini bekerja secara berkesinambungan untuk mengubah energi cahaya menjadi energi kimia yang disimpan dalam bentuk glukosa.

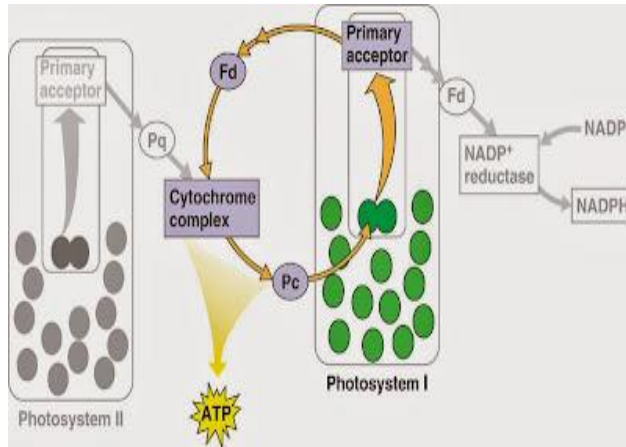


Gambar 6.1: Fotosintesis

1. Reaksi Terang (Light Reactions)

Reaksi terang terjadi di membran tilakoid dalam kloroplas dan memerlukan cahaya untuk berlangsung. Reaksi ini melibatkan penyerapan energi cahaya oleh pigmen klorofil dan pigmen lainnya, yang mengarah pada serangkaian proses kimia untuk menghasilkan energi kimia dalam bentuk ATP dan NADPH.

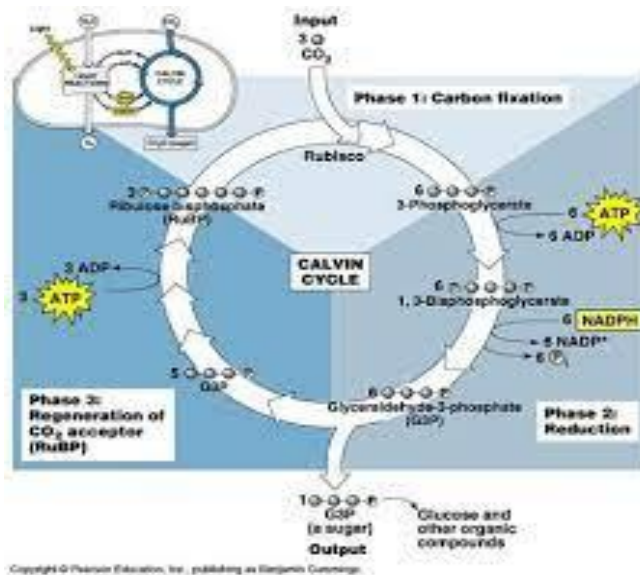




Gambar 6.2: Reaksi Terang Fotosintesis (Aliran Siklik dan Non Siklik)

2. Reaksi Gelap atau Siklus Calvin (Siklus C₃)

Reaksi gelap terjadi di stroma kloroplas dan tidak memerlukan cahaya secara langsung. Reaksi ini menggunakan ATP dan NADPH yang dihasilkan dari reaksi terang untuk mengubah karbon dioksida (CO₂) menjadi glukosa. Siklus ini dikenal sebagai Siklus Calvin.



Gambar 6.3: Reaksi Gelap (Siklus Calvin)

Hubungan antara Reaksi Terang dan Gelap:

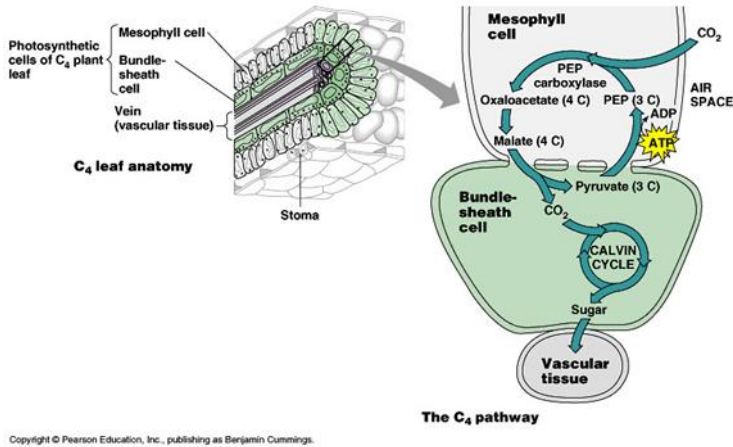
- 1) Interkoneksi Energi: ATP dan NADPH yang dihasilkan dari reaksi terang digunakan dalam reaksi gelap untuk mengubah CO_2 menjadi glukosa.
- 2) Lingkaran Terus-Menerus: Produk reaksi gelap (ADP dan NADP^+) kemudian dikembalikan ke reaksi terang untuk diubah kembali menjadi ATP dan NADPH.

3. Jalur Fotosintesis C4 (Jalur Hatch-Slack)

Jalur C4 adalah salah satu jalur fotosintesis alternatif yang berkembang untuk membantu tumbuhan beradaptasi dengan kondisi lingkungan panas dan kering, di mana efisiensi penggunaan air dan pengurangan fotorespirasi menjadi sangat penting. Proses ini disebut jalur **Hatch-Slack** setelah para ilmuwan yang menemukannya, M.D. Hatch dan C.R. Slack. Tumbuhan yang menggunakan jalur ini disebut Jalur C4.

Pada tumbuhan C3, enzim Rubisco (ribulosa-1,5-bifosfat karboksilase/oksigenase) bertindak sebagai katalis dalam fiksasi karbon. Namun, Rubisco memiliki kelemahan, yaitu tidak hanya bereaksi dengan karbon dioksida (CO_2), tetapi juga dengan oksigen (O_2), terutama dalam kondisi panas, yang mengarah pada proses yang disebut **fotorespirasi (dibahas pada Bab Respirasi)**. Fotorespirasi mengurangi efisiensi fotosintesis karena menghasilkan produk yang tidak berguna bagi tumbuhan dan menghabiskan energi.

Fotosintesis C4 mengatasi masalah ini dengan memisahkan asimilasi CO_2 dan siklus Calvin dalam dua jenis sel yang berbeda, **yakni sel mesofil dan sel bundle sheath (seludang pembuluh)**. Proses ini meminimalkan fotorespirasi dan memungkinkan tumbuhan untuk lebih efisien dalam penggunaan air dan nutrisi.



Gambar 6.4: Jalur Fotosintesis C4

Keuntungan Fotosintesis C4:

- Pengurangan Fotorespirasi: Dengan memisahkan dua proses utama (fiksasi karbon awal dan siklus Calvin) ke dalam dua sel yang berbeda, fotosintesis C4 mampu menjaga konsentrasi CO₂ yang tinggi di sekitar enzim Rubisco di sel bundle sheath. Ini mengurangi risiko Rubisco mengikat O₂ (yang menyebabkan fotorespirasi) dan meningkatkan efisiensi fotosintesis.
- Efisiensi Penggunaan Air: Tumbuhan C4 dapat tetap menjaga stomata mereka lebih tertutup untuk mengurangi transpirasi tanpa kehilangan kemampuan untuk mengasimilasi karbon secara efisien. Hal ini membuat mereka lebih tahan terhadap kondisi kering dibandingkan tumbuhan C3.
- Adaptasi Terhadap Lingkungan Panas dan Kering: Karena jalur C4 mengurangi fotorespirasi, tumbuhan C4 memiliki keunggulan di lingkungan yang panas dan terik, di mana fotorespirasi cenderung lebih tinggi pada tumbuhan C3.

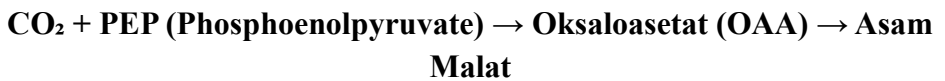
Contoh Tumbuhan C4: Jagung (*Zea mays*), tebu (*Saccharum officinarum*), Sorghum (*Sorghum bicolor*), Rumput Millet (*Panicum*).

4. Jalur Fotosintesis CAM (Crassulacean Acid Metabolism)

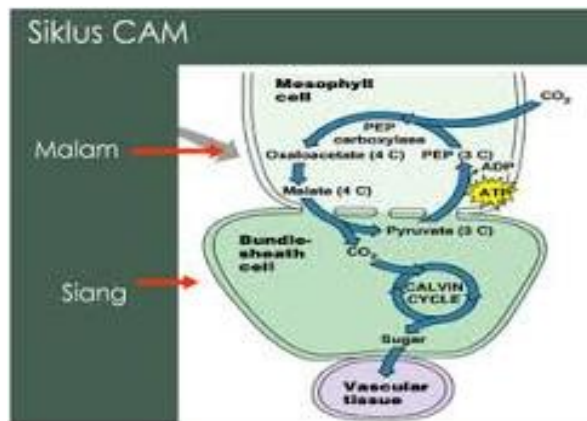
Jalur CAM digunakan oleh tanaman untuk mengatasi lingkungan yang kering atau memiliki tingkat ketersediaan air rendah. Tanaman CAM umumnya ditemukan di daerah gersang atau semi-gersang, seperti kaktus, sukulen, dan beberapa anggrek. Sistem ini mengatur waktu proses penyerapan CO₂ untuk meminimalkan kehilangan air.

Pada tanaman CAM, fotosintesis dilakukan secara khusus untuk mengurangi kehilangan air, terutama di lingkungan yang kering. Tanaman CAM beradaptasi dengan membuka stomata (pori-pori kecil di permukaan daun) pada malam hari, saat kelembapan udara lebih tinggi dan suhu lebih rendah, sehingga mengurangi penguapan air. Pada siang hari, stomata tetap tertutup untuk mencegah kehilangan air lebih lanjut.

Pada tumbuhan non-CAM (seperti tumbuhan C₃ dan C₄), stomata biasanya terbuka pada siang hari untuk mengambil CO₂, tetapi ini dapat menyebabkan kehilangan air yang signifikan karena transpirasi. Tumbuhan CAM memiliki stomata yang hanya terbuka pada malam hari untuk mengurangi kehilangan air melalui transpirasi. Pada siang hari, stomata tertutup.



Asam malat kemudian disimpan di vakuola sel dalam bentuk malat.



Gambar 6.5: Jalur Fotosintesis CAM

6.1.3 Faktor-faktor yang Mempengaruhi Fotosintesis

1. Faktor Lingkungan

a. Cahaya (Intensitas, Kualitas, dan Durasi):

Intensitas Cahaya: Fotosintesis meningkat dengan peningkatan intensitas cahaya sampai titik tertentu. Setelah titik saturasi cahaya tercapai, peningkatan lebih lanjut tidak lagi meningkatkan laju fotosintesis. Kualitas Cahaya: Cahaya merah dan biru adalah yang paling efektif untuk fotosintesis karena mereka diserap dengan baik oleh klorofil. Cahaya hijau, sebaliknya, sebagian besar dipantulkan, sehingga kurang efektif. Durasi Cahaya: Fotosintesis berlangsung lebih lama jika durasi pencahayaan diperpanjang, dengan asumsi faktor-faktor lain mendukung.

b. Karbon Dioksida (CO₂):

Konsentrasi CO₂ di atmosfer mempengaruhi laju fotosintesis. Peningkatan konsentrasi CO₂ biasanya meningkatkan fotosintesis sampai batas tertentu, setelah itu laju fotosintesis menjadi stabil.

c. Suhu:

Suhu mempengaruhi enzim yang terlibat dalam fotosintesis. Laju fotosintesis meningkat seiring dengan kenaikan suhu hingga mencapai suhu optimum. Setelah titik ini, suhu yang lebih tinggi dapat merusak enzim dan menurunkan laju fotosintesis.

d. Air:

Air adalah bahan baku dalam fotosintesis dan juga penting untuk menjaga turgor sel. Kekurangan air dapat menyebabkan stomata menutup untuk mengurangi kehilangan air, yang pada gilirannya membatasi masuknya CO₂ dan mengurangi fotosintesis.

e. Kelembaban:

Kelembaban yang tinggi dapat mengurangi laju transpirasi, sehingga membantu menghemat air dan mendukung proses fotosintesis. Sebaliknya, kelembaban yang rendah dapat meningkatkan transpirasi dan menyebabkan kehilangan energi air.

2. Faktor Internal yang Mempengaruhi Fotosintesis

a. Struktur Daun:

Anatomi Daun: Daun dengan struktur yang lebih efisien (misalnya, lebih banyak stomata untuk pertukaran gas) biasanya memiliki laju fotosintesis yang lebih tinggi.

b. Klorofil:

Jumlah klorofil mempengaruhi kemampuan tumbuhan untuk menangkap cahaya. Daun yang lebih hijau dan lebih tebal biasanya memiliki lebih banyak klorofil.

c. Status Fisiologis Tanaman:

Kesehatan umum tanaman mempengaruhi fotosintesis. Tanaman yang sakit atau energy mungkin mengalami fotosintesis yang lebih rendah karena kerusakan jaringan fotosintetik atau fungsi stomata yang buruk.

d. Umur Daun:

Daun muda biasanya memiliki kapasitas fotosintesis yang lebih tinggi daripada daun tua karena jaringan fotosintetik mereka lebih aktif.

e. Jumlah dan Fungsi Stomata: Stomata memainkan peran penting dalam pertukaran gas (CO_2 dan O_2) dan kehilangan air (transpirasi). Jumlah stomata dan kemampuannya untuk membuka dan menutup mempengaruhi laju fotosintesis.

6.2 Respirasi, Transpirasi, dan Efisiensi Penggunaan Air

6.2.1 Respirasi

1. Pengertian Respirasi Tumbuhan

Sel hidup menggunakan energi dari sinar matahari untuk menghasilkan senyawa organik (karbohidrat) yang mengandung energi melalui proses fotosintesis. Energi yang dikandung karbohidrat digunakan untuk berbagai aktivitas sel serta untuk pemeliharaan sel. Organisme membutuhkan energi untuk berbagai aktivitasnya. Agar energi yang terkandung dalam karbohidrat dapat dimanfaatkan maka energi harus dibebaskan melalui proses respirasi.

lain-lain.

Respirasi tumbuhan adalah proses metabolisme di mana tumbuhan menguraikan glukosa untuk menghasilkan energi dalam bentuk adenosin trifosfat (ATP). Proses ini berlangsung di organel mitokondria pada sel-sel tumbuhan dan penting bagi kelangsungan hidup tumbuhan karena menyediakan energi yang diperlukan untuk berbagai aktivitas seluler.

Respirasi merupakan reaksi oksidasi senyawa organik untuk menghasilkan energi bagi aktivitas sel dan kehidupan tumbuhan dalam bentuk ATP suatu senyawa berenergi tinggi. Respirasi merupakan proses penguraian senyawa kompleks menjadi senyawa sederhana yang diikuti dengan pelepasan energi. Energi yang dilepaskan dalam bentuk panas.

Persamaan umum respirasi dapat digambarkan dalam bentuk reaksi sebagai berikut:



Dalam persamaan tersebut tergambar bahwa dalam proses tersebut diserap O_2 serta dilepaskan CO_2 . Energi yang dilepaskan dalam proses respirasi sebesar 686 kkal. Respirasi merupakan suatu proses perubahan (transfusi) energi dari ikatan kimia substrat (karbohidrat) yang dilepaskan berangsur-angsur serta dikumpulkan dalam suatu ikatan kimia berenergi tinggi (ATP). Energi yang dihasilkan digunakan untuk berbagai proses metabolisme serta aktivitas lain tumbuhan seperti gerak, penyerapan, transport, dan lain-lain.

Tipe Respirasi

Berdasarkan ada tidaknya oksigen, respirasi dapat dibedakan atas respirasi aerob dan respirasi anaerob.

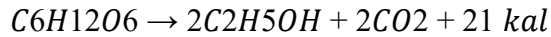
1. Respirasi Aerob

Tipe respirasi ini berlangsung jika ada oksigen. Substrat akan mengalami oksidasi secara sempurna menghasilkan karbondioksida serta air. Reaksi oksidasi karbohidrat digambarkan sebagai berikut:



2. Respirasi Anaerob

Respirasi tipe ini berlangsung tanpa ada oksigen. Substrat akan mengalami oksidasi secara tidak sempurna. Terkadang tipe reaksi ini disebut fermentasi sekalipun tidak semua fermentasi itu berlangsung secara anaerob. Energi yang diperoleh mengalami proses ini lebih kecil daripada respirasi yang berlangsung dengan adanya oksigen. Persamaan reaksinya sebagai berikut:

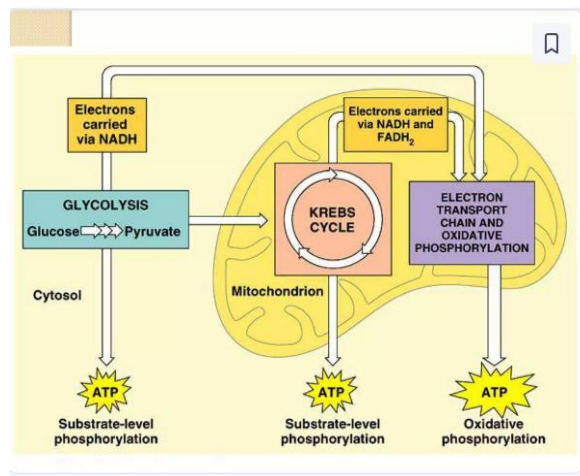


Mekanisme Respirasi

Bagian awal dari respirasi baik aerob maupun anaerob ialah pembentukan asam piruvat melalui tahapan glikolisis. Selanjutnya tergantung pada ada tidaknya oksigen. Bila ada oksigen maka asam piruvat akan dioksidasi menjadi CO_2 dan H_2O . Pada keadaan tidak ada oksigen maka asam piruvat akan dioksidasi menjadi CO_2 dan alkohol.

Mekanisme tahapan respirasi berlangsung dalam 3 tahap yaitu:

- 1) Glikolisis
- 2) Siklus Krebs atau Siklus Asam Sitrat
- 3) Rantai Transport Elektron



Gambar 6.6: Tahapan Proses Respirasi

1. Glikolisis

Lokasi: Terjadi di sitoplasma sel.

Proses: Glukosa, yang memiliki enam atom karbon, dipecah menjadi dua molekul asam piruvat yang masing-masing memiliki tiga atom karbon.

Produk: 2 molekul ATP (netto) dihasilkan, 2 molekul NADH dihasilkan sebagai pengangkut elektron.

2. Dekarboksilasi Oksidatif (Konversi Piruvat ke Asetil-KoA)

Lokasi: Matriks mitokondria.

Proses: Asam piruvat diubah menjadi asetil-KoA melalui reaksi dekarboksilasi oksidatif, di mana satu molekul karbon dioksida (CO_2) dilepaskan dari masing-masing molekul piruvat.

Produk:

- 2 molekul NADH dihasilkan (1 per piruvat).
- 2 molekul CO_2 dihasilkan.

3. Siklus Krebs (Siklus Asam Sitrat)

Lokasi: Matriks mitokondria.

Proses: Asetil-KoA memasuki siklus Krebs dan mengalami serangkaian reaksi yang menghasilkan molekul-molekul energi.

Produk per siklus (per molekul asetil-KoA):

- 1 ATP (dalam bentuk GTP, yang segera diubah menjadi ATP).
- 3 NADH.
- 1 FADH_2 .
- 2 molekul CO_2 .

Satu molekul glukosa menghasilkan dua molekul asetil-KoA, produk ini dikalikan dua untuk per molekul glukosa.

4. Rantai Transport Elektron (Elektron Transport Chain - ETC)

Lokasi: Membran dalam mitokondria (krista mitokondria).

Proses: NADH dan FADH_2 yang dihasilkan dari tahapan sebelumnya melepaskan elektron ke dalam rantai transport elektron. Elektron bergerak melalui serangkaian protein kompleks, yang memompa proton (H^+) dari matriks mitokondria ke ruang antar membran, menciptakan gradien proton.

Penggunaan Oksigen: Oksigen adalah akseptor elektron terakhir di ujung rantai transport elektron. Oksigen menerima elektron dan proton untuk membentuk air (H_2O).

Produk:

- ATP dihasilkan melalui fosforilasi oksidatif menggunakan ATP sintase, yang didorong oleh gradien proton.
- Secara total, sekitar 32-34 ATP dihasilkan per molekul glukosa di rantai transport elektron, menjadikan total keseluruhan ATP dari respirasi aerobik sekitar 36-38 ATP per molekul glukosa.

6.2.2 Transpirasi

Kehilangan air dari tumbuhan melalui transpirasi penting untuk menjaga keseimbangan air dalam tumbuhan dan untuk memfasilitasi penyerapan nutrisi dan transportasi nutrisi ke seluruh bagian tumbuhan. Transpirasi merupakan salah satu mekanisme pengaturan fisiologi pada tumbuhan yang terkait dengan berbagai kondisi yang ada di tubuhnya dan lingkungan sekitarnya. Adanya transpirasi ini menyebabkan terjadinya aliran air yang berlangsung secara imbas dari akar, batang, dan daun. Aliran air tersebut dapat membantu proses penyerapan dan transportasi air tanah di dalam tubuh tumbuhan.

Fungsi Transpirasi adalah: (1) untuk pendinginan daun: Penguapan air dari permukaan daun membantu mendinginkan daun, dan mencegah panas berlebihan; (2) transportasi nutrisi: Transpirasi membantu dalam transportasi mineral dan nutrisi dari akar ke daun; dan (3) keseimbangan air dan tekanan turgor: Transpirasi membantu menjaga tekanan turgor di dalam sel, penting untuk menjaga struktur tanaman.

Terdapat tiga tipe transpirasi yaitu:

1. Transpirasi Stomata: Terjadi melalui stomata yang merupakan pori-pori kecil di permukaan daun. Ini adalah bentuk transpirasi yang paling umum dan menyumbang sekitar 90% dari total transpirasi pada tumbuhan.
2. Transpirasi Kutikula: Terjadi melalui lapisan lilin yang menutupi permukaan daun. Ini merupakan bagian yang relatif kecil dari transpirasi total, tetapi tetap penting. Transpirasi kutikula menyumbang sekitar 10%.
3. Transpirasi Lentisel: Terjadi melalui lentisel, yaitu pori-pori kecil yang ada di batang atau organ kayu lainnya, menyumbang sebesar 0,1%.

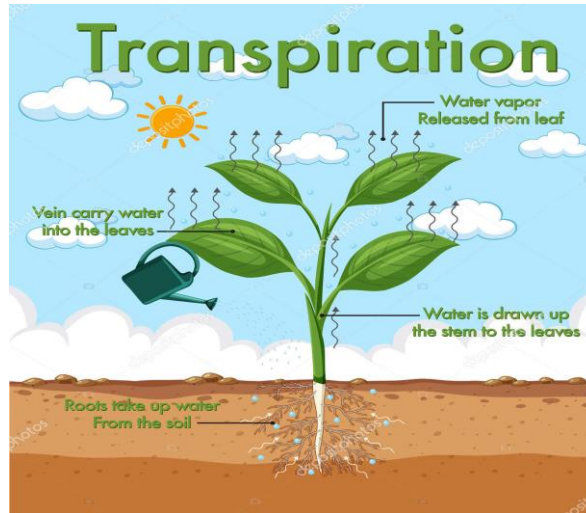
Mekanisme Transpirasi

Pada transpirasi, hal yang penting adalah difusi uap air dari udara yang lembab di dalam daun ke udara kering di luar daun. Kehilangan air dari daun umumnya melibatkan kekuatan untuk menarik air ke dalam daun dari berkas pembuluh yaitu pergerakan air dari sistem pembuluh dari akar ke pucuk, dan bahkan dari tanah ke akar.

Beberapa tahapan penting dalam mekanisme transpirasi, yaitu:

1. Absorpsi Air oleh Akar:

Air dari tanah diserap oleh akar melalui rambut akar secara osmosis. Akar tumbuhan memiliki potensi air yang lebih rendah dibandingkan dengan tanah, sehingga air masuk ke dalam jaringan akar.



Gambar 6.7: Mekanisme Transpirasi

2. Transportasi Air Melalui Xilem:

Setelah diserap, air diangkut ke daun melalui pembuluh xilem. Air bergerak ke atas terutama karena tekanan akar, kapilaritas, dan tegangan kohesi air. Tegangan ini terjadi karena sifat kohesi (air saling menarik) dan adhesi (air menempel pada dinding xilem).

3. Penguapan Air di Daun:

Di dalam daun, air bergerak dari xilem ke sel mesofil. Pada sel mesofil, air menguap dari dinding sel ke ruang udara antarsel di dalam daun.

4. Difusi Uap Air Keluar dari Stomata:

Uap air yang terkumpul di ruang udara kemudian berdifusi keluar melalui stomata (pori-pori kecil di permukaan daun). Transpirasi terutama terjadi saat stomata terbuka, yang biasanya terjadi pada siang hari untuk memfasilitasi pertukaran gas (CO_2 masuk untuk fotosintesis).

6.2.3 Efisiensi Penggunaan Air (Water Use Efficiency – Wue)

Efisiensi Penggunaan Air (WUE) merupakan parameter penting dalam bidang agronomi dan fisiologi tumbuhan yang mengukur kemampuan tanaman dalam mengubah air yang diserap menjadi biomassa atau hasil panen. Di tengah

ancaman perubahan iklim dan kelangkaan air global, pemahaman tentang WUE menjadi kunci untuk keberlanjutan produksi pertanian.

Secara umum, WUE dapat dilihat dari dua perspektif utama:

a. Fisiologis (Fotosintetik)

Mengukur rasio antara laju asimilasi karbon (A) terhadap laju transpirasi (E).

$$\{WUE\}_{\text{fisiologis}} = \frac{A}{E}$$

b. Agronomis

Mengukur rasio antara hasil ekonomis (panen) atau biomassa total terhadap total air yang digunakan selama siklus hidup tanaman.

$$\{WUE\}_{\text{agronomis}} = \frac{\{\text{Hasil Panen} / \text{Biomassa}\}}{\{\text{Total Air yang Dikonsumsi}\} \text{ (Evapotranspirasi)}}$$

1. Mekanisme Fisiologis Pengaturan Air

Tanaman mengatur keseimbangan air dan penyerapan CO₂ melalui beberapa mekanisme adaptif:

- a. Kontrol stomata: Stomata membuka untuk menyerap CO₂ guna fotosintesis, namun di saat yang sama melepaskan uap air via transpirasi. Tanaman yang efisien mampu memperkecil celah stomata (menurunkan konduktansi stomata, pada kondisi cekaman tanpa menurunkan asimilasi karbon secara drastis).
- b. Jalur fotosintesis (C₃, C₄, dan CAM): Tanaman C₄ (misalnya jagung, sorgum) memiliki WUE yang lebih tinggi daripada tanaman C₃ (misalnya padi, kedelai) karena mekanisme konsentrasi CO₂ di sel seludang pembuluh yang meminimalkan fotorespirasi.
- c. Tanaman CAM memiliki WUE tertinggi karena membuka stomata hanya pada malam hari saat *Vapor Pressure Deficit* (VPD) rendah.

2. Faktor-Faktor yang Memengaruhi WUE

Faktor yang memengaruhi efisiensi air dapat dikelompokkan menjadi tiga kategori utama:

Faktor Genetik (Internal)

1. **Arsitektur Kanopi:** Luas daun, sudut daun, dan indeks luas daun memengaruhi intersepsi cahaya dan laju transpirasi mikro.
2. **Sistem Perakaran:** Kedalaman dan kerapatan akar menentukan kapasitas penyerapan air dari lapisan tanah yang lebih dalam saat terjadi kekeringan.

Faktor Lingkungan (Eksternal)

1. **Kelembapan Udara dan Suhu:** Tingginya VPD (udara kering dan panas) meningkatkan laju transpirasi secara eksponensial, yang sering kali menurunkan WUE.
2. **Ketersediaan Air Tanah:** Cekaman kekeringan moderat kadang dapat memicu peningkatan WUE fisiologis melalui penutupan stomata parsial (sinyal asam absisat/ABA dari akar).

3. Faktor Manajemen Budidaya

1. **Sistem Irigasi:** Penggunaan irigasi tetes (*drip irrigation*) atau manajemen *Alternate Wetting and Drying* (AWD) secara signifikan meningkatkan WUE dibanding irigasi genangan (*flooding*).
2. **Nutrisi Tanaman:** Pemberian kalium (K) mengoptimalkan fungsi pembukaan/penutupan stomata, sedangkan aplikasi nitrogen (N) yang seimbang meningkatkan kapasitas fotosintesis per satuan air yang hilang.

4. Strategi Agronomis Meningkatkan WUE

Untuk meningkatkan efisiensi air di tingkat lahan, beberapa pendekatan praktis dapat diterapkan:

1. **Deficit Irrigation (DI) & Regulated Deficit Irrigation (RDI):** Pemberian air di bawah kebutuhan evapotranspirasi penuh pada fase pertumbuhan non-kritis tanaman guna menghemat air tanpa mengorbankan hasil panen secara signifikan.

2. Penggunaan Mulsa: Penggunaan mulsa organik maupun anorganik (plastik) untuk menekan evaporasi langsung dari permukaan tanah, sehingga air lebih banyak dialokasikan untuk transpirasi produktif.
3. Aplikasi Pembenh Tanah (*Soil Conditioner*): Penambahan bahan organik, biochar, atau hidrogel untuk meningkatkan kapasitas menahan air (*water holding capacity*) tanah.
4. Sistem Budidaya Adaptif: Seperti metode *Salibu* (ratun) pada padi yang meminimalkan fase pengolahan tanah awal yang padat air, atau sistem pertanian perkotaan berbasis presisi.

6.3 Penyerapan dan Translokasi Hara

6.3.1 Penyerapan Hara

Penyerapan hara adalah proses di mana tanaman mengambil unsur hara dari lingkungan, terutama dari tanah, melalui akar untuk mendukung pertumbuhan, perkembangan, dan fungsi fisiologis. Unsur hara yang diserap ini termasuk unsur makro dan unsur mikro yang esensial untuk berbagai proses biokimia dalam tanaman.

1. Struktur Akar dan Penyerapan Hara

Akar merupakan organ utama dalam penyerapan hara. Beberapa struktur akar yang berperan dalam penyerapan hara meliputi:

- a. Rambut Akar. Proyeksi sel epidermis yang meningkatkan luas permukaan akar untuk penyerapan air dan hara.
- b. Korteks. Lapisan di bawah epidermis yang membantu dalam transportasi air dan hara menuju ke dalam tanaman.
- c. Endodermis. Lapisan sel yang mengatur aliran air dan hara masuk ke dalam xilem melalui jalur simplastik dan apoplastik.
- d. Xilem dan Floem. Jaringan pembuluh yang mengangkut air dan hara dari akar ke bagian atas tanaman.

Penyerapan hara oleh tanaman melibatkan beberapa mekanisme, yaitu:

a. Penyerapan Pasif

Penyerapan pasif melalui proses difusi, osmosis, dan aliran massa:

- 1) Difusi adalah pergerakan ion atau molekul dari area dengan konsentrasi tinggi ke area dengan konsentrasi rendah melalui membran sel akar. Difusi terjadi tanpa memerlukan energi dari tanaman.
- 2) Osmosis adalah pergerakan air melalui membran semi-permeabel dari daerah dengan konsentrasi air tinggi (potensial air tinggi) ke daerah dengan konsentrasi air rendah (potensial air rendah). Proses ini penting untuk penyerapan air oleh tanaman.
- 3) Aliran Massa (Mass Flow) adalah pergerakan air dan ion terlarut secara bersama-sama ke dalam akar akibat adanya perbedaan tekanan air di dalam tanah dan akar. Air dan ion bergerak bersama melalui jaringan tanah dan akar hingga mencapai xilem.

b. Penyerapan Aktif

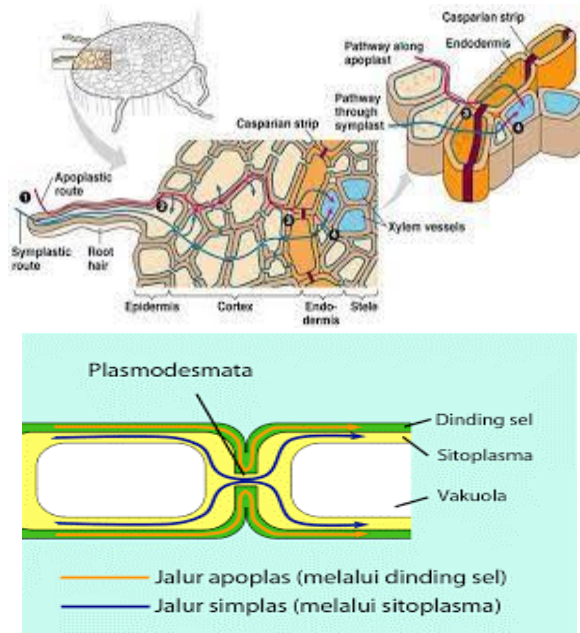
- 1) Transport Aktif: Proses penyerapan ion dari lingkungan luar ke dalam sel tanaman melawan gradien konsentrasi. Transport aktif memerlukan energi dalam bentuk ATP. Ion diangkut melalui protein pembawa (carrier proteins) dan pompa ion (ion pumps) yang terletak di membran sel akar.
- 2) Pompa H^+ (Proton Pump): Menghasilkan gradien elektrokimia dengan memompa ion H^+ keluar dari sel akar, yang memungkinkan masuknya ion lainnya melalui transport aktif sekunder (contohnya, masuknya ion K^+ atau NO_3^- melalui co-transport).
- 3) Transporter Spesifik: Berperan dalam memfasilitasi penyerapan ion spesifik seperti kalium (K^+), nitrat (NO_3^-), dan fosfat (PO_4^{3-}).

6.3.2 Translokasi Hara dalam Tanaman

Terdapat dua jalur utama untuk penyerapan dan translokasi hara dari tanah ke xilem:

a. Jalur Apoplas

Jalur apoplastik adalah pergerakan air dan ion melalui ruang antar sel dan dinding sel tanpa masuk ke dalam sitoplasma sel. Jalur ini dihalangi oleh pita Kaspari di endodermis, sehingga ion dan air harus berpindah ke jalur simplastik untuk memasuki xilem.



Gambar 6.8: Jalur Penyerapan Hara (Apoplas dan Simplas)

b. Jalur Simplas

Pergerakan air dan ion melalui sitoplasma sel, dari satu sel ke sel lainnya melalui plasmodesmata (saluran antar sel yang menghubungkan sitoplasma sel-sel tetangga). Jalur ini memungkinkan kontrol yang lebih besar atas penyerapan ion karena ion harus melewati membran sel dan dapat diatur oleh mekanisme transportasi aktif.

6.4 Mekanisme Adaptasi Tanaman Terhadap Cekaman Lingkungan

Pada kondisi terjadi perubahan lingkungan yang ekstrem atau cekaman (stress), tanaman harus mengaktifkan sistem pertahanan internal untuk bertahan hidup.

Cekaman lingkungan secara garis besar dibagi menjadi dua kelompok:

- **Cekaman abiotik:** Disebabkan oleh faktor non-makhluk hidup seperti kekeringan, salinitas (kadar garam tinggi), suhu ekstrem (panas/dingin), genangan air (hipoksia), dan cekaman logam berat.
- **Cekaman biotik:** Disebabkan oleh makhluk hidup lain seperti serangan hama, infeksi patogen (jamur, bakteri, virus), dan kompetisi gulma.

6.4.1 Tingkatan Mekanisme Respons Tanaman

Pada saat tanaman mendeteksi sinyal cekaman (misalnya penurunan kadar air atau perubahan suhu), tanaman akan merespons melalui tiga tingkatan utama yang saling terintegrasi:

A. Respons Biokimia dan Fisiologis

1. **Sintesis Osmolit (Osmoprotektan):** Tanaman mengakumulasi senyawa terlarut yang kompatibel seperti prolina, glisin betain, dan gula terlarut untuk menurunkan potensial osmotik sel tanpa merusak makromolekul. Ini membantu sel mempertahankan turgor saat kekeringan atau salinitas tinggi.
2. **Sistem Antioksidan:** Cekaman lingkungan memicu produksi *Reactive Oxygen Species* (ROS) yang merusak sel. Tanaman mengatasinya dengan memproduksi antioksidan enzimatis (seperti *superoxide dismutase* [SOD], *catalase* [CAT]) dan non-enzimatis (seperti askorbat dan glutathione).
3. **Regulasi Hormonal:** Asam Absisat (ABA) adalah hormon kunci dalam cekaman abiotik yang memicu penutupan stomata untuk mencegah kehilangan air lebih lanjut. Sementara Asam Salisilat (SA) dan Asam Jasmonat (JA) berperan penting dalam memediasi pertahanan terhadap cekaman biotik.

B. Adaptasi Morfologis dan Anatomis

1. **Modifikasi Akar:** Pada kondisi kekeringan, tanaman sering mengalokasikan lebih banyak biomassa ke akar (meningkatkan rasio akar/tajuk) dan memperdalam penetrasi akar untuk mencari sumber air bawah tanah.
2. **Struktur Daun:** Pembentukan lapisan kutikula yang lebih tebal, pembentukan trikoma (rambut daun) untuk memantulkan cahaya matahari berlebih, atau penggulungan daun untuk mengurangi laju transpirasi.
3. **Aerenkim:** Pada tanaman yang tergenang air (seperti padi), terbentuk jaringan aerenkim (ruang udara di dalam korteks) yang berfungsi menyalurkan oksigen dari tajuk ke akar yang terendam.

C. Adaptasi Molekuler dan Genetik

- **Ekspresi Gen Cekaman:** Aktivasi faktor transkripsi spesifik (misalnya *Dehydration-Responsive Element-Binding* [DREB]/CBF) yang menyalakan gen-gen pelindung sel, seperti protein *Late Embryogenesis Abundant* (LEA) dan *Heat Shock Proteins* (HSP) yang berfungsi sebagai pendamping (*chaperone*) untuk menjaga stabilitas protein.

6.4.2 Strategi Adaptasi: Avoidance vs Tolerance

Dalam menghadapi cekaman, tanaman secara evolusioner mengadopsi salah satu atau kombinasi dari dua strategi yang disajikan pada table 2 berikut:

Strategi	Deskripsi	Contoh
Penghindaran (<i>Avoidance</i>)	Tanaman mengaktifkan mekanisme agar jaringan internalnya tidak langsung mengalami cekaman.	Menggugurkan daun saat kemarau (<i>deciduous</i>), atau menutup stomata dengan cepat.
Toleransi (<i>Tolerance</i>)	Tanaman membiarkan jaringannya mengalami cekaman, namun sel-selnya	Akumulasi prolina yang tinggi untuk menjaga sel

	memiliki kemampuan seluler untuk bertahan dari kerusakan.	tetap hidup meski kadar air sel anjlok.
Penghindaran (<i>Avoidance</i>)	Tanaman mengaktifkan mekanisme agar jaringan internalnya tidak langsung mengalami cekaman.	Menggugurkan daun saat kemarau (<i>deciduous</i>), atau menutup stomata dengan cepat.
Toleransi (<i>Tolerance</i>)	Tanaman membiarkan jaringannya mengalami cekaman, namun sel-selnya memiliki kemampuan seluler untuk bertahan dari kerusakan.	Akumulasi prolin yang tinggi untuk menjaga sel tetap hidup meski kadar air sel anjlok.

6.5 Hubungan Sumber dan Limbung dalam Produktivitas Tanaman

Produktivitas tanaman tidak hanya ditentukan oleh seberapa banyak tanaman melakukan fotosintesis, melainkan bagaimana hasil fotosintesis tersebut dialokasikan ke bagian-bagian tanaman yang bernilai ekonomis (biji, buah, umbi, atau daun). Pola alokasi ini diatur oleh interaksi dinamis antara Sumber (*Source*) dan Limbung (*Sink*).

Sumber adalah organ atau jaringan tanaman yang bertindak sebagai produsen atau eksportir net fotoasimilat (terutama sukrosa). *Contoh*: Daun dewasa yang aktif berfotosintesis, atau organ penyimpanan (seperti umbi) saat mengalami mobilisasi cadangan makanan pada fase awal pertumbuhan.

Limbung (*Sink*) adalah Organ atau jaringan tanaman yang bertindak sebagai konsumen atau importir net fotoasimilat untuk pertumbuhan, perkembangan, atau penyimpanan cadangan makanan. *Contoh*: Meristem pucuk, akar, bunga, buah, biji, dan umbi yang sedang berkembang.

6.5.1 Mekanisme Translokasi (Aliran Massa)

Hubungan antara *source* dan *sink* dimediasi melalui jaringan pembuluh **floem**. Berdasarkan teori aliran tekanan (*pressure-flow hypothesis*), pergerakan asimilat mengikuti tahapan berikut:

1. **Phloem Loading**: Sukrosa dipompa secara aktif (memerlukan energi/ATP) dari sel-sel sumber ke dalam elemen tabung tapis floem.
2. **Peningkatan Tekanan Turgor**: Akumulasi sukrosa menurunkan potensial air di floem, menyebabkan air dari xilem masuk ke floem secara osmosis. Ini menciptakan tekanan hidrostatik (turgor) yang tinggi di ujung *source*.
3. **Aliran Massa (*Bulk Flow*)**: Larutan gula mengalir melalui floem dari area bertekanan tinggi (*source*) ke area bertekanan rendah (*sink*).
4. **Phloem Unloading**: Di ujung *sink*, sukrosa dikeluarkan dari floem untuk digunakan atau disimpan, potensial air meningkat, dan air kembali masuk ke dalam xilem.

6.5.2 Regulasi Balik (Feedback Regulation) & Kekuatan Limbung

Hubungan *source-sink* tidak bersifat satu arah, melainkan interaksi yang saling memengaruhi secara timbal balik (*cross-talk*):

1. **Kekuatan Limbung (*Sink Strength*)**: Ditentukan oleh ukuran fisik organ (*sink size*) dikalikan dengan kapasitas metabolik untuk menarik asimilat (*sink activity*). Organ dengan *sink strength* tertinggi akan mendominasi prioritas alokasi makanan.
2. **Feedback Inhibition of Photosynthesis**: Jika kapasitas *sink* menurun (misalnya buah rontok atau gagal terbentuk akibat cekaman), hasil fotosintesis akan menumpuk di daun (*source*). Akumulasi sukrosa dan pati ini memicu sinyal umpan balik negatif yang menurunkan laju fotosintesis secara signifikan dengan menekan ekspresi gen-gen fotosintetik.

6.5.3 Implikasi dalam Agronomi & Pemuliaan Tanaman

Memanipulasi keseimbangan *source-sink* adalah kunci utama dalam meningkatkan indeks panen adalah memanipulasi keseimbangan sumber dan limbung:

1. Pemuliaan Tanaman Semidwarf (Revolusi Hijau): Penurunan tinggi tanaman padi dan gandum mengurangi alokasi asimilat ke *sink* vegetatif (batang) dan mengalihkannya secara besar-besaran ke *sink* reproduktif (bulir biji).
2. Pruning (Pemangkasan): Pemangkasan daun tua (daun bawah yang sudah menjadi *sink* parasit karena laju respirasinya lebih tinggi dari fotosintesisnya) atau pengurangan sebagian bunga bertujuan mengoptimalkan pasokan asimilat ke buah utama agar ukurannya seragam.
3. Defoliiasi Alami pada Fase Pengisian Biji: Saat tanaman memasuki fase generatif akhir, daun-daun akan mengalami penuaan (*senescence*) terprogram untuk memobilisasi nitrogen dan karbohidrat yang tersimpan di tajuk langsung menuju ke biji.

BAB 7

SISTEM PERAKARAN TANAMAN DAN INTERAKSINYA DENGAN TANAH

7.1 Arsitektur dan Morfologi Sistem Perakaran

7.1.1 Pengertian Sistem Perakaran

Sistem perakaran adalah seluruh struktur akar yang berkembang di dalam tanah dan berfungsi untuk menyerap air serta unsur hara, menopang tanaman, menyimpan cadangan makanan, dan berinteraksi dengan mikroorganisme tanah. Sistem perakaran dapat dikaji melalui dua aspek utama, yaitu morfologi akar dan arsitektur sistem perakaran (**Root System Architecture/RSA**) (Jan, et al., 2024). Sistem perakaran merupakan keseluruhan akar primer, akar lateral, akar adventif, dan rambut akar yang berkembang di dalam tanah. Struktur perakaran menentukan kemampuan tanaman memperoleh sumber daya yang tersedia pada berbagai kedalaman tanah.

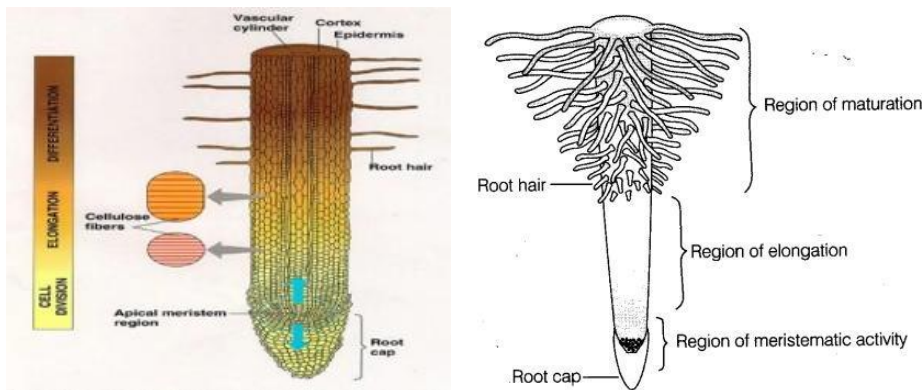
Pemahaman mengenai morfologi akar menjadi penting karena karakteristik perakaran sangat menentukan kemampuan tumbuhan dalam memperoleh sumber daya dari lingkungan. Dalam bidang pertanian modern, data mengenai morfologi dan arsitektur akar digunakan untuk mengembangkan varietas tanaman yang lebih tahan terhadap kekeringan, efisien dalam penggunaan nutrisi, dan mampu beradaptasi terhadap perubahan iklim. Berbagai literatur terbaru menunjukkan bahwa perubahan morfologi akar merupakan respons adaptif terhadap berbagai tekanan lingkungan. Kekeringan menyebabkan penurunan panjang akar dan luas permukaan akar pada banyak spesies tumbuhan, tetapi meningkatkan kepadatan jaringan akar sebagai strategi konservasi sumber daya.

Ciri-ciri Umum Akar terdiri dari; Akar memiliki karakteristik berikut, Tidak berbuku-buku dan tidak beruas. Tidak memiliki daun maupun kuncup, Umumnya berwarna putih atau kekuningan, Tumbuh ke arah gravitasi

(geotropisme positif). Memiliki tudung akar (kaliptra) yang melindungi jaringan meristem.

Bagian-bagian Morfologi Akar terdiri dari ;

- Leher akar (*collum radicle*) ; bagian peralihan antara batang dan akar.
- Batang akar (*corpus radicle*); bagian utama akar yang berada di bawah tanah.
- Ujung akar (*apex radicle*) ; tempat berlangsungnya pembelahan sel dan pertumbuhan primer.
- Tudung akar (*calyptra*) ; melindungi meristem akar saat menembus tanah.
- Zona pembelahan ; daerah meristematik yang aktif membelah.
- Zona pemanjangan ; sel-sel mengalami pertambahan ukuran.
- Zona diferensiasi atau maturasi ; muncul rambut akar dan jaringan mulai terspesialisasi.
- Rambut akar (*root hairs*); perpanjangan sel epidermis yang memperluas bidang serapan air dan hara.



Gambar 7.1: Bagian-Bagian Morfologi Akar

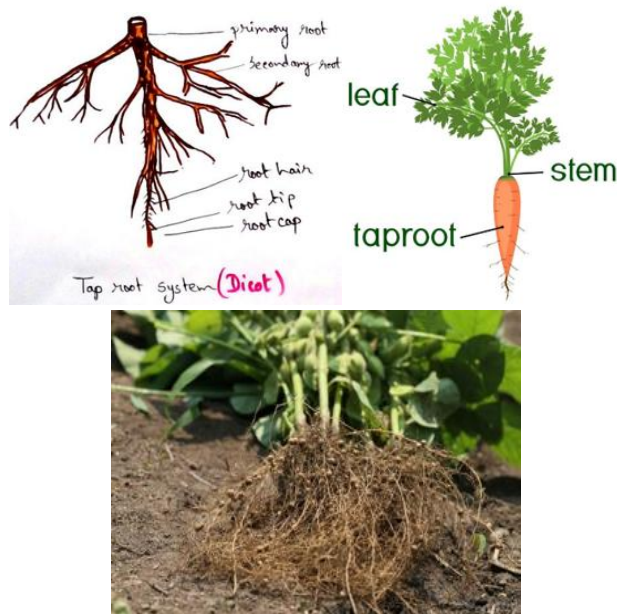
(Jan et al., 2024)

7.1.2 Sistem Perakaran

Berdasarkan bentuk dan perkembangan akar, sistem perakaran dibedakan menjadi dua tipe utama ;

a. Akar Tunggang (tap root system)

Akar tunggang berkembang dari akar primer yang terus tumbuh dan menjadi akar utama. Sistem ini umumnya ditemukan pada tumbuhan dikotil seperti mangga (*Mangifera indica*), kacang tanah (*Arachis hypogaea*), dan wortel (*Daucus carota*). Keunggulan akar tunggang adalah kemampuannya mencapai lapisan tanah yang lebih dalam sehingga lebih tahan terhadap kekeringan.



Gambar 7.2: Tanaman Akar Tunggang

(Jan et al., (2024)

b. Akar Serabut (fibrous root)

Akar serabut terdiri atas banyak akar yang ukurannya relatif sama dan berkembang dari pangkal batang. Sistem ini umum ditemukan pada tumbuhan monokotil seperti padi (*Oryza sativa*), jagung (*Zea mays*), dan kelapa (*Cocos nucifera*). Akar serabut efektif dalam menyerap air dan

unsur hara pada lapisan tanah bagian atas serta membantu mengurangi erosi tanah.



Gambar 7.3: Tanaman Akar Serabut

(Jan, et al., 2024)

Morfologi akar mempelajari karakter fisik akar seperti panjang, diameter, volume, dan rambut akar, sedangkan arsitektur sistem perakaran (RSA) mempelajari organisasi spasial seluruh sistem akar yang meliputi kedalaman, sudut pertumbuhan, pola percabangan, dan distribusi akar dalam tanah. RSA merupakan hasil integrasi berbagai karakter morfologi akar dan menjadi salah satu sifat kunci untuk meningkatkan efisiensi serapan air dan hara serta ketahanan tanaman terhadap cekaman lingkungan (Srivastava, & Yetgin, 2024)

7.1.3 Faktor yang Mempengaruhi Arsitektur dan Morfologi Akar

Ada 2 faktor yang mempengaruhi yaitu;

1. Faktor Internal terdiri dari; genetik tanaman dan hormon tumbuhan: auksin, sitokinin, giberelin, etilen, strigolaktan.

Auksin merupakan regulator utama pembentukan akar lateral dan perkembangan RSA.

2. Faktor Eksternal terdiri dari; ketersediaan air, unsur hara (N, P, K), pH tanah, suhu tanah, salinitas, pemadatan tanah, mikro organisme rizosfer.

RSA bersifat sangat plastis dan mampu berubah sesuai kondisi lingkungan untuk mengoptimalkan perolehan sumber daya. Informasi terbaru menunjukkan bahwa karakter RSA menjadi target utama dalam pemuliaan tanaman karena berhubungan dengan efisiensi penggunaan air (water use

efficiency), efisiensi penggunaan nitrogen dan fosfor, ketahanan kekeringan, ketahanan cekaman salinitas, interaksi dengan mikroba menguntungkan dan peningkatan produktivitas tanaman berkelanjutan.

7.2 Rizhosfer: Zona Interaksi Aktif Akar-Tanah-Mikroba

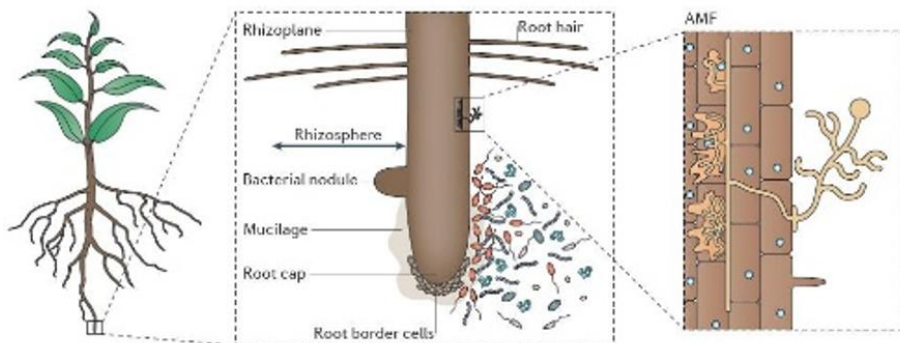
7.2.1 Pengertian Rizhosfer

Rizhosfer adalah daerah tanah yang berada di sekitar akar tanaman dan secara langsung dipengaruhi oleh aktivitas akar. Istilah rizhosfer pertama kali diperkenalkan oleh Lorenz Hiltner pada tahun 1904 untuk menggambarkan wilayah tanah yang menjadi pusat interaksi antara akar tanaman, mikroorganisme, dan lingkungan tanah. Rizhosfer merupakan salah satu ekosistem paling aktif secara biologis di bumi karena menjadi tempat pertukaran nutrisi, sinyal kimia, dan energi antara tanaman dan mikroorganisme.

a. Karakteristik Rizhosfer

Rizhosfer dicirikan oleh adanya; kepadatan mikroba yang jauh lebih tinggi, aktivitas enzim yang lebih besar, konsentrasi senyawa organik lebih tinggi, dinamika unsur hara yang cepat dan perubahan pH lokal.

Akar tanaman melepaskan berbagai senyawa organik yang dikenal sebagai eksudat akar (*root exudates*), seperti: gula, asam amino, asam organik, vitamin dan fenol, flavanoid, mukilago (lendir akar). Senyawa-senyawa ini menjadi sumber energi utama bagi mikroorganisme rizhosfer.



Gambar 7.4: Komponen Utama Rizosfer

(Jan et al., 2024)

b. Interaksi Akar dan Mikroorganisme

Mikroorganisme rizosfer terdiri atas: Bakteri pemacu pertumbuhan tanaman (PGPR), mikoriza, aktinomiset, jamur saprofit, mikroorganisme patogen. Interaksi tersebut dapat bersifat; mutualisme, komensalisme, kompetisi, parasitisme. Mikroorganisme bermanfaat meningkatkan pelarutan fosfat, fiksasi nitrogen, produksi fitohormon, dan ketahanan tanaman terhadap patogen.

c. Rizosfer sebagai Hotspot Biogeokimia

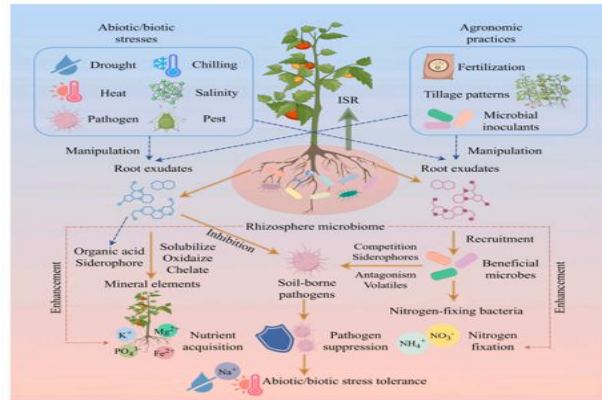
Rizhosfer merupakan lokasi utama berlangsungnya: siklus karbon, siklus nitrogen, siklus fosfor, transformasi sulfur, pembentukan agregat tanah.

7.2.2 Fungsi Rizhosfer bagi Tanaman

Beberapa Fungsi Rizhosfer bagi tanaman adalah sebagai berikut;

- a. Meningkatkan ketersediaan hara; Rizhosfer membantu mobilisasi unsur hara seperti; Nitrogen (N), Fosfor (P) , Kalium (K), Besi (Fe) , Seng (Zn)
- b. Meningkatkan pertumbuhan tanaman; Mikroba rizhosfer menghasilkan hormon tumbuh seperti; auksin, gibberelin dan sitokinin.
- c. Meningkatkan ketahanan cekaman; Rizhosfer membantu tanaman mengatasi; kekeringan, salinitas, logam berat dan suhu ekstrim.
- d. Menekan penyakit tanaman; Komunitas mikroba yang sehat dapat membentuk *suppressive soil*, yaitu tanah yang secara alami mampu menekan perkembangan patogen.

Konsep modern memandang rizhosfer sebagai bagian dari mikrobioma tanaman (*plant microbiome*), yaitu seluruh komunitas mikroorganisme yang hidup berasosiasi dengan tanaman. Praktik pengelolaan pertanian, seperti pemupukan, aplikasi pestisida, dan pengolahan tanah, merupakan penentu utama komposisi mikrobioma rizhosfer. Namun, penggunaan pupuk kimia yang berlebihan telah menjadi perhatian luas, karena dapat secara signifikan mengurangi keanekaragaman mikroba tanah, khususnya mengurangi taksa bermanfaat di rizhosfer tanaman di bawah pertanian intensif, (Gambar 7.5)



Gambar 7.5: Mekanisme Adaptasi Tanaman terhadap Tekanan Lingkungan Melalui Mediasi Mikrobioma Rizhosfer

(Sun et al., 2021 dan Xun et al., 2024)

7.3. Eksudat Akar Dan Pengaruhnya Terhadap Komunitas Mikroba Tanah

7.3.1 Pengertian Eksudat Akar

Eksudat akar (*root exudates*) adalah berbagai senyawa organik dan anorganik yang dilepaskan oleh akar tanaman ke daerah sekitar akar (rizhosfer). Senyawa ini berasal dari hasil fotosintesis yang dialokasikan ke akar. Tanaman dapat mengeluarkan hingga sekitar 20–40% karbon hasil fotosintesis ke dalam tanah melalui eksudat akar (Wen et al., 2024).

Eksudat akar terdiri atas: Gula sederhana (glukosa, fruktosa, sukrosa), Asam amino, Asam organik (sitrat, malat, oksalat), Senyawa fenolik, Flavonoid, protein dan enzim, Mukilago (mucilage), Metabolit sekunder lainnya.

Eksudat akar berperan dalam Ekosistem Tanah sebagai ;

1. Sumber nutrisi bagi mikroorganisme tanah
2. Sinyal kimia untuk menarik mikroba tertentu
3. Mediator interaksi tanaman–mikroba
4. Pengubah sifat kimia dan biologis tanah
5. Mekanisme pertahanan tanaman terhadap patogen

7.3.2 Pengaruh Eksudat Akar terhadap Komunitas Mikroba Tanah

1. Meningkatkan kelimpahan mikroorganisme seperti; gula, asam amino, dan asam organik yang dikeluarkan akar menjadi sumber karbon dan energi bagi mikroba tanah. Akibatnya: biomassa mikroba meningkat, aktivitas metabolik mikroba meningkat, laju dekomposisi bahan organik bertambah.

Contohnya, eksudat yang kaya gula dapat merangsang pertumbuhan bakteri rizosfer seperti *Pseudomonas*, *Bacillus*, dan kelompok Plant Growth-Promoting Rhizobacteria (PGPR).

2. Menyeleksi komposisi mikroba (Microbial Recruitment); Eksudat akar tidak hanya memberi makan mikroba, tetapi juga bertindak sebagai "filter biologis" yang menentukan mikroba mana yang dapat berkembang di sekitar akar.

Beberapa contoh: Flavonoid menarik bakteri penambat nitrogen seperti genus *Rhizobium*. Asam organik menarik bakteri pelarut fosfat. Senyawa tertentu merekrut mikoriza arbuskular (AMF).

3. Meningkatkan Siklus Hara; Mikroba yang direkrut oleh eksudat akar berperan dalam: fiksasi nitrogen , pelarutan fosfat , mineralisasi bahan organik , siklus sulfur dan karbon
4. Menekan Mikroba Patogen; Eksudat akar dapat: mengaktifkan mikroba antagonis terhadap patogen, menghasilkan senyawa antimikroba, menginduksi resistensi sistemik tanaman. Namun beberapa eksudat tertentu justru dapat menarik patogen apabila komposisinya mendukung infeksi.
5. Membentuk jaringan interaksi mikroba; Eksudat akar memengaruhi: pembentukan biofilm mikroba, kompetisi dan kerja sama antar mikroba. Proses ini menentukan stabilitas dan fungsi komunitas mikroba tanah.

Informasi terkini menunjukkan bahwa eksudat akar bertindak sebagai "arsitek molekuler" yang mengendalikan pembentukan mikrobioma rizosfer, sehingga menjadi fokus penting dalam pengembangan pertanian berkelanjutan dan rekayasa mikrobioma tanaman.

7.4 Respons Akar Terhadap Ketersediaan Hara Dan Air

7.4.1 Respons Akar terhadap Ketersediaan Hara

Akar merupakan organ utama tanaman yang berfungsi menyerap air dan unsur hara dari tanah. Ketersediaan air dan hara yang tidak merata di lingkungan menyebabkan tanaman mengembangkan berbagai respons morfologi, fisiologi, biokimia, dan molekuler untuk meningkatkan efisiensi penyerapan sumber daya. Respons ini sangat penting bagi pertumbuhan, produktivitas, dan ketahanan tanaman terhadap cekaman lingkungan'

Respon akar terhadap ketersediaan hara yaitu;

- a. Perubahan arsitektur sistem perakaran; Ketika unsur hara terbatas, tanaman mengubah pola pertumbuhan akar untuk meningkatkan jangkauan tanah. Beberapa respons yang umum terjadi; Pemanjangan akar primer, Peningkatan jumlah akar lateral, Pembentukan rambut akar yang lebih banyak dan lebih panjang, Peningkatan rasio akar terhadap tajuk (root shoot ratio). Sebagai contoh, defisiensi fosfor (P) sering menyebabkan pertumbuhan akar lateral dan rambut akar meningkat sehingga luas permukaan penyerapan bertambah (Lynch, 2022).
- b. Peningkatan eksudasi akar ; Pada kondisi kekurangan hara, akar meningkatkan pelepasan eksudat berupa: asam organik (sitrat, malat), asam amino, senyawa fenolik, enzim fosfatase, asam organik membantu melarutkan fosfor yang terikat dalam tanah sehingga lebih tersedia bagi tanaman (Wen et al., 2024).
- c. Rekrutmen mikroba menguntungkan ; Akar dapat menarik mikroorganisme tertentu yang membantu penyediaan unsur hara, antara lain: Bakteri penambat nitrogen (*Rhizobium*, *Azospirillum* Bakteri pelarut fosfat), Fungi mikoriza arbuskular (AMF). Interaksi ini meningkatkan efisiensi serapan N, P, dan unsur mikro lainnya (Jiao et al., 2024).
- d. Aktivasi transporter hara; Defisiensi unsur hara mengaktifkan ekspresi gen transporter spesifik. Contohnya; PHT1 untuk fosfat , NRT untuk nitrat, AMT untuk amonium dan IRT1 untuk besi. Peningkatan aktivitas transporter memungkinkan tanaman menyerap unsur hara lebih efisien meskipun konsentrasinya rendah di tanah (Wang et al., 2025).

7.4.2 Respons Akar terhadap Ketersediaan Air

1. Pemanjangan Akar ke Lapisan Tanah yang Lebih Dalam; Saat terjadi kekeringan, tanaman umumnya: Mengurangi pertumbuhan tajuk, Meningkatkan pertumbuhan akar ke lapisan tanah yang lebih dalam. Strategi ini memungkinkan tanaman memperoleh cadangan air yang masih tersedia pada horizon tanah bawah (Koevoets et al., 2024).
2. Perubahan Distribusi Akar ; Fenomena yang dikenal sebagai hydrotropism menyebabkan akar tumbuh menuju daerah dengan kandungan air lebih tinggi. Respons ini dikendalikan oleh hormon tanaman seperti: Asam absisat (ABA), Auksin dan sitokinin. Hydrotropism menjadi mekanisme penting dalam adaptasi tanaman terhadap kekeringan (Dietrich et al., 2024).
3. Peningkatan Konduktivitas Hidraulik Akar; Tanaman meningkatkan kemampuan akar menyerap air melalui peningkatan aktivitas protein aquaporin. Aquaporin berfungsi sebagai saluran air yang mempercepat pergerakan air melintasi membran sel akar. Peningkatan ekspresi aquaporin sering ditemukan pada tanaman yang toleran terhadap cekaman kekeringan (Gao et al., 2025).
4. Akumulasi Osmolit ; Akar mengakumulasi senyawa osmotik seperti: Prolin, glisin betain, gula larut. Senyawa tersebut membantu mempertahankan tekanan turgor sel sehingga akar tetap dapat menyerap air pada kondisi potensial air tanah rendah (Zhang et al., 2024).

Di lapangan, kekurangan air dan hara sering terjadi secara bersamaan. Respons akar yang terintegrasi meliputi peningkatan panjang akar spesifik (specific root length), peningkatan eksudasi akar, peningkatan asosiasi dengan mikoriza, aktivasi gen respons cekaman, serta peningkatan efisiensi penggunaan air dan hara. Publikasi terbaru menunjukkan bahwa koordinasi antara sinyal hara dan air di akar menentukan kemampuan tanaman beradaptasi terhadap perubahan iklim dan degradasi lahan (Gupta et al., 2025).

Dampak terhadap Produktivitas Tanaman adalah bahwa Respons akar yang efektif dapat: 1) Meningkatkan efisiensi serapan hara. 2) Meningkatkan efisiensi penggunaan air (Water Use Efficiency/WUE), 3) Mempertahankan

fotosintesis selama cekaman, 4).Meningkatkan toleransi kekeringan, 5). Mendukung hasil panen yang lebih stabil. Sebaliknya, respons akar yang kurang adaptif dapat menyebabkan penurunan pertumbuhan dan produktivitas tanaman.

7.5 Peran Sistem Perakaran dalam Stabilitas dan Perbaikan Struktur Tanah

Sistem perakaran merupakan komponen penting dalam ekosistem tanah yang tidak hanya berfungsi menyerap air dan unsur hara, tetapi juga berperan dalam pembentukan, pemeliharaan, dan perbaikan struktur tanah. Struktur tanah yang baik ditandai oleh agregasi tanah yang stabil, porositas yang memadai, aerasi yang baik, serta kemampuan infiltrasi dan retensi air yang optimal. Melalui aktivitas fisik, kimia, dan biologisnya, akar tanaman berkontribusi besar terhadap peningkatan kualitas tanah dan keberlanjutan sistem pertanian.

Peran sistem perakaran dalam stabilitas dan perbaikan struktur tanah yaitu;

1. Peran Akar dalam Pembentukan dan Stabilisasi Agregat Tanah
 - a. Pengikatan partikel tanah secara fisik ; Akar berfungsi sebagai pengikat alami yang menyatukan partikel-partikel tanah menjadi agregat yang lebih stabil. Jaringan akar yang berkembang di dalam tanah membentuk kerangka fisik yang membantu mempertahankan integritas struktur tanah dan mengurangi risiko disintegrasi akibat hujan atau pengolahan tanah. Akar serabut umumnya lebih efektif dalam meningkatkan stabilitas agregat dibandingkan akar tunggang karena memiliki luas kontak yang lebih besar dengan tanah (Poirier et al., 2024).
 - b. Produksi eksudat akar sebagai agen perekat; Akar melepaskan berbagai senyawa organik seperti: Polisakarida, mukilago (mucilega), protein, asam organik. Senyawa tersebut berfungsi sebagai perekat biologis yang membantu menyatukan partikel tanah dan meningkatkan stabilitas agregat. Mukilago akar diketahui berperan penting dalam meningkatkan kohesi partikel tanah dan mempertahankan kelembapan di sekitar zona perakaran (Carminati et al., 2024).

2. Perbaikan Porositas dan Aerasi Tanah

- a. Pembentukan biopori ; Pertumbuhan akar menciptakan saluran alami yang dikenal sebagai biopori. Biopori berfungsi untuk: memperbaiki infiltrasi air, meningkatkan aerasi tanah. mempermudah penetrasi akar generasi berikutnya, menjadi habitat mikroorganisme tanah.

Setelah akar mati dan terdekomposisi, saluran tersebut tetap bertahan sebagai pori makro yang meningkatkan kualitas fisik tanah (Rabot et al., 2024).

- b. Mengurangi pemadatan tanah; Akar tanaman mampu menembus lapisan tanah yang padat dan secara bertahap memperbaiki struktur tanah melalui proses yang dikenal sebagai biological tillage atau olah tanah biologis.

Tanaman dengan akar dalam seperti alfalfa dan lobak (radish) sering digunakan sebagai tanaman penutup untuk memperbaiki tanah yang mengalami pemadatan (Chen et al., 2025).

3. Meningkatkan Kandungan Bahan Organik Tanah

Akar merupakan sumber utama karbon organik tanah melalui: Eksudat akar, Pergantian akar (root turnover), Jaringan akar yang mati dan terdekomposisi. Karbon yang berasal dari akar cenderung lebih stabil dibandingkan residu tanaman di permukaan karena lebih mudah terintegrasi ke dalam agregat tanah.

Akumulasi karbon organik berkontribusi terhadap: Stabilitas agregat. Kapasitas tukar kation (KTK), Retensi air tanah. Aktivitas mikroorganisme tanah (Sokol et al., 2025).

4. Meningkatkan Aktivitas Mikroorganisme Tanah

Eksudat akar menjadi sumber energi utama bagi mikroorganisme rizosfer. Mikroba tanah menghasilkan berbagai senyawa yang mendukung pembentukan struktur tanah, seperti: Eksopolisakarida (EPS), Glomalin dari fungi mikoriza arbuskular, Biofilm mikroba. Glomalin diketahui berperan penting dalam meningkatkan stabilitas agregat tanah dan mengurangi erosi (Lehmann et al., 2024).

5. Mengurangi Erosi Tanah

- a. Erosi Air; Jaringan akar membantu: mengurangi aliran permukaan (runoff). Meningkatkan infiltrasi air. Dengan demikian, kehilangan tanah akibat erosi air dapat dikurangi secara signifikan.
- b. Erosi Angin ; Pada lahan kering, akar membantu mempertahankan kohesi tanah sehingga partikel tanah tidak mudah terangkut oleh angin.
Vegetasi dengan sistem perakaran rapat sangat efektif dalam mengendalikan erosi pada lahan miring maupun daerah semi-arid (Li et al., 2024).

6. Peran dalam Reklamasi dan Restorasi Lahan Terdegradasi

Sistem perakaran memainkan peran penting dalam rehabilitasi lahan yang mengalami: erosi berat, pemadatan tanah, penurunan bahan organik, kerusakan akibat pertambangan.

Tanaman pionir dengan sistem akar yang kuat mampu: memperbaiki struktur tanah, menambah bahan organik, meningkatkan aktivitas biologis tanah dan memulihkan fungsi ekosistem tanah secara bertahap (Mao et al., 2025).

BAB 8

IKLIM DAN CUACA DALAM SISTEM AGROEKOLOGI

8.1 Komponen Iklim dan Pengaruhnya terhadap Pertanian

Dalam paradigma agroekologi, sistem pertanian dipandang sebagai suatu ekosistem terintegrasi di mana komponen biotik dan abiotik saling berinteraksi secara simultan. Iklim dan cuaca merupakan komponen abiotik utama yang bertindak sebagai faktor pembatas sekaligus pendorong produktivitas biologis (Gliessman, 2014). Perbedaan mendasar antara keduanya terletak pada skala ruang dan waktu; iklim merepresentasikan rata-rata kondisi atmosfer dalam jangka panjang (biasanya minimal 30 tahun) pada cakupan wilayah yang luas, sedangkan cuaca mencerminkan fluktuasi atmosfer harian berskala lokal. Pola iklim global dan regional secara inheren menentukan zonasi komoditas serta desain struktural dari suatu agroekosistem (Altieri *et al.*, 2015).

Perubahan iklim global yang ditandai oleh peningkatan frekuensi cuaca ekstrem memicu disrupsi signifikan pada kalender tanam tradisional dan memicu lonjakan populasi organisme pengganggu tanaman (OPT). Agroekologi merespons tantangan ini melalui pendekatan ketahanan berbasis ekosistem (*ecosystem-based resilience*). Melalui diversifikasi spasial dan temporal, seperti tumpang sari (*intercropping*) dan sistem agroforestri, petani dapat memodifikasi iklim mikro di sekitar tajuk tanaman. Modifikasi ini terbukti mampu mereduksi fluktuasi suhu ekstrem dan mempertahankan kelembapan udara, sehingga memitigasi risiko gagal panen total akibat ketidakpastian cuaca (Lin, 2011).

8.2 Radiasi Matahari, Suhu Udara, dan Panjang Hari

Radiasi matahari merupakan sumber energi primer bagi seluruh proses bio-fisik di dalam agroekosistem. Energi foton dari radiasi matahari diserap oleh klorofil tanaman untuk menggerakkan reaksi fotokimia pada proses fotosintesis. Selain kuantitas (intensitas), kualitas spektrum cahaya dan durasi penyinaran (panjang hari atau fotoperiodisitas) juga memegang peranan krusial dalam pertumbuhan vegetatif dan reproduktif tanaman (Gliessman, 2014). Kebutuhan energi radiasi neto dapat diekspresikan melalui persamaan keseimbangan energi sederhana:

$$R_n = H + G + \lambda E + P$$

di mana R_n adalah radiasi neto, H adalah fluks panas sensibel ke atmosfer, G adalah fluks panas

tanah, λE adalah fluks panas laten evapotranspirasi, dan P adalah energi yang digunakan untuk fotosintesis tumbuhan.

Radiasi matahari yang mencapai permukaan bumi fungsional sebagai energi kinetik sekaligus stimulus informasi bagi tanaman. Di dalam sistem agroekologi tropis, radiasi matahari dipahami berdasarkan tiga karakteristik utama:

1. Kualitas Radiasi (Spektrum Elektromagnetik): Tanaman tidak menyerap seluruh spektrum cahaya matahari. Proses fotosintesis secara spesifik memanfaatkan spektrum cahaya tampak (*visible light*) pada Panjang gelombang 400-700 nanometer (nm), yang diklasifikasi sebagai Radiasi Aktif Fotosintesis (*Photosynthetically Active Radiation* – PAR, spektrum biru (400-500 nm) berperan penting dalam regulasi pembukaan stomata dan pertumbuhan vegetatif, sedangkan spektrum merah (600-700 nm) sangat efektif dalam memacu sintesis klorofil dan induksi pembungaan.
2. Kuantitas Radiasi (Intensitas Cahaya): Intensitas radiasi menentukan kerapatan fluks foton yang mengenai tajuk tanaman per satuan luas dan waktu. Setiap jenis tanaman memiliki kapasitas adaptasi yang berbeda terhadap intensitas cahaya, yang membaginya menjadi dua kelompok ekologis:

- Tanaman Heliolit (C3/C4): Membutuhkan intensitas cahaya tinggi (misalnya padi, jagung, dan tebu)
 - Tanaman Skiolit: Mampu tumbuh optimal pada kondisi ternaungi (misalnya kopi, kakao, dan beberapa jenis tanaman obat).
3. Efisiensi Penggunaan Cahaya (*Light Use Efficiency* – LUE): Dalam agroekologi, minimalisasi energi terbuang dilakukan dengan arsitektur tajuk. Jika intensitas berada di bawah titik kompetensi cahaya, laju fotosintesis sama dengan laju respirasi, sehingga pertumbuhan terhenti. Sebaliknya, jika melebihi titik jenuh cahaya, dapat terjadi kerusakan apparatus fotosintetik akibat cekaman fotooksidatif.

Suhu udara, yang diturunkan dari retensi panas radiasi matahari oleh bumi dan atmosfer, mengontrol laju metabolisme, respirasi, dan transpirasi tanaman. Setiap spesies tanaman memiliki batas suhu kardinal (minimum, optimum, dan maksimum) yang spesifik untuk setiap fase perkembangannya. Suhu udara merupakan perwujudan termal dari radiasi matahari yang diserap oleh bumi dan atmosferkan kembali melalui proses konveksi dan konduksi. Suhu mengendalikan energi aktivasi yang diperlukan dalam seluruh reaksi biokimia tumbuhan.

- Efek Termal terhadap Fotosintesis dan Respirasi:

Proses fisiologis tanaman diatur oleh hukum kinetika kimia yang sensitif terhadap perubahan suhu. Pada batas suhu optimum, enzim penambat karbon seperti RuBisCO (pada tanaman C3) dan PEP karboksilase (pada tanaman C4) bekerja secara efisien. Namun, ketika suhu udara meningkat melampaui ambang batas maksimum, laju respirasi dan fotorespirasi akan melonjak secara eksponensial. Akibatnya, tanaman mengonsumsi karbohidrat lebih cepat daripada menyintesisnya, menurunkan akumulasi biomassa kering (*net primary productivity*).

- Suhu Kardinal dan Fase Fenologi:

Setiap komoditas memiliki tiga titik suhu kritis (Suhu Kardinal): minimum, optimum, dan maksimum. Sebagai contoh, padi tropis membutuhkan suhu optimum berkisar antara 25°C hingga 30°C. Paparan suhu ekstrem di atas

35°C pada fase anthesis (pembungaan) dapat mengakibatkan polen kering dan mandul, yang berujung pada peningkatan persentase gabah hampa.

Panjang hari atau fotoperiode menjadi stimulus hormonal bagi tanaman kelompok short-day, long-day, atau day-neutral untuk memulai fase pembungaan (Nicholls dan Altieri, 2018). Dalam sistem pertanian monokultur, keterbatasan intersepsi cahaya sering kali menurunkan efisiensi konversi energi. Sebaliknya, agroekologi mengoptimalkan arsitektur kanopi berlapis dalam sistem agroforestri guna memaksimalkan indeks luas daun (ILD) kumulatif, sehingga efisiensi pemanfaatan radiasi matahari (*radiation use efficiency*) meningkat secara signifikan.

- **Klasifikasi Respons Fotoperiode:**

Meskipun fluktuasi panjang hari di wilayah tropis relatif kecil dibandingkan wilayah subtropis (berkisar antara pm 30–60 menit sepanjang tahun), variasi minor ini tetap menjadi sinyal lingkungan yang direspons kuat oleh tanaman lokal. Tanaman pertanian dikelompokkan menjadi:

- **Tanaman Hari Pendek (*Short-day Plants*):** Berbunga jika panjang hari lebih pendek dari ambang batas kritis (misalnya beberapa varietas kedelai dan ubi jalar).
- **Tanaman Hari Panjang (*Long-day Plants*):** Berbunga jika panjang hari melebihi ambang batas kritis (umumnya tanaman introduksi dari wilayah temperata).
- **Tanaman Hari Netral (*Day-neutral Plants*):** Proses pembungaannya tidak dipengaruhi oleh durasi panjang hari, melainkan oleh umur fisiologis tanaman (misalnya tomat dan jagung).

- **Sinkronisasi dengan Manajemen Agroekologi:**

Pengetahuan tentang fotoperiode dikombinasikan dengan data suhu udara digunakan petani untuk menyusun strategi introduksi varietas, memperkirakan waktu panen yang serempak, serta memanipulasi lingkungan mikro melalui sistem tumpangsari (*intercropping*) guna menciptakan gradien cahaya yang adaptif.

8.3 Curah Hujan, Kelembaban, dan Siklus Hidrologi Pertanian

Curah hujan merupakan pemasok utama air dalam siklus hidrologi pertanian yang menentukan tingkat cekaman hidrologis suatu wilayah. Ketersediaan air tanah sangat bergantung pada distribusi, intensitas, dan frekuensi curah hujan, yang kemudian berinteraksi dengan kapasitas retensi air oleh matriks tanah. Di wilayah tropis monsun, curah hujan merupakan komponen iklim yang memiliki tingkat variabilitas spasial dan temporal paling tinggi. Karakteristik curah hujan tidak hanya dinilai dari volume total tahunan, melainkan dari pola distribusinya.

- Pola Distribusi dan Kalender Tanam:

Wilayah tropis umumnya terbagi menjadi pola monsun (memiliki perbedaan tegas antara musim hujan dan kemarau) dan pola ekuatorial (curah hujan tinggi sepanjang tahun dengan dua puncak). Ketepatan prediksi tibanya awal musim hujan menjadi penentu utama dalam penyusunan kalender tanam, terutama pada agroekosistem lahan kering (tadah hujan) untuk menghindari cekaman kekeringan pada fase awal vegetatif.

- Anomali Curah Hujan:

1. *Defisit Air (Kekeringan)*: Ketika curah hujan berada di bawah ambang batas kebutuhan evapotranspirasi tanaman, potensi air tanah menurun. Kondisi ini menurunkan turgor sel, memicu penutupan stomata, menekan laju fotosintesis, dan dalam kondisi ekstrem menyebabkan layu permanen hingga kematian jaringan (necrosis).
2. *Surplus Air (Genangan/Banjir)*: Curah hujan dengan intensitas tinggi yang melebihi kapasitas infiltrasi tanah akan memicu limpasan permukaan (*surface runoff*) dan genangan. Kondisi jenuh air ini menciptakan lingkungan perakaran yang anaerob (anoksia). Akibatnya, respirasi akar terhenti, penyerapan hara aktif terhambat, dan tanaman mengalami klorosis mendadak.

Kelembaban udara relatif (RH) mendikte gradien tekanan uap air antara rongga stomata daun dan atmosfer sekitarnya, sehingga mengontrol laju transpirasi tanaman secara langsung (Gliessman, 2014).

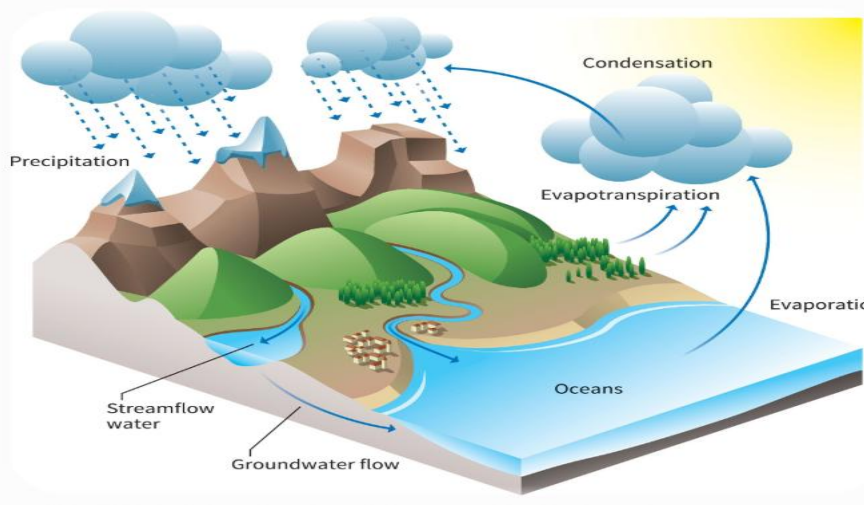
- Modulasi Transpirasi dan Penyerapan Hara:

1. RH Rendah (Udara Kering): Nilai VPD yang tinggi memacu laju transpirasi secara akseleratif. Jika pasokan air tanah memadai, hal ini mempercepat aliran massa (mass flow) unsur hara dari tanah ke akar. Namun, jika pasokan air tanah terbatas, transpirasi yang berlebihan akan memaksa stomata menutup untuk mencegah dehidrasi.
2. RH Tinggi (Udara Lembap): Wilayah tropis sering kali mengalami RH konstan di atas 85%. Kondisi ini menurunkan nilai VPD secara drastis, sehingga laju transpirasi melambat. Penurunan transpirasi ini berdampak negatif pada translokasi unsur hara imobil, seperti Kalsium (Ca) dan Boron (B), yang dapat memicu fenomena fisiologis seperti tip burn pada sayuran.

- Mikroklimat dan Epidemiologi OPT:

Kelembapan udara yang tinggi di bawah tajuk tanaman (*canopy microclimate*) dikombinasikan dengan suhu yang hangat merupakan inkubator mekanis yang sangat ideal bagi perkecambahan spora fungi (seperti *Phytophthora* spp.) dan multiplikasi bakteri patogen.

Siklus hidrologi pertanian adalah visualisasi pergerakan, perubahan wujud, dan sirkulasi air yang terjadi secara spesifik di dalam batas-batas agroekosistem. Siklus ini mengintegrasikan komponen atmosfer, tanaman, dan solum tanah.



Gambar 8.1: Ilustrasi Siklus Hidrologi Pertanian

Sumber: Penulis, 2026

Komponen fungsional dalam siklus hidrologi pertanian meliputi:

1. **Presipitasi (P):** Sumber masukan air utama ke dalam sistem.
2. **Intersepsi:** Air hujan yang tertahan oleh tajuk tanaman sebelum mencapai permukaan tanah. Dalam agroekologi, penutupan tajuk multistrata (misalnya pada sistem agroforestri) membantu memecah energi kinetik air hujan, sehingga mengurangi risiko erosi percikan (*splash erosion*).
3. **Infiltrasi dan Perkolasi:** Proses meresapnya air ke dalam pori-pori tanah (infiltrasi) dan pergerakannya ke lapisan tanah yang lebih dalam (perkolasi) menjadi air tanah tersedia. Pengelolaan bahan organik dalam agroekologi secara signifikan meningkatkan kapasitas menahan air (*water holding capacity*) tanah.
4. **Evapotranspirasi (ET):** Gabungan dari **Evaporasi** (penguapan langsung dari permukaan tanah) dan **Transpirasi** (penguapan air melalui stomata tanaman). Agroekologi berfokus pada minimalisasi porsi evaporasi yang sia-sia dan mengoptimalkan transpirasi produktif, salah satunya melalui aplikasi mulsa organik atau penanaman tanaman penutup tanah (*cover crops*).

8.4 Angin dan Perannya dalam Evapotranspirasi dan Distribusi Serbuk Sari

Angin berperan sebagai vektor transportasi massa dan energi di dalam atmosfer agroekosistem. Secara fisis, pergerakan angin memengaruhi ketebalan lapisan batas (*boundary layer*) di permukaan daun tanaman. Angin dengan kecepatan konstan berskala rendah hingga sedang mempercepat laju evapotranspirasi dengan cara memindahkan udara jenuh air di sekitar daun dan menggantinya dengan udara kering, menjaga kelangsungan gradien tekanan uap air (Nicholls dan Altieri, 2018). Namun, angin berkecepatan ekstrem dapat memicu penutupan stomata secara mekanis atau bahkan menyebabkan kerusakan struktural (patah batang dan rebah).

Dari perspektif reproduksi biologis, angin merupakan agen penyerbukan (*anemofili*) utama bagi berbagai komoditas pangan penting, seperti jagung (*Zea mays*) dan padi (*Oryza sativa*). Keberhasilan distribusi serbuk sari sangat tergantung pada dinamika turbulensi udara mikro di dalam pertanaman.

Untuk mengelola dampak negatif mekanis angin dan mencegah kekeringan mikroiklim, desain agroekologi mengintegrasikan sabuk hijau atau vegetasi penahan angin (*windbreaks*). Struktur penahan angin yang heterogen dan berlapis dari tanaman berkayu tidak hanya memitigasi kekuatan mekanis angin, melainkan juga berfungsi sebagai koridor ekologis dan habitat bagi predator alami pengendali hama (Altieri *et al.*, 2015).

Peran Angin dalam Proses Evapotranspirasi

Evapotranspirasi (ET) merupakan parameter gabungan dari penguapan air melalui permukaan tanah (evaporasi) dan pori stomata tanaman (transpirasi). Angin memainkan peran krusial sebagai penggerak transpor konvektif uap air dalam proses ini melalui mekanisme berikut:

1. Pengikisan Lapisan Batas Udara (*Boundary Layer Resistance*):

Di sekitar permukaan daun, terdapat lapisan udara tipis yang cenderung jenuh oleh uap air hasil transpirasi. Lapisan ini bertindak sebagai hambatan (*resistance*) bagi penguapan lebih lanjut. Ketika angin bertiup dengan kecepatan rendah hingga sedang, angin akan menyapu atau mengikis lapisan udara jenuh tersebut (*aerodynamic boundary layer*) dan

menggantinya dengan massa udara baru yang lebih kering. Fenomena ini menurunkan tekanan uap udara di sekitar daun, meningkatkan defisit tekanan uap (*Vapor Pressure Deficit* - VPD), dan memacu laju transpirasi serta evaporasi tanah secara signifikan.

2. Cekaman Dehidrasi Akibat Angin Ekstrem:

Jika kecepatan angin terlalu tinggi, laju transpirasi dapat melampaui kapasitas absorpsi air oleh perakaran. Sebagai mekanisme pertahanan diri, tanaman akan mengalami plasmolisis temporer yang memicu penutupan stomata secara darurat (*wind-induced stomatal closure*). Kondisi ini menghentikan asimilasi CO₂ dan menurunkan efisiensi fotosintesis.

Peran Angin dalam Distribusi Serbuk Sari (Anemofili)

Selain mengendalikan fluks uap air, angin merupakan agen penyerbukan abiotik yang vital bagi kelangsungan reproduksi generatif berbagai komoditas pertanian strategis, khususnya kelompok serealia (seperti padi, jagung, dan gandum) serta tanaman kehutanan. Proses penyerbukan yang diperantarai oleh angin dikenal secara ilmiah sebagai Anemofili.

1. Mekanisme Aerodinamika Polen:

Tanaman anemofili memiliki adaptasi morfologis yang unik. Serbuk sari yang dihasilkan umumnya bermassa ringan, berpermukaan halus, dan tidak lengket, sehingga sangat mudah terlepas dari anter (kepala sari). Di sisi lain, organ stigma (kepala putik) tanaman anemofili biasanya berbentuk menjari, berbulu (*plumose*), atau menjulur keluar dari struktur bunga untuk memaksimalkan area tangkapan polen yang melayang di udara.

2. Pengaruh Kecepatan Angin terhadap Keberhasilan Fertilisasi:

- Kecepatan Optimum (1–3 m/s): Membantu pelepasan polen dari saku sari dan menerbangkannya dalam jarak horizontal yang ideal untuk mencapai putik tanaman tetangga (penyerbukan silang). Sirkulasi angin yang lembut ini juga memastikan kerapatan awan polen (*pollen cloud*) berada pada tingkat yang cukup untuk membuahi populasi tanaman di lahan.

- Kecepatan Rendah (Tenang/Calm): Menyebabkan polen langsung jatuh secara vertikal ke tanah atau hanya memicu penyerbukan sendiri (*self-pollination*), yang dalam jangka panjang menurunkan variabilitas genetik tanaman.
- Kecepatan Ekstrem (>5 m/s): Menyebabkan polen tersebar terlalu jauh dan mengalami pengenceran densitas di udara, atau mengalami kerusakan viabilitas akibat dehidrasi instan, sehingga menurunkan peluang polen hinggap di stigma yang tepat. Hal ini sering menjadi penyebab tingginya persentase gabah hampa atau tongkol jagung yang tidak terisi penuh.

8.5 Klasifikasi Iklim Pertanian dan Zonasi Agroklimat Indonesia

Klasifikasi iklim global secara umum (seperti sistem Koppen atau Thornthwaite) sering kali terlalu makro dan kurang sensitif jika diaplikasikan langsung dalam perencanaan komoditas pertanian. Oleh karena itu, dalam ruang lingkup agroekologi Indonesia, dikembangkan sistem klasifikasi iklim khusus yang berbasis pada kebutuhan air tanaman dan ketersediaan air tanah. Pemetaan ini dikenal sebagai **Zonasi Agroklimat**, yang menjadi instrumen krusial dalam memprediksi pola tanam, memilih varietas yang adaptif, dan meminimalkan risiko gagal panen akibat anomali cuaca.

Di Indonesia, terdapat dua sistem klasifikasi agroklimat utama yang paling luas digunakan sebagai standar ilmiah dan praktis: **Sistem Mohr** dan **Sistem Oldeman**.

Zonasi wilayah pertanian memerlukan pemahaman komprehensif mengenai klasifikasi iklim pertanian yang disesuaikan dengan karakteristik fisiologis tanaman semusim. Di Indonesia, sistem klasifikasi iklim pertanian yang paling luas diadopsi adalah Klasifikasi Oldeman (1975). Berbeda dengan sistem klasifikasi iklim Schmidt-Ferguson yang berorientasi pada tanaman perkebunan tahunan menggunakan rasio bulan kering dan bulan basah, sistem Oldeman secara spesifik menggunakan parameter kebutuhan air tanaman pangan (terutama padi dan palawija) berbasis curah hujan bulanan berturut-turut.

Sistem Oldeman mendefinisikan kriteria bulan berdasarkan ambang batas hidrologis penanaman:

- **Bulan Basah (BB):** Bulan dengan curah hujan > 200 mm, yang diasumsikan cukup untuk melakukan budidaya padi sawah tanpa irigasi teknis tambahan.
- **Bulan Kering (BK):** Bulan dengan curah hujan < 100 mm, di mana ketersediaan air berada di bawah laju evapotranspirasi rata-rata, sehingga lahan hanya cocok untuk fase bera atau tanaman palawija berskala terbatas.
- **Bulan Lembab (BL):** Bulan dengan curah hujan antara 100–200 mm.

Berdasarkan jumlah Bulan Basah (BB) berturut-turut, Oldeman membagi zona agroklimat utama menjadi 5 kategori (A hingga E), yang kemudian diturunkan menjadi sub-zona berdasarkan jumlah Bulan Kering (BK) berturut-turut:

Zona Utama	Jumlah Bulan Basah (Berurutan)	Implikasi Agroekologis & Pola Tanam Rekomendasi
A	> 9 bulan	Sesuai untuk penanaman padi sepanjang tahun secara kontinu. Diperlukan manajemen drainase yang baik untuk mencegah kondisi anaerobik tanah berlebih dan perkembangan penyakit jamur.
B	7 - 9 bulan	Sangat potensial untuk pola tanam Padi-Padi-Palawija. Perlu perencanaan cermat pada penanaman padi kedua agar tidak kekurangan air di akhir fase generatif.

C	5 - 6 months	Umumnya direkomendasikan pola tanam Padi-Palawija-Palawija. Air menjadi faktor pembatas utama pada paruh kedua tahun penanaman.
D	3 - 4 bulan	Hanya memungkinkan untuk satu kali penanaman padi berumur genjah (sering kali padi gogo). Sisa tahun didominasi palawija atau sistem bera guna memulihkan air tanah.
E	< 3 bulan	Kawasan kering. Pertanian sangat bertumpu pada irigasi buatan atau fokus pada peternakan dan penanaman tanaman lokal yang sangat toleran kekeringan (sorgum, millet).

Sistem Klasifikasi Agroklimat Mohr

Sistem Mohr merupakan perintis klasifikasi iklim pertanian di Indonesia yang didasarkan pada hubungan antara curah hujan bulanan dan tingkat evaporasi. Mohr berasumsi bahwa di wilayah tropis, laju evaporasi rata-rata dari permukaan tanah dan evaporasi dari tajuk tanaman berkisar antara 60 mm hingga 100 mm per bulan. Berdasarkan asumsi tersebut, Mohr menetapkan tiga kriteria bulan batasan:

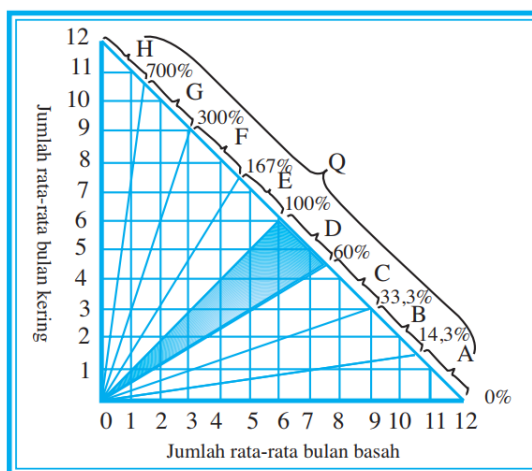
1. Bulan Basah (BB): Bulan dengan curah hujan > 100 mm (curah hujan melebihi laju evaporasi).
2. Bulan Lembap (BL): Bulan dengan curah hujan antara 60 mm – 100 mm (curah hujan relatif seimbang dengan laju evaporasi).
3. Bulan Kering (BK): Bulan dengan curah hujan < 60 mm (laju evaporasi melebihi curah hujan, sehingga terjadi defisit air tanah).

Sistem Mohr membagi iklim menjadi 5 golongan (Zone I sampai Zone V) berdasarkan jumlah Bulan Kering (BK) berturut-turut dalam satu tahun.

Kelemahan sistem ini adalah kurang spesifik dalam mengaitkan periode basah berturut-turut dengan kebutuhan fase pertumbuhan tanaman semusim seperti padi.

Klasifikasi Mohr ini sangat berguna dalam pedologi (ilmu tanah) untuk memprediksi Tingkat pelapukan batuan dan pembentukan tanah di Indonesia. Namun, Kelemahannya terletak pada penggunaan nilai rata-rata makro, yang terkadang mengaburkan kondisi kemarau ekstrem yang terjadi pada tahun-tahun tertentu. Kelemahan ini disempurnakan oleh Schmidt dan Ferguson menggunakan rumus nilai Q. Nilai Q kuosien penentu tipe iklim (%).

$$\text{Rumus Q} = \text{Bulan Kering} / \text{Bulan Basah} \times 100\%$$



Gambar 8.2: Nilai Q Bulan Kering dan Bulan Basah

Tipe Iklim	Nilai Q	Keterangan
A	$0 < Q < 0,143$	Sangat basah
B	$0,143 < Q < 0,333$	Basah
C	$0,333 < Q < 0,600$	Agak basah
D	$0,600 < Q < 1,000$	Sedang
E	$1,000 < Q < 1,670$	Agak kering
F	$1,670 < Q < 3,000$	Kering
G	$3,000 < Q < 7,000$	Sangat kering
H	$7,000 < Q$	Luar biasa kering

Gambar 8.3: Tipe Iklim dan Nilai Q

Sistem Klasifikasi Junghuhn

Selain faktor curah hujan, Indonesia yang memiliki topografi bergunung-gunung sangat dipengaruhi oleh faktor ketinggian tempat (elevasi). Sistem Junghuhn mengklasifikasikan iklim berdasarkan ketinggian di atas permukaan laut (dpl) yang berkorelasi langsung dengan penurunan suhu udara (gradien termal vertikal).

Junghuhn membagi wilayah pertanian menjadi 4 zona vertikal:

1. Zona Panas (0 - 600 m dpl): Suhu rata-rata 26,3 °C – 22 °C. Komoditas adaptif: padi, jagung, tebu, kelapa, dan karet.
2. Zona Sedang (600 - 1500 mdpl): Suhu rata-rata 22 °C - 17,1 °C. Komoditas adaptif: kopi, teh, kina, kakao, dan sayuran tropis.
3. Zona Sejuk (1500 - 2500 mdpl): Suhu rata-rata 17,1 °C - 11,1 °C. Komoditas adaptif: sayuran subtropis (kentang, kubis), hortikultura bunga, dan hutan wisata.
4. Zona Dingin > 2500 mdpl): Suhu rata-rata < 11,1 °C C. Tidak ada tanaman budidaya pertanian yang bernilai ekonomis tinggi; didominasi oleh lumut dan vegetasi alpin.

Pemetaan wilayah berdasarkan agroklimat ini memandu implementasi kebijakan pertanian berkelanjutan di Indonesia, memastikan keselarasan antara tuntutan fisiologis tanaman dengan daya dukung iklim wilayah setempat demi meminimalkan degradasi ekologis eksternal.

BAB 9

PERUBAHAN IKLIM DAN DAMPAKNYA TERHADAP SISTEM PERTANIAN

Perubahan iklim merupakan salahsatu tantangan lingkungan global paling kompleks yang dihadapi oleh umat manusia pada abad ke-21. Fenomena ini tidak hanya berkaitan dengan peningkatan suhu rata-rata bumi, tetapi juga mencakup perubahan pola hujan, peningkatan frekuensi kejadian cuaca ekstrem, serta perubahan dinamika ekosistem secara luas. Dalam konteks ekologi, perubahan iklim dapat dipahami sebagai gangguan terhadap keseimbangan system alam (ekosistem), termasuk interaksi antara komponen biotik dan abiotik yang selama ini menopang keberlangsungan kehidupan.

Sektor pertanian merupakan salah satu yang paling rentan terhadap perubahan iklim. Hal ini karena sektor ini sangat bergantung pada berbagai komponen lingkungan seperti suhu, air, tanah, dan keanekaragaman hayati. Pertanian tidak berdiri sendiri, melainkan bagian dari agroekosistem, yaitu sebuah sistem yang melibatkan hubungan antara manusia, tanaman, hewan, tanah, air, dan organisme lain dalam suatu lingkungan tertentu. Ketika terjadi perubahan iklim, maka seluruh komponen dalam agroekosistem tersebut akan mengalami tekanan dan perubahan fungsi(Organization, 2016)

Perubahan suhu global yang meningkat serta ketidakpastian pola musim telah mengganggu proses fisiologis tanaman, siklus hidrologi, serta keseimbangan Organisme Penganggu Tanaman (OPT). dampak ini tidak hanya bersifat langsung seperti menurunnya hasil panen, tetapi secara tidak langsung mendegeradasi tanah, berkurangnya air, serta meningkatnya serangan hama dan penyakit. Bukan hanya itu saja, perubahan iklim juga mempengaruhi kesesuaian lahan pertanian dan dapat menyebabkan pergeseran wilayah produksi pangan(Ritchie, 2024)

Lebih jauh lagi dalam skala global, perubahan iklim telah terbukti menurunkan produktivitas pertanian dan mengancam ketahanan pangan.

Beberapa laporan menunjukkan bahwa tanpa upaya adaptasi yang memadai, produktivitas tanaman pangan utama seperti jagung dan gandum berpotensi mengalami penurunan produktivitas signifikan akibat kombinasi stres panas, kekeringan, dan perubahan curah hujan (Zhao et al., 2017). Bahkan, dalam beberapa dekade terakhir, perubahan iklim telah memperlambat pertumbuhan produktivitas pertanian global (Bobe et al., 2021).

Dalam perspektif ekologi lingkungan, dampak perubahan iklim terhadap pertanian tidak hanya dilihat dari aspek produksi, tetapi juga dari keberlanjutan sistem. Agroekosistem yang tidak resilien akan mengalami degradasi, seperti penurunan kesuburan tanah, hilangnya keanekaragaman hayati, dan meningkatnya ketergantungan terhadap input eksternal. Sebaliknya, sistem pertanian yang berbasis prinsip ekologi seperti pertanian berkelanjutan dan agroekologi, memiliki potensi besar dapat beradaptasi terhadap perubahan iklim melalui peningkatan keberagaman, efisiensi sumber daya dan stabilitas sistem.

Dengan demikian, memahami hubungan antara perubahan iklim dan sistem pertanian memerlukan pendekatan yang holistik dan ekologis. Tidak hanya menyoroti dampak, tetapi juga interaksi kompleks dalam agroekosistem serta strategi adaptasi dan mitigasi yang berbasis lingkungan. Bab ini akan mengkaji fenomena perubahan iklim, dampaknya terhadap produksi pertanian, perubahan musim tanam, kejadian ekstrem, serta berbagai strategi adaptasi dan mitigasi dalam kerangka keberlanjutan ekologi.

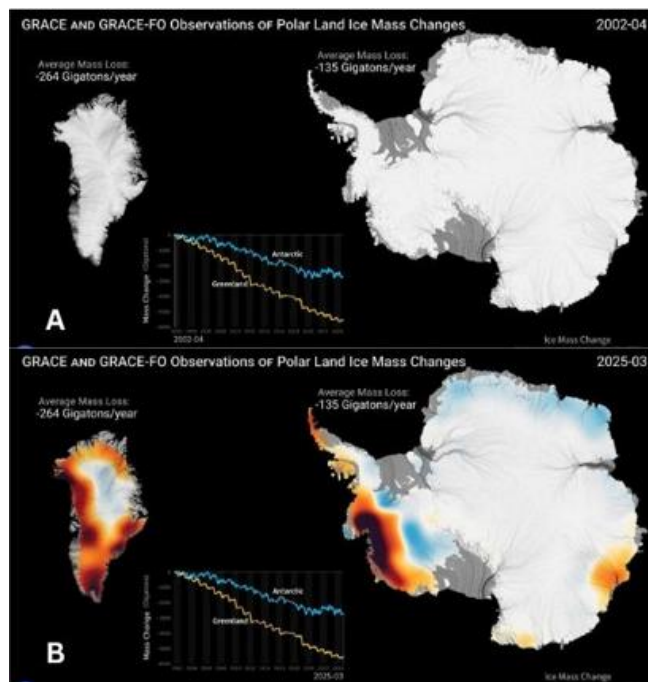
9.1 Fenomena Perubahan Iklim Global: Bukti dan Proyeksi

Perubahan iklim global merupakan fenomena yang tidak lagi bersifat prediktif semata, melainkan telah dibuktikan secara ilmiah. Laporan *Intergovernmental Panel on Climate Change* bahwa saat ini bumi terus mengalami peningkatan suhu. Fenomena ini dipicu oleh akumulasi gas rumah kaca dari aktivitas manusia, termasuk pembakaran bahan bakar fosil, deforestasi serta alih fungsi lahan (IPCC, 2023).

9.1.1 Bukti Empiris Perubahan Iklim

Salah satu indikator utama perubahan iklim adalah meningkatnya suhu rata-rata global. Data hasil observasi *Intergovernmental Panel on Climate Change* menunjukkan bahwa suhu bumi telah meningkat sekitar $1,1^{\circ}\text{C}$ dibandingkan dengan periode pra-industri (1850-1900) (IPCC, 2023). Peningkatan ini tidak hanya berdampak pada atmosfer, tetapi juga mempengaruhi sistem laut dan daratan. Laut mengalami pemanasan yang signifikan. Selain itu, laut juga mengalami pengasaman akibat penyerapan karbon dioksida (NOAA, 2025).

Selain itu, pencairan es di wilayah kutub menjadi bukti nyata perubahan iklim. Lapisan es di Greenland dan Antartika mengalami kehilangan massa secara terus menerus. Hal ini berkontribusi terhadap naiknya permukaan air laut global. Kenaikan permukaan air laut tercatat setinggi 20 cm sejak awal abad ke-20 dan terus mengalami percepatan dalam beberapa dekade terakhir (IPCC, 2023).



Gambar 9.1: Citra Satelit GRACE (a) 2002, (b) 2025
(NASA, 2025)

Gambar yang diambil oleh satelit *Gravity Recovery and Climate Experiment* (GRACE) menunjukkan perubahan massa lapisan es kutub pada tahun 2002 dan 2025. Antara tahun 2002 hingga 2025, Antartika melepaskan 135 gigaton es pertahun yang berdampak pada naiknya permukaan air laut global setinggi 0,4 mm/ tahun. Sedangkan Greenland melepaskan 264 gigaton es pertahun yang menyebabkan kenaikan permukaan air laut setinggi 0,8 mm/ tahun(NASA, 2025).

Fenomena perubahan iklim juga dapat diamati secara nyata di wilayah tropis, termasuk Indonesia melalui mencairnya es abadi di Papua. Gletser yang terdapat di kawasan Pegunungan Jayawijaya, khususnya di sekitar Puncak jaya, mengalami penyusutan luas yang sangat signifikan dalam beberapa dekade terakhir(Permana *et al.*, 2019).



Gambar 9.2: Gletser Pegunungan Jayawijaya 2010-2018

(Permana *et al.*, 2019)

Menyusutnya gletser tropis di Pegunungan Jayawijaya adalah bukti empiris terjadinya pemanasan global. Luas area gletser di Puncak jaya mengalami penurunan dari kurang lebih 19 km² pada tahun 1850, berkurang hingga tersisa 0,458 km² pada tahun 2018. Meskipun El Nino membantu menjadi faktor penyebab, namun faktor penyebab utama menurunnya luas gletser tropis diakibatkan pemanasan atmosfer oleh aktivitas manusia(Permana *et al.*, 2019)

Tidak hanya itu, perubahan pada pola curah hujan juga menunjukkan anomali di seluruh belahan dunia. Beberapa wilayah mengalami peningkatan intensitas curah hujan yang menyebabkan banjir, sementara wilayah lainnya mengalami penurunan curah hujan yang berujung pada kekeringan. Dalam perspektif ekologi, perubahan ini mengganggu siklus hidrologi yang merupakan komponen kunci dalam menjaga stabilitas ekosistem darat maupun perairan (Konapala *et al.*, 2020). Frekuensi dan intensitas kejadian cuaca ekstrem juga meningkat, termasuk fenomena gelombang panas dan badai tropis. Fenomena ini menunjukkan bahwa perubahan iklim tidak hanya menggeser rata-rata kondisi iklim, tetapi juga meningkatkan variabilitas dan ketidakpastian sistem iklim (Diffenbaugh *et al.*, 2017).

9.1.2 Proyeksi Perubahan Iklim di Masa Depan

Proyeksi perubahan iklim di masa depan menunjukkan kecenderungan yang semakin mengkhawatirkan dan bersifat sistemik terhadap seluruh komponen bumi. Laporan dari *Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)* menunjukkan bahwa masa depan bumi sangat bergantung pada tindakan yang dilakukan manusia saat ini. Jika emisi gas rumah kaca dapat dikendalikan, kenaikan suhu global masih dapat dijaga antara 1,4°C hingga 1,8°C. Namun jika ketergantungan terhadap bahan bakar fosil terus berlanjut tanpa terkendali, kenaikan suhu bumi berpotensi meningkat hingga 3,3°C sampai 5,7°C pada akhir abad ke-21 (IPCC, 2021). Jika dilihat sekilas, perbedaan ini tampak seperti variasi angka, namun bagi sebuah sistem alam, perubahan tersebut berarti perubahan yang sangat besar.

Kenaikan suhu tersebut tidak berdiri sendiri. Perubahan tersebut akan memicu perubahan besar dalam sistem iklim global. Intensifikasi siklus hidrologi akan menyebabkan distribusi curah hujan semakin tidak merata. Wilayah basah cenderung mengalami peningkatan curah hujan dan resiko banjir, sementara wilayah kering menghadapi ancaman kekeringan yang lebih panjang dan intens (Konapala *et al.*, 2020). Hal ini memiliki implikasi serius terhadap keberlanjutan ekosistem termasuk pada bidang pertanian yang sangat bergantung pada keseimbangan air.

Sedangkan dalam perspektif ekologi, perubahan ini mengindikasikan terganggunya stabilitas ekosistem global. Perubahan pada distribusi curah

hujan akan mengganggu distribusi spesies seiring perubahan kondisi habitat. Sementara itu siklus fenologi seperti waktu berbunga, berbuah, dan panen akan mengalami ketidakteraturan. Dampak yang lebih parah adalah melemahnya fungsi jasa ekosistem yang menopang kehidupan manusia, termasuk dalam sistem pertanian. Bahkan erubahan suhu sedikitpun dapat menggeser pola tanam, menurunkan produktivitas, serta meningkatkan risiko ledakan hama dan penyakit akibat dinamika lingkungan yang tidak stabil.

Temuan dari *National Aeronautics and Space Administration* memperlihatkan bahwa kondisi suhu bumi tidak hanya menunjukkan kenaikan, namun peningkatan suhu yang mengalami percepatan (akselerasi). Dalam laporan tersebut, laju kenaikan suhu permukaan bumi sejak 1850 tercatat sebesar 0,06°C per dekade. Namun menunjukkan lonjakan tajam sejak tahun 1982 menjadi 0,20 per dekade (NOAA, 2023). Artinya, waktu untuk bertindak semakin terbatas. Oleh karena itu, masa depan pertanian dan lingkungan tidak hanya ditentukan oleh seberapa besar kita mampu mengurangi emisi, tetapi juga oleh kemampuan kita beradaptasi secara cerdas dan selaras dengan prinsip-prinsip ekologi. Dengan kata lain, perubahan iklim bukanlah sekedar isu global, melainkan penentu langsung kehidupan manusia di masa depan. Sehingga, upaya mitigasi dan adaptasi menjadi kunci dalam menentukan apakah perubahan tersebut dapat dikendalikan atau justru berkembang menjadi krisis global yang sulit diadaptasi.

9.1.3 Implikasi Ekologis terhadap Sistem Pertanian

Perubahan iklim tidak hanya memengaruhi kondisi cuaca dan produktivitas tanaman, tetapi juga menimbulkan dampak yang lebih luas terhadap struktur dan fungsi ekosistem pertanian. Dalam perspektif ekologi, pertanian merupakan bagian dari agroekosistem yang tersusun atas interaksi kompleks antara tanah, air, udara, tumbuhan, hewan, mikroorganisme, dan aktivitas manusia. Ketika terjadi perubahan suhu, curah hujan, serta peningkatan frekuensi kejadian iklim ekstrem, maka keseimbangan interaksi antar komponen tersebut ikut terganggu. Akibatnya, sistem pertanian menjadi lebih rentan terhadap gangguan lingkungan dan kehilangan sebagian kemampuannya dalam mempertahankan produktivitas secara berkelanjutan (Khudori, 2011).

Salahsatu implikasi ekologis yang paling nyata adalah terganggunya fungsi jasa ekosistem (*ecosystem service*) yang menopang produksi pertanian. Jasa ekosistem dalam bidang pertanian mencakup berbagai proses alami seperti terbentuknya tanah, siklus hara, penyerbukan, pengendalian hama secara alami, penyediaan air, dan pengaturan iklim mikro (Power, 2010), (DLHK Denpasar, 2023). Fungsi-fungsi tersebut selama ini bekerja secara alami dan menjadi fondasi keberhasilan sistem pertanian. Namun, perubahan iklim dapat menurunkan efektivitas berbagai jasa ekosistem tersebut sehingga produktifitas pertanian amat bergantung pada input eksternal seperti pupuk, pestisida, dan irigasi buatan (Bommarco, Vico and Hallin, 2018).

Perubahan iklim juga berdampak terhadap keanekaragaman hayati yang berperan menjaga stabilitas agroekosistem. Banyak organisme penyerbuk, musuh alami hama pertanian, serta mikroorganisme tanah yang sangat sensitif terhadap perubahan suhu dan kelembapan. Ketika habitat dan kondisi lingkungan berubah, populasi organisme tersebut dapat menurun atau berpindah ke wilayah lain. Padahal, sebagian produksi pangan dunia bergantung pada jasa penyerbukan oleh hewan. Penurunan populasi penyerbuk berpotensi mengurangi hasil dan kualitas produksi komoditas pertanian.

Selain mempengaruhi organisme yang menguntungkan, perubahan iklim juga dapat mengubah dinamika populasi hama dan penyakit tanaman. Suhu yang lebih hangat memungkinkan beberapa spesies hama berkembang biak lebih cepat dan memperluas wilayah penyebarannya ke daerah yang sebelumnya tidak sesuai. Di sisi lain, perubahan pola hujan dapat menciptakan kondisi yang mendukung perkembangan patogen tertentu. Akibatnya resiko ledakan hama dan penyakit menjadi lebih tinggi, sementara efektivitas pengendalian alami oleh musuh alami sering kali menurun karena faktor terganggunya keseimbangan ekologis (Singh *et al.*, 2023). Kondisi ini dapat meningkatkan kerugian hasil panen sekaligus mendorong penggunaan pestisida yang lebih intensif.

Tanah sebagai komponen utama agroekosistem juga mengalami tekanan yang semakin besar akibat perubahan iklim. Kenaikan suhu dan perubahan pola curah hujan dapat mempercepat dekomposisi bahan organik tanah, meningkatkan resiko erosi, serta menurunkan pasasitas tanah dalam

menyimpan air. Dalam jangka panjang, kondisi tersebut dapat menyebabkan penurunan kesuburan tanah dan berkurangnya aktivitas organisme tanah yang berperan dalam siklus unsur hara. Padahal, biodiversitas tanah merupakan salah satu faktor utama yang menjaga produktivitas dan ketahanan ekosistem pertanian terhadap berbagai gangguan lingkungan.

Implikasi ekologis lainnya adalah terjadinya perubahan distribusi geografis berbagai tanaman dan organisme pendukung pertanian. Wilayah yang sebelumnya sesuai untuk komoditas tertentu, dapat menjadi kurang produktif akibat peningkatan suhu atau berkurangnya ketersediaan air. Sebaliknya, daerah lain mungkin menjadi lebih sesuai untuk budidaya komoditas tertentu. Pergeseran ini berpotensi mengubah pola penggunaan lahan, memunculkan wilayah pertanian baru, dan meningkatkan tekanan terhadap kawasan alami yang sebelumnya dimanfaatkan untuk sektor budidaya.

Dalam konteks keberlanjutan lingkungan, perubahan iklim menunjukkan bahwa produktivitas pertanian tidak dapat dipisahkan dari kesehatan ekosistem. Agroekosistem yang memiliki keanekaragaman hayati tinggi, kondisi tanah yang baik, serta pengelolaan sumber daya yang berkelanjutan umumnya lebih mampu beradaptasi terhadap tekanan iklim dibandingkan sistem pertanian yang bersifat monokultur dan sangat bergantung pada input eksternal. Oleh karena itu, pendekatan berbasis ekologi menjadi semakin penting untuk meningkatkan ketahanan sistem pertanian sekaligus menjaga fungsi lingkungan dalam jangka panjang.

9.2 Dampak Perubahan Iklim Terhadap Produksi Pertanian

Pertanian merupakan salah satu sektor yang paling bergantung pada kondisi lingkungan. Berbeda dengan sektor industri yang sebagian besar dapat dikendalikan melalui teknologi, keberhasilan sektor pertanian sangat dipengaruhi oleh faktor-faktor alam seperti suhu udara, curah hujan, kelembapan, dan ketersediaan air. Oleh karena itu, ketika iklim mengalami perubahan, sektor pertanian menjadi salah satu yang pertama mendapatkan dampaknya. Perubahan iklim yang ditandai dengan meningkatnya suhu global, perubahan pola hujan, dan semakin seringnya cuaca ekstrem telah

menciptakan tantangan baru bagi sistem produksi pertanian di berbagai negara, termasuk Indonesia.

Salah satu dampak yang paling mudah diamati adalah menurunnya produktivitas tanaman akibat peningkatan suhu udara. Setiap tanaman memiliki kisaran suhu optimum untuk tumbuh dan berkembang. Ketika suhu melewati batas toleransi tersebut, berbagai proses fisiologis tanaman akan terganggu. Laju fotosintesis dapat menurun, kebutuhan air meningkat, dan masa pertumbuhan menjadi lebih pendek. Akibatnya tanaman tidak mampu menghasilkan biomassa maupun hasil panen secara optimal. Pada tanaman pangan seperti padi dan jagung, suhu yang terlalu tinggi pada fase pembungaan bahkan dapat menyebabkan penurunan jumlah dan kualitas biji yang dihasilkan. (Ortiz-Bobea *et al.*, 2021).

Di Indonesia, perubahan iklim telah memberikan dampak nyata terhadap produksi pertanian terutama pada komoditas yang amat tergantung pada kondisi iklim. Tulisan yang dipublikasikan oleh Ruminta, Handoko, dan Nurmala pada tahun 2018 dengan judul “Indikasi perubahan iklim dan dampaknya terhadap produksi padi di Indonesia (Kasus Sumatera Selatan dan Malang Raya)” menunjukkan terjadinya pengaruh yang signifikan akibat adanya perubahan iklim terhadap produksi pertanian. Temuan tersebut disajikan pada tabel berikut ini:

Tabel 9.1: Dampak Perubahan Iklim terhadap Produksi Padi di Indonesia
(Ruminta, Handoko and Nurmala, 2018)

Indikator	Sumatra Selatan	Malang raya
Peningkatan suhu udara	0,4-0,6°C	0,7-0,8°C
Perubahan curah hujan	Menurun 0-197mm/tahun	Menurun 0-550mm/tahun
Perubahan Iklim yang teramati	Pergeseran pola hujan, perubahan klasifikasi	Pergeseran pola hujan, perubahan klasifikasi

	Oldeman, perubahan hitergaf	Oldeman, perubahan hitergaf
Dampak terhadap pertanian	Berkurangnya ketersediaan air dan meningkatnya resiko penurunan produktivitas padi	Berkurangnya ketersediaan air dan meningkatnya resiko penurunan produktivitas padi
Penurunan produktivitas padi lahan sawah	0,59%/ tahun	0,59% / tahun
Penurunan produktivitas padi lahan kering	1,59%/ tahun	1,59% / tahun

Dari sudut pandang ekologi, dampak perubahan iklim tidak hanya dirasakan oleh tanaman budidaya, tetapi juga seluruh komponen agroekosistem. Kenaikan suhu dan perubahan kelembapan dapat memengaruhi kehidupan berbagai organisme yang ada di lahan pertanian. Beberapa jenis hama akan berkembang lebih cepat dan menghasilkan lebih banyak keturunan dalam waktu yang lebih singkat. Selain itu, perubahan iklim juga dapat memperluas wilayah penyebaran hama dan penyakit tanaman ke daerah yang sebelumnya tidak terdampak. Akibatnya, resiko serangan organisme pengganggu tanaman (OPT) menjadi semakin tinggi dan dapat mengurangi hasil produksi pertanian.

9.3 Kenaikan Suhu dan Pergeseran Musim Tanam

Kenaikan suhu merupakan salah satu indikator paling nyata dari perubahan iklim yang sedang terjadi saat ini. Dalam beberapa dekade terakhir, suhu rata-rata permukaan bumi terus mengalami peningkatan akibat bertambahnya konsentrasi gas rumah kaca di atmosfer. Kenaikan suhu tersebut tidak hanya memengaruhi kondisi lingkungan secara umum, tetapi juga memberikan dampak langsung terhadap aktivitas pertanian. Bagi sektor pertanian, suhu merupakan faktor penting yang mengendalikan berbagai proses biologis tanaman, mulai dari perkecambahan, pertumbuhan vegetatif, pembungaan,

hingga pembentukan dan pematangan hasil panen. Oleh karena itu, perubahan suhu yang terjadi secara terus-menerus dapat memengaruhi produktivitas dan keberlanjutan sistem pertanian

Setiap tanaman memiliki kisaran suhu optimum yang berbeda-beda untuk tumbuh dan berkembang. Ketika suhu lingkungan berada pada kisaran yang sesuai, tanaman dapat menjalankan proses fisiologis secara optimal. Namun, jika suhu meningkat melebihi batas toleransi tanaman, berbagai gangguan dapat terjadi. Pada tanaman pangan seperti padi, jagung, dan kedelai, suhu yang terlalu tinggi dapat meningkatkan laju respirasi sehingga energi yang seharusnya digunakan untuk pertumbuhan dan pembentukan hasil menjadi berkurang. Selain itu, suhu tinggi juga dapat meningkatkan laju penguapan air dari tanah dan transpirasi tanaman, yang pada akhirnya meningkatkan kebutuhan air selama masa pertumbuhan

Kenaikan suhu juga dapat menyebabkan perubahan pada siklus hidup tanaman. Dalam kondisi yang lebih panas, tanaman cenderung mengalami percepatan pertumbuhan sehingga masa tanam menjadi lebih pendek. Sekilas kondisi ini tampak menguntungkan karena tanaman dapat dipanen lebih cepat. Namun, pada kenyataannya percepatan siklus hidup sering kali menyebabkan berkurangnya waktu untuk pembentukan biomassa dan pengisian biji. Akibatnya, hasil panen yang diperoleh menjadi lebih rendah dibandingkan ketika tanaman tumbuh pada kondisi suhu yang lebih ideal. Informasi literatur menunjukkan bahwa peningkatan suhu global telah berkontribusi terhadap penurunan produktivitas beberapa tanaman pangan utama di berbagai wilayah dunia (Ortiz-Bobea et al., 2021).

Selain berdampak pada pertumbuhan tanaman, kenaikan suhu juga memengaruhi pola musim yang selama ini menjadi pedoman petani dalam menentukan waktu tanam. Di banyak wilayah, termasuk Indonesia, petani secara tradisional menyesuaikan praktik budidaya dengan datangnya musim hujan dan musim kemarau. Namun, perubahan iklim menyebabkan pola musim menjadi semakin sulit diprediksi. Musim hujan dapat datang lebih lambat, berlangsung lebih singkat, atau justru disertai curah hujan yang sangat tinggi dalam waktu singkat. Sebaliknya, musim kemarau dapat berlangsung lebih panjang dari biasanya. Perubahan tersebut menyebabkan kalender tanam yang selama ini digunakan petani menjadi kurang akurat.

Berikut adalah perbaikan paragraf Anda:

Pergeseran musim tanam telah menjadi fenomena yang banyak ditemukan di berbagai daerah pertanian Indonesia. Di beberapa wilayah, keterlambatan datangnya hujan memaksa petani menunda penanaman karena ketersediaan air belum mencukupi. Penundaan ini dapat memengaruhi seluruh rangkaian budidaya dan berpotensi menurunkan jumlah musim tanam dalam satu tahun. Pada lahan sawah yang mengandalkan curah hujan, perubahan waktu tanam bahkan dapat meningkatkan risiko gagal panen apabila tanaman memasuki fase kritis pada saat terjadi kekeringan atau hujan ekstrem. Dengan kata lain, perubahan iklim telah mengurangi kepastian yang selama ini menjadi dasar dalam pengelolaan usaha tani.

Salah satu contoh nyata terjadi selama fenomena El Niño tahun 2023 di Indonesia. Kemarau yang berlangsung lebih panjang menyebabkan banyak daerah mengalami kekurangan air irigasi. Di sejumlah sentra produksi padi di Pulau Jawa, petani harus menunda masa tanam hingga beberapa minggu bahkan beberapa bulan karena curah hujan yang belum mencukupi. Kondisi ini berdampak pada berkurangnya luas tanam dan menurunnya produksi padi di beberapa wilayah. Peristiwa tersebut menunjukkan bahwa perubahan suhu global yang memengaruhi sistem iklim dapat memberikan dampak langsung terhadap pengelolaan pertanian di tingkat loka

9.4 Kejadian Ekstrem: Kekeringan, Banjir, dan Dampaknya pada Agroekosistem

Salah satu dampak paling nyata dari perubahan iklim adalah meningkatnya frekuensi dan intensitas kejadian cuaca ekstrem, terutama kekeringan dan banjir (BMKG, 2026). Kedua fenomena ini menjadi ancaman serius bagi sektor pertanian karena dapat terjadi secara tiba-tiba dan menyebabkan kerugian dalam waktu singkat. Perubahan pola curah hujan yang semakin tidak menentu membuat beberapa wilayah mengalami kekurangan air dalam waktu yang lama, sementara wilayah lainnya justru menerima curah hujan berlebihan yang memicu banjir. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa perubahan iklim tidak hanya mengubah rata-rata kondisi cuaca, tetapi juga meningkatkan risiko terjadinya gangguan yang dapat mengancam keberlanjutan sistem pertanian.

Kekeringan merupakan salah satu bencana yang paling sering memengaruhi sektor pertanian. Ketika curah hujan menurun dalam periode yang panjang, ketersediaan air untuk tanaman menjadi terbatas sehingga pertumbuhan dan perkembangan tanaman terganggu. Tanaman yang mengalami kekurangan air akan mengalami penurunan fotosintesis, pertumbuhan yang terhambat, hingga gagal menghasilkan panen secara optimal. Selain itu, kekeringan juga dapat menurunkan kelembapan tanah, mengurangi aktivitas mikroorganisme tanah, dan mempercepat degradasi lahan. Menurut FAO pada tahun 2015, sektor pertanian merupakan sektor yang paling terdampak oleh kekeringan dan menyerap sekitar 80% dari kerugian langsung yang ditimbulkan oleh bencana kekeringan di banyak negara berkembang.

Di sisi lain, banjir juga memberikan tekanan yang besar terhadap agroekosistem. Curah hujan yang sangat tinggi dalam waktu singkat dapat menyebabkan genangan pada lahan pertanian, merusak perakaran tanaman, serta menghambat penyerapan unsur hara. Banjir juga berpotensi meningkatkan erosi tanah dan membawa lapisan tanah atas yang kaya bahan organik ke tempat lain. Dalam jangka panjang, kondisi ini dapat menurunkan kesuburan tanah dan mengganggu keseimbangan ekologi lahan pertanian. Selain itu, lingkungan yang terlalu lembap sering kali menjadi kondisi yang ideal bagi perkembangan berbagai penyakit tanaman sehingga risiko kehilangan hasil panen semakin meningkat.

Dari perspektif ekologi, kekeringan dan banjir tidak hanya berdampak pada tanaman budidaya, tetapi juga memengaruhi seluruh komponen agroekosistem. Organisme tanah, serangga penyerbuk, musuh alami hama, serta berbagai mikroorganisme yang berperan dalam siklus hara dapat mengalami gangguan akibat perubahan kondisi lingkungan yang ekstrem. Ketika kejadian ekstrem terjadi berulang, kemampuan agroekosistem untuk pulih (*resilience*) akan semakin menurun. Oleh karena itu, pengelolaan pertanian di era perubahan iklim tidak hanya berfokus pada peningkatan produksi, tetapi juga pada upaya membangun agroekosistem yang lebih tangguh melalui konservasi tanah dan air, diversifikasi tanaman, serta penerapan praktik pertanian berkelanjutan.

9.5 Strategi Adaptasi dan Mitigasi Pertanian terhadap Perubahan Iklim

Perubahan iklim telah mengubah cara manusia memandang dan mengelola pertanian. Pola musim yang semakin sulit diprediksi, meningkatnya suhu udara, serta semakin seringnya kejadian kekeringan dan banjir membuat petani harus beradaptasi dengan kondisi lingkungan yang terus berubah. Jika sebelumnya petani dapat mengandalkan pengalaman turun-temurun dalam menentukan waktu tanam, kini informasi iklim dan pengelolaan sumber daya yang lebih baik menjadi semakin penting. Oleh karena itu, upaya menghadapi perubahan iklim di sektor pertanian umumnya dilakukan melalui dua pendekatan utama, yaitu adaptasi dan mitigasi.

Adaptasi bertujuan membantu sistem pertanian tetap mampu berproduksi meskipun kondisi iklim berubah. Sementara itu, mitigasi bertujuan mengurangi emisi gas rumah kaca yang menjadi penyebab utama perubahan iklim. Kedua pendekatan ini saling melengkapi. Adaptasi membantu petani menghadapi dampak yang sudah terjadi, sedangkan mitigasi membantu mengurangi risiko perubahan iklim yang lebih parah di masa depan.

9.5.1 Strategi Adaptasi Pertanian terhadap Perubahan Iklim

Adaptasi merupakan upaya untuk menyesuaikan sistem pertanian terhadap kondisi iklim yang terus berubah. Tujuannya adalah mengurangi risiko kerugian dan mempertahankan produktivitas pertanian. Beberapa Strategi adaptasi yang dapat dilakukan antara lain (FAO, 2017):

1. Penyesuaian Kalender Tanam

Perubahan pola hujan menyebabkan waktu tanam tradisional tidak selalu sesuai dengan kondisi saat ini. Oleh karena itu, petani perlu memanfaatkan informasi iklim dan prakiraan musim untuk menentukan waktu tanam yang lebih tepat.

2. Penggunaan Varietas tahan Cekaman Iklim

Varietas yang tahan kekeringan, genangan, atau suhu tinggi dapat membantu tanaman tetap berproduksi meskipun menghadapi kondisi lingkungan yang kurang menguntungkan.

3. Pengelolaan air yang lebih efisien

Pembangunan embung, pemanenan air hujan, irigasi tetes, serta perbaikan jaringan irigasi dapat meningkatkan ketersediaan air pada saat musim kemarau.

4. Diversifikasi tanaman

Menanam lebih dari satu jenis tanaman dapat mengurangi risiko kegagalan panen akibat perubahan cuaca yang ekstrem.

5. Penerapan Agroforestri

Kombinasi tanaman pertanian dengan pohon berkayu dapat membantu menjaga kelembapan tanah, mengurangi erosi, serta menciptakan iklim mikro yang lebih stabil bagi tanaman

9.5.2 Strategi Mitigasi Pertanian terhadap Perubahan Iklim

Jika adaptasi bertujuan mengurangi dampak perubahan iklim, maka mitigasi berfokus pada pengurangan penyebab perubahan iklim itu sendiri. Dalam sektor pertanian, mitigasi dilakukan dengan menekan emisi gas rumah kaca dan meningkatkan kemampuan lahan dalam menyerap karbon. Beberapa strategi yang dapat diterapkan meliputi (FAO, 2017):

1. Penggunaan Pupuk secara Efisien

Pemupukan yang tepat dosis dan tepat waktu dapat mengurangi emisi gas dinitrogen oksida (N_2O), salah satu gas rumah kaca yang memiliki daya pemanasan sangat tinggi.

2. Pemanfaatan Pupuk Organik

Penggunaan kompos, pupuk kandang, dan bahan organik lainnya dapat meningkatkan kandungan karbon tanah sekaligus memperbaiki kualitas tanah.

3. Pengurangan pembakaran lahan dan sisa tanaman

Pembakaran lahan menghasilkan emisi karbon dalam jumlah besar dan dapat mempercepat degradasi lingkungan.

4. Konservasi Tanah dan Air

Praktik seperti penggunaan mulsa, tanaman penutup tanah, dan olah tanah minimum dapat membantu meningkatkan penyimpanan karbon di dalam tanah.

BAB 10

SIKLUS AIR DALAM AGROEKOSISTEM

Air menjadi salah satu faktor utama yang menentukan keberlangsungan fungsi agroekosistem karena berperan dalam proses fisiologis tanaman, distribusi unsur hara, aktivitas biologi tanah, serta kestabilan kondisi lingkungan. Perjalanan air dalam sistem pertanian terjadi melalui berbagai tahapan seperti masuknya air melalui hujan, pergerakan air dalam tanah, pelepasan air melalui tanaman, hingga pengembalian air ke atmosfer. Rangkaian proses tersebut membentuk keseimbangan hidrologi yang memengaruhi produktivitas lahan (Vereecken *et al.*, 2022).

Kondisi ketersediaan air pada lahan pertanian dipengaruhi oleh hubungan antara faktor tanah, vegetasi, iklim, dan pengelolaan manusia. Sifat tanah seperti kemampuan menyerap air, ruang pori, serta kandungan bahan organik menentukan jumlah air yang dapat dipertahankan dan dimanfaatkan oleh tanaman. Apabila pengelolaan air tidak dilakukan secara optimal, dapat terjadi gangguan seperti peningkatan limpasan, degradasi tanah, maupun berkurangnya efisiensi penggunaan air (Anderson, Kumar and Blanco, 2023).

Tantangan perubahan iklim mendorong perlunya strategi pengelolaan air yang lebih adaptif dalam agroekosistem. Penerapan prinsip agroekologi, termasuk peningkatan kualitas tanah, pemanfaatan vegetasi sebagai pelindung lahan, dan penggunaan irigasi yang efisien, menjadi pendekatan penting untuk mempertahankan keseimbangan air serta mendukung keberlanjutan pertanian (Kourgialas, Anastopoulos and Stefanakis, 2024).

10.1 Siklus Hidrologi dan Komponen Neraca Air

Air merupakan salah satu komponen utama dalam agroekosistem yang berperan dalam menjaga proses fisiologis tanaman, aktivitas mikroorganisme tanah, serta keseimbangan ekosistem pertanian. Ketersediaan air dalam lahan pertanian tidak bersifat tetap, tetapi mengalami perubahan secara terus-menerus melalui berbagai proses hidrologi seperti presipitasi, infiltrasi,

penyimpanan air tanah, dan evapotranspirasi. Hubungan antara proses tersebut membentuk sistem hidrologi yang menentukan kemampuan tanah dalam menyediakan air bagi tanaman (Vereecken *et al.*, 2022).

Siklus hidrologi merupakan proses pergerakan air secara kontinu antara atmosfer, permukaan bumi, dan lapisan tanah. Pergerakan air dipengaruhi oleh energi matahari, gaya gravitasi, kondisi iklim, serta karakteristik lingkungan seperti vegetasi dan sifat fisik tanah. Pada agroekosistem, siklus air mengalami modifikasi akibat aktivitas manusia, seperti pengolahan tanah, penggunaan irigasi, dan perubahan tutupan vegetasi yang dapat memengaruhi distribusi serta penyimpanan air (Heinen *et al.*, 2024).

Tahapan awal dalam siklus hidrologi pertanian dimulai dari presipitasi berupa hujan yang menjadi sumber utama air bagi tanaman. Air hujan yang mencapai permukaan lahan akan mengalami beberapa kemungkinan, yaitu tertahan oleh tajuk tanaman, masuk ke dalam tanah melalui infiltrasi, bergerak sebagai aliran permukaan, atau kembali ke atmosfer melalui evaporasi. Besarnya air yang masuk dan tersimpan di dalam tanah sangat dipengaruhi oleh struktur tanah serta kondisi vegetasi di atasnya (Vereecken *et al.*, 2022).

Evaporasi merupakan proses perubahan air menjadi uap akibat energi panas dari lingkungan. Dalam lahan pertanian, evaporasi terjadi terutama pada permukaan tanah dan dipengaruhi oleh suhu udara, radiasi matahari, kelembapan, serta kecepatan angin. Selain evaporasi, tanaman juga kehilangan air melalui proses transpirasi yang berlangsung melalui stomata daun. Kombinasi kedua proses tersebut dikenal sebagai evapotranspirasi dan menjadi komponen utama dalam menentukan kebutuhan air tanaman (Qiu *et al.*, 2024).

Air yang masuk ke dalam tanah melalui infiltrasi akan mengisi ruang pori tanah dan menjadi sumber kelembapan bagi zona perakaran. Kemampuan tanah dalam menyerap dan menyimpan air dipengaruhi oleh tekstur, struktur agregat, porositas, serta kandungan bahan organik. Tanah dengan kondisi fisik yang baik mampu meningkatkan penyimpanan air dan mendukung ketersediaan air tanaman, sedangkan tanah yang mengalami degradasi cenderung meningkatkan kehilangan air melalui limpasan permukaan (Vereecken *et al.*, 2022).

Apabila jumlah air yang masuk melebihi kapasitas infiltrasi tanah, sebagian air akan bergerak di permukaan sebagai runoff. Aliran permukaan yang tinggi dapat menyebabkan erosi dan membawa partikel tanah serta unsur hara keluar dari sistem pertanian. Sebaliknya, air yang berhasil masuk ke lapisan tanah lebih dalam dapat mengalami perkolasi dan berperan dalam pengisian cadangan air tanah (Heinen *et al.*, 2024).

Dalam pengelolaan agroekosistem, pemahaman mengenai siklus air diperlukan untuk menjaga keseimbangan antara kebutuhan tanaman dan ketersediaan sumber daya air. Pengelolaan tanah, penggunaan mulsa, peningkatan bahan organik, dan penerapan sistem irigasi yang efisien merupakan strategi yang dapat meningkatkan efisiensi penggunaan air serta mengurangi kehilangan air dari sistem pertanian (Heinen *et al.*, 2024).

Komponen Neraca Air

Neraca air adalah pendekatan untuk menggambarkan keseimbangan antara input, output, dan simpanan air dalam sistem tanah–tanaman. Konsep ini digunakan untuk menilai ketersediaan air dan mendukung pengelolaan irigasi yang efisien (Heinen *et al.*, 2024).

Secara umum, neraca air dapat dituliskan sebagai keseimbangan antara curah hujan dan irigasi (input), evapotranspirasi, limpasan, dan perkolasi (output), serta perubahan simpanan air tanah. Ketidakseimbangan komponen ini menentukan kondisi surplus atau defisit air dalam lahan pertanian (Qiu *et al.*, 2024; Ahmad *et al.*, 2024).

Persamaan sederhana neraca air dapat dituliskan sebagai:

$$P + I = ET + R + D + \Delta S$$

Keterangan:

P = presipitasi (curah hujan)

I = irigasi

ET = evapotranspirasi

R = runoff/aliran permukaan

D = drainase atau perkolasi

ΔS = perubahan simpanan air tanah

Dengan memahami neraca air, pengelolaan irigasi dapat dilakukan secara lebih tepat karena jumlah air yang diberikan dapat disesuaikan dengan kebutuhan tanaman dan kondisi lingkungan (Heinen *et al.*, 2024).

Tabel 10.1: Komponen Utama Neraca Air dalam Agroekosistem

Komponen	Kategori	Fungsi dalam Agroekosistem
Curah hujan	Input	Sumber air utama
Irigasi	Input	Tambahan air
Evapotranspirasi	Output	Kehilangan air ke atmosfer
Limpasan	Output	Aliran permukaan
Perkolasi	Output	Gerakan ke bawah tanah
Infiltrasi	Proses	Masuknya air ke tanah
Air tanah	Simpanan	Cadangan air tanaman

Pemahaman siklus hidrologi dan neraca air memberikan dasar penting dalam pengelolaan agroekosistem untuk meningkatkan efisiensi air, produktivitas tanaman, dan ketahanan terhadap variabilitas iklim (Qiu *et al.*, 2024; Heinen *et al.*, 2024; Ahmad *et al.*, 2024).

10.2 Infiltrasi, Perkolasi, dan Aliran Permukaan di Lahan Pertanian

Infiltrasi, perkolasi, dan aliran permukaan merupakan rangkaian proses hidrologi yang menentukan arah pergerakan air setelah mencapai permukaan tanah. Air hujan yang masuk ke dalam agroekosistem tidak seluruhnya tersedia bagi tanaman karena sebagian dapat hilang melalui limpasan permukaan atau bergerak menuju lapisan tanah yang lebih dalam. Proporsi air yang masuk, tersimpan, dan keluar dari sistem sangat dipengaruhi oleh kondisi tanah, vegetasi, serta metode pengelolaan lahan (Zhang, He and Song, 2023).

Infiltrasi merupakan proses masuknya air ke dalam tanah melalui ruang pori yang dipengaruhi oleh gravitasi dan kapilaritas. Kapasitas infiltrasi dipengaruhi oleh sifat fisik tanah seperti tekstur, struktur agregat, porositas, kepadatan, dan bahan organik. Pengelolaan tanah yang tepat dapat meningkatkan infiltrasi, sedangkan pemadatan akibat pengolahan berlebihan dapat menghambat pergerakan air. Selain itu, vegetasi berperan melalui sistem perakaran dan residu tanaman yang membantu menjaga struktur tanah serta meningkatkan kemampuan tanah menyerap air (Rahma *et al.*, 2023; Li *et al.*, 2024; Guo *et al.*, 2024).

Perkolasi merupakan proses perpindahan air dari lapisan tanah atas menuju lapisan yang lebih dalam setelah infiltrasi akibat gaya gravitasi. Proses ini berperan dalam distribusi air pada profil tanah dan pengisian cadangan air tanah. Dalam agroekosistem, perkolasi memengaruhi ketersediaan air bagi tanaman, di mana pergerakan air yang terlalu cepat dapat menyebabkan kehilangan air melalui *deep drainage*, sedangkan pergerakan yang lambat dapat menyebabkan kelebihan air. Kecepatan perkolasi dipengaruhi oleh karakteristik tanah seperti ukuran pori, permeabilitas, dan tingkat kejenuhan air sehingga pengelolaan struktur tanah diperlukan untuk menjaga keseimbangan air (Vereecken *et al.*, 2022).

Aliran permukaan (*runoff*) terjadi ketika intensitas hujan melebihi kemampuan tanah dalam menyerap air, terutama saat pori tanah mendekati jenuh atau kapasitas infiltrasi menurun. Proses ini menjadi jalur kehilangan air yang dapat membawa sedimen dan unsur hara, serta meningkatkan risiko erosi yang menurunkan kualitas tanah. Besarnya runoff dipengaruhi oleh curah hujan, penggunaan lahan, dan tutupan vegetasi, di mana pengelolaan konservasi seperti tanaman penutup tanah, pemeliharaan residu tanaman, dan pengurangan gangguan struktur tanah dapat meningkatkan infiltrasi serta mengurangi aliran permukaan (Chen and Wu, 2024;) (Zhang, He and Song, 2023).

Tabel 10.2: Keterkaitan Infiltrasi, Perkolasi, dan Aliran Permukaan dalam Agroekosistem

Proses	Fungsi utama	Dampak jika tidak seimbang
Infiltrasi	Memasukkan air ke dalam tanah	Limpasan meningkat
Perkolasi	Mengalirkan air ke lapisan bawah	Kehilangan air atau genangan
Aliran permukaan	Mengalirkan air di permukaan	Erosi dan kehilangan air

Ketiga proses hidrologi tersebut saling berkaitan dalam menentukan neraca air lahan pertanian. Infiltrasi menentukan jumlah air yang berhasil masuk ke tanah, perkolasi mengatur distribusi air di dalam profil tanah, sedangkan aliran permukaan menggambarkan bagian air yang tidak dapat masuk ke dalam tanah. Perubahan pada salah satu proses akan memengaruhi ketersediaan air dan kondisi lingkungan pertanian (Zhang, He and Song, 2023)

Tanah dengan struktur yang baik dan tutupan vegetasi yang cukup umumnya memiliki infiltrasi lebih tinggi, sehingga mampu mengurangi limpasan dan meningkatkan penyimpanan air. Sebaliknya, tanah yang mengalami degradasi cenderung memiliki infiltrasi rendah sehingga meningkatkan risiko erosi dan kehilangan air dari sistem pertanian. Penerapan praktik konservasi seperti penggunaan tanaman penutup, peningkatan bahan organik, dan pengelolaan tanah yang berkelanjutan menjadi strategi penting dalam menjaga keseimbangan infiltrasi, perkolasi, dan aliran permukaan. Pendekatan tersebut membantu meningkatkan efisiensi penggunaan air sekaligus mempertahankan kualitas tanah dalam jangka panjang (Guo *et al.*, 2024).

10.3 Evapotranspirasi dan Kebutuhan Air Tanaman

Evapotranspirasi (ET) merupakan salah satu proses utama dalam siklus hidrologi agroekosistem yang menggambarkan perpindahan air dari permukaan tanah dan vegetasi menuju atmosfer. Proses ini terdiri atas evaporasi, yaitu perubahan air dari permukaan tanah menjadi uap, serta

transpirasi, yaitu pelepasan air melalui stomata tanaman. Dalam sistem pertanian, evapotranspirasi menjadi komponen penting karena menunjukkan hubungan antara kondisi atmosfer, karakteristik tanah, dan kemampuan tanaman dalam menggunakan air. Oleh karena itu, ET sering digunakan sebagai indikator utama dalam evaluasi keseimbangan air serta pengelolaan sumber daya air pertanian (Qiu *et al.*, 2024).

Besarnya evapotranspirasi dipengaruhi oleh kombinasi faktor iklim dan karakteristik tanaman. Variabel atmosfer seperti radiasi matahari, suhu udara, kelembapan, dan kecepatan angin menentukan energi yang tersedia untuk penguapan. Di sisi lain, faktor biologis seperti luas daun, perkembangan kanopi, dan aktivitas stomata mengontrol jumlah air yang dilepaskan melalui transpirasi. Perbedaan kondisi tersebut menyebabkan nilai ET dapat berubah secara spasial maupun temporal pada berbagai sistem budidaya pertanian (Qiu *et al.*, 2024).

Dalam perhitungan hidrologi pertanian, evapotranspirasi dibedakan menjadi evapotranspirasi potensial (ET_p) dan evapotranspirasi aktual (ET_a). ET_p menggambarkan jumlah maksimum air yang dapat hilang ke atmosfer apabila faktor air tidak menjadi pembatas, sedangkan ET_a menunjukkan kehilangan air yang benar benar terjadi berdasarkan kondisi lapangan. Perbedaan antara kedua parameter tersebut dapat digunakan untuk mengetahui tingkat keterbatasan air dan tekanan lingkungan terhadap tanaman (Qiu *et al.*, 2024).

Ketersediaan air tanah menjadi faktor utama yang menentukan besarnya ET aktual. Pada kondisi kelembapan tanah yang cukup, tanaman dapat mempertahankan proses penyerapan air oleh akar dan menjaga laju transpirasi. Namun, ketika terjadi defisit air, tanaman akan mengurangi kehilangan air melalui pengaturan stomata. Respons ini membantu mempertahankan status air tanaman, tetapi jika berlangsung lama dapat menyebabkan penurunan fotosintesis dan produktivitas tanaman (Qiu *et al.*, 2024).

Pengukuran evapotranspirasi menjadi bagian penting dalam pengelolaan irigasi karena memberikan informasi mengenai kebutuhan air tanaman. Pendekatan berbasis ET memungkinkan pemberian air dilakukan sesuai kondisi tanaman dan lingkungan, sehingga dapat mengurangi pemborosan air.

Integrasi data kelembapan tanah, kondisi atmosfer, dan karakteristik tanaman juga mendukung penerapan sistem irigasi yang lebih presisi (Heinen *et al.*, 2024).

Perkembangan teknologi pengamatan telah meningkatkan kemampuan dalam memperkirakan evapotranspirasi pada skala luas. Penginderaan jauh berbasis satelit banyak digunakan karena mampu menyediakan informasi mengenai kondisi vegetasi, suhu permukaan, dan keseimbangan energi. Data tersebut memungkinkan pemetaan ET secara spasial sehingga membantu evaluasi kebutuhan air tanaman pada wilayah pertanian yang luas (García-Santos, Sánchez and Cuxart, 2022).

Selain metode pengamatan, pemodelan tanah–tanaman–atmosfer berkembang sebagai pendekatan untuk memahami perpindahan air dalam agroekosistem. Model hidrologi mampu menggambarkan hubungan antara infiltrasi, penyimpanan air tanah, serapan akar, dan kehilangan air melalui evapotranspirasi. Pendekatan ini membantu memperkirakan kebutuhan air tanaman pada kondisi iklim dan jenis tanah yang berbeda (Heinen *et al.*, 2024).

Kebutuhan air tanaman berubah mengikuti tahap pertumbuhan. Pada fase awal, evapotranspirasi relatif rendah karena luas permukaan daun masih terbatas. Ketika tanaman memasuki fase vegetatif maksimum, peningkatan luas kanopi menyebabkan peningkatan transpirasi sehingga kebutuhan air meningkat. Setelah memasuki fase akhir pertumbuhan, perubahan aktivitas fisiologis tanaman dapat menyebabkan penurunan kebutuhan air. Pengelolaan lahan memiliki pengaruh terhadap keseimbangan evapotranspirasi. Tutupan vegetasi, sistem budidaya, serta kondisi permukaan tanah dapat menentukan proporsi air yang hilang melalui evaporasi dan transpirasi. Pengelolaan yang mampu mempertahankan kelembapan tanah dapat meningkatkan efisiensi penggunaan air dan mengurangi kehilangan air yang tidak memberikan manfaat langsung bagi tanaman (Qiu *et al.*, 2024).

Perubahan iklim juga memberikan pengaruh terhadap dinamika evapotranspirasi pada lahan pertanian. Peningkatan suhu dapat meningkatkan kebutuhan atmosfer terhadap air sehingga menyebabkan peningkatan kehilangan air melalui ET. Sementara itu, perubahan pola curah hujan dapat

menyebabkan ketidakseimbangan antara ketersediaan air dan kebutuhan tanaman sehingga meningkatkan risiko stres air pada musim tertentu (Zhang, He and Song, 2023).

Kebutuhan Air Tanaman

Kebutuhan air tanaman merupakan jumlah air yang diperlukan untuk mendukung proses fisiologis, pertumbuhan, dan pembentukan hasil tanaman. Konsep ini berkaitan erat dengan evapotranspirasi tanaman karena sebagian besar air yang diserap oleh akar akan kembali ke atmosfer melalui transpirasi. Oleh karena itu, estimasi ET menjadi dasar penting dalam menentukan kebutuhan irigasi (Heinen *et al.*, 2024).

Secara umum, kebutuhan air tanaman dapat diperkirakan melalui hubungan antara evapotranspirasi referensi dan karakteristik tanaman. Pendekatan ini memungkinkan penyesuaian pemberian air berdasarkan jenis tanaman, kondisi iklim, dan fase pertumbuhan. Dengan demikian, penggunaan air dapat dilakukan secara lebih efisien tanpa mengurangi produktivitas tanaman (García-Santos, Sánchez and Cuxart, 2022).

Rumus umum:

$$ET_c = ET_o \times K_c$$

di mana:

- ET_c = evapotranspirasi tanaman
- ET_o = evapotranspirasi referensi
- K_c = koefisien tanaman

Tabel 10.3: Evapotranspirasi dalam Agroekosistem

Komponen		Fungsi		Dampak	
Evaporasi	Kehilangan air tanah			Mengurangi kelembapan tanah	
Transpirasi	Pelepasan stomata	air	melalui	Mendukung fisiologi tanaman	

Komponen	Fungsi		Dampak
ETa	Kondisi aktual	kehilangan air	Indikator stres air
ETp	Kondisi maksimum	kebutuhan	Menentukan potensi kebutuhan air
ETc	Kebutuhan tanaman	spesifik	Dasar pengaturan irigasi

Pemahaman mengenai evapotranspirasi dan kebutuhan air tanaman menjadi dasar dalam pengelolaan air pertanian berkelanjutan. Integrasi antara informasi iklim, karakteristik tanah, dan respons fisiologis tanaman dapat meningkatkan efisiensi penggunaan air serta membantu agroekosistem beradaptasi terhadap perubahan lingkungan (Qiu *et al.*, 2024; Heinen *et al.*, 2024).

10.4 Pengelolaan Air Tanah dan Irigasi Berbasis Agroekologi

Pengelolaan air tanah dalam agroekosistem merupakan pendekatan untuk menjaga keseimbangan antara ketersediaan air, kebutuhan tanaman, dan keberlanjutan fungsi tanah. Air tanah berperan sebagai komponen penyimpan air yang penting karena mampu mempertahankan kelembapan zona perakaran ketika suplai air dari curah hujan mengalami penurunan. Dalam sistem pertanian berkelanjutan, pengelolaan air tidak hanya berfokus pada peningkatan hasil tanaman, tetapi juga mempertahankan fungsi ekologis tanah melalui peningkatan kapasitas penyimpanan dan efisiensi penggunaan air (H. Zhang *et al.*, 2023).

Kemampuan tanah dalam menyimpan air dipengaruhi oleh karakteristik fisik seperti tekstur, struktur agregat, porositas, dan kandungan bahan organik. Tanah dengan struktur yang lebih stabil memiliki ruang pori yang mendukung infiltrasi sekaligus mempertahankan air lebih lama pada zona akar. Sebaliknya, degradasi tanah akibat pemadatan dan kehilangan bahan organik dapat menurunkan kemampuan tanah menyimpan air sehingga meningkatkan risiko cekaman kekeringan pada tanaman (Lebeau *et al.*, 2023).

Dalam sistem agroekologi, peningkatan cadangan air tanah sangat berkaitan dengan kemampuan lahan meningkatkan infiltrasi dan mengurangi kehilangan air melalui limpasan. Praktik pengelolaan seperti penutup tanah dan konservasi residu tanaman dapat memperbaiki kondisi permukaan tanah sehingga air hujan memiliki waktu lebih lama untuk masuk ke dalam profil tanah. Kondisi tersebut mendukung peningkatan penyimpanan air dan menjaga ketersediaan air bagi tanaman pada periode kering (Lebeau *et al.*, 2023).

Irigasi merupakan salah satu strategi utama untuk mempertahankan produktivitas tanaman ketika curah hujan tidak mampu memenuhi kebutuhan evapotranspirasi. Namun, pemberian air yang tidak sesuai kebutuhan dapat menyebabkan pemborosan, kehilangan air melalui perkolasi, serta meningkatkan risiko gangguan kualitas tanah. Oleh karena itu, pengelolaan irigasi modern mulai diarahkan pada pendekatan berbasis data yang mempertimbangkan kondisi kelembapan tanah dan kebutuhan tanaman secara aktual (Gao *et al.*, 2024).

Perkembangan teknologi telah mendorong penerapan irigasi presisi dalam sistem pertanian. Sensor kelembapan tanah, data satelit, dan sistem pemantauan otomatis memungkinkan penentuan waktu serta jumlah air yang diberikan secara lebih tepat. Pendekatan ini membantu mengurangi penggunaan air berlebih sekaligus menjaga kondisi kelembapan optimal pada zona perakaran tanaman (Zappa *et al.*, 2024).

Sistem irigasi berbasis agroekologi tidak hanya bergantung pada teknologi, tetapi juga mengintegrasikan prinsip konservasi ekosistem. Penggunaan tanaman penutup tanah, mulsa, dan pengelolaan residu tanaman dapat mengurangi evaporasi permukaan serta meningkatkan jumlah air yang tersimpan dalam tanah. Strategi tersebut membantu mempertahankan kelembapan tanah sekaligus memperbaiki kesehatan tanah dalam jangka panjang (Moore, 2023).

Tanaman penutup tanah memiliki peran penting dalam mengatur dinamika air pada agroekosistem. Keberadaan vegetasi permukaan dapat meningkatkan perlindungan tanah terhadap pukulan air hujan, mengurangi limpasan, dan memperbaiki infiltrasi. Namun, pengelolaannya perlu disesuaikan karena

beberapa jenis tanaman penutup juga dapat meningkatkan penggunaan air melalui transpirasi sebelum tanaman utama tumbuh (Selzer and Schubert, 2023).

Keseimbangan air dalam sistem pertanian ditentukan oleh hubungan antara input dan kehilangan air. Input utama berasal dari hujan dan irigasi, sedangkan kehilangan air terjadi melalui evapotranspirasi, limpasan, dan pergerakan air ke lapisan tanah yang lebih dalam. Pengelolaan yang baik bertujuan mempertahankan air tetap tersedia pada zona akar sehingga dapat dimanfaatkan tanaman secara optimal (Zappa *et al.*, 2024).

Perubahan iklim meningkatkan kebutuhan terhadap strategi pengelolaan air yang adaptif karena pola curah hujan menjadi semakin tidak stabil. Kondisi tersebut menyebabkan periode kelebihan air dan kekurangan air dapat terjadi lebih sering. Oleh karena itu, peningkatan kapasitas penyimpanan air tanah dan efisiensi irigasi menjadi bagian penting dalam membangun sistem pertanian yang tahan terhadap perubahan lingkungan (Moore, 2023).

Strategi Pengelolaan Air Tanah Berbasis Agroekologi

Salah satu strategi utama dalam pengelolaan air tanah berbasis agroekologi adalah meningkatkan kualitas tanah melalui pengelolaan bahan organik. Penambahan bahan organik dapat memperbaiki agregasi tanah, meningkatkan ruang pori, serta membantu tanah mempertahankan air lebih lama. Perbaikan kondisi fisik tanah tersebut mendukung ketersediaan air yang lebih stabil bagi tanaman (Lebeau *et al.*, 2023).

Konservasi air melalui penggunaan mulsa dan penutup tanah merupakan pendekatan yang banyak diterapkan dalam agroekologi. Lapisan penutup pada permukaan tanah dapat mengurangi penguapan langsung serta meningkatkan proporsi air hujan yang masuk melalui infiltrasi. Selain itu, residu tanaman membantu menjaga struktur tanah dan mengurangi risiko degradasi akibat limpasan (H. Zhang *et al.*, 2023).

Integrasi teknologi digital juga menjadi bagian penting dalam pengelolaan irigasi modern. Sistem berbasis sensor dan pengamatan satelit memungkinkan petani memperoleh informasi kondisi air tanah secara lebih cepat sehingga keputusan pemberian air dapat dilakukan berdasarkan kebutuhan nyata

tanaman. Pendekatan ini meningkatkan efisiensi penggunaan air dibandingkan sistem irigasi berdasarkan jadwal tetap (Gao *et al.*, 2024).

Tabel 10.4: Strategi Pengelolaan Air

Strategi	Mekanisme	Dampak
Mulsa	Mengurangi evaporasi	Menjaga kelembapan tanah
Tanaman penutup	Meningkatkan perlindungan tanah	Mengurangi limpasan
Irigasi presisi	Pemberian air berbasis kebutuhan	Efisiensi air meningkat
Bahan organik tanah	Memperbaiki struktur tanah	Retensi air meningkat
Sensor kelembapan	Monitoring kondisi tanah	Keputusan irigasi akurat

Pengelolaan air tanah dan irigasi berbasis agroekologi bertujuan menjaga keseimbangan antara kebutuhan tanaman dan kemampuan lingkungan menyediakan air. Integrasi antara konservasi tanah, teknologi irigasi, dan pemanfaatan proses alami ekosistem menjadi pendekatan penting untuk meningkatkan produktivitas sekaligus mempertahankan keberlanjutan sumber daya air (Gao *et al.*, 2024).

10.5 Hubungan Tutupan Vegetasi dan Konservasi Air Tanah

Tutupan vegetasi merupakan salah satu faktor penting yang mengontrol keseimbangan air dalam agroekosistem melalui pengaruhnya terhadap intersepsi hujan, infiltrasi, evaporasi, dan penyimpanan air tanah. Keberadaan vegetasi mampu mengubah pola distribusi air dari permukaan menuju profil tanah dengan memperlambat aliran air serta meningkatkan peluang air masuk ke dalam tanah. Dalam sistem pertanian, pengelolaan vegetasi menjadi

strategi penting untuk meningkatkan efisiensi penggunaan air dan menjaga fungsi hidrologi tanah (Dai *et al.*, 2023).

Vegetasi berperan dalam tahap awal siklus hidrologi melalui proses intersepsi tajuk. Air hujan yang jatuh tidak langsung mengenai permukaan tanah karena sebagian tertahan oleh daun dan batang tanaman. Proses tersebut dapat mengurangi energi kinetik air hujan sehingga menurunkan risiko pemadatan tanah dan erosi. Selain itu, perlambatan jatuhnya air memberikan kesempatan lebih besar bagi air untuk mengalami infiltrasi ke lapisan tanah (Nur Hannah Ismail, Stovin and Cameron, 2023).

Sistem perakaran vegetasi menjadi komponen utama dalam peningkatan kemampuan tanah menyimpan air. Akar tanaman dapat membentuk saluran biologis yang memperbaiki konektivitas pori tanah dan meningkatkan pergerakan air ke lapisan lebih dalam. Kondisi tersebut membantu meningkatkan infiltrasi serta memperbesar kapasitas tanah dalam mempertahankan kelembapan yang tersedia bagi tanaman (Peng *et al.*, 2023).

Selain meningkatkan infiltrasi, vegetasi juga berperan dalam mengurangi kehilangan air akibat evaporasi langsung dari permukaan tanah. Lapisan tanaman dan residu organik di permukaan dapat menurunkan paparan tanah terhadap radiasi matahari sehingga suhu tanah lebih stabil. Kondisi tersebut membantu mempertahankan kelembapan tanah terutama pada agroekosistem yang mengalami periode kering (Zhang *et al.*, 2023).

Vegetasi penutup tanah (cover crops) menjadi salah satu pendekatan agroekologi yang banyak digunakan untuk meningkatkan konservasi air. Tanaman penutup mampu melindungi permukaan tanah dari pukulan hujan, meningkatkan stabilitas agregat, serta mengurangi kehilangan tanah dan air melalui limpasan. Temuan pada lahan pertanian menunjukkan bahwa keberadaan vegetasi penutup dapat memperbaiki kondisi fisik tanah dan meningkatkan kemampuan tanah dalam mempertahankan air (Beniaich *et al.*, 2023).

Hubungan antara vegetasi dan konservasi air tanah juga terlihat dari pengaruhnya terhadap aliran permukaan. Lahan dengan tutupan vegetasi yang lebih baik cenderung memiliki hambatan permukaan lebih besar sehingga kecepatan aliran air dapat dikurangi. Kondisi ini menurunkan risiko erosi serta

meningkatkan jumlah air yang masuk ke dalam tanah sebagai cadangan air (*groundwater recharge*) (Hu *et al.*, 2023).

Agroforestri merupakan bentuk pengelolaan vegetasi yang efektif dalam konservasi air karena menggabungkan tanaman berkayu dan tanaman pertanian dalam satu sistem. Kombinasi tersebut menghasilkan struktur vegetasi bertingkat yang mampu meningkatkan perlindungan tanah, memperbaiki infiltrasi, dan menjaga kelembapan tanah. Selain itu, beberapa spesies pohon memiliki kemampuan redistribusi air melalui sistem akar yang dalam sehingga membantu mempertahankan ketersediaan air pada lapisan tanah tertentu (Ukozehasi, Elkelish and Kullaj, 2024).

Dalam sistem agroforestri, keberadaan pohon juga berpengaruh terhadap pengaturan kelembapan tanah melalui interaksi antara akar, tajuk, dan kondisi mikroklimat. Vegetasi berkayu dapat meningkatkan stabilitas lingkungan tanah dengan mengurangi perubahan suhu dan menjaga distribusi air lebih merata. Hal tersebut menjadikan agroforestri sebagai salah satu pendekatan adaptasi hidrologi pada lahan pertanian yang mengalami tekanan kekeringan (Pulido-Esquivel *et al.*, 2025).

Namun, pengaruh vegetasi terhadap air tanah tetap bergantung pada jenis tanaman dan kondisi lingkungan. Vegetasi dengan kebutuhan air tinggi dapat meningkatkan konsumsi air melalui transpirasi sehingga perlu dipilih sesuai karakteristik iklim dan ketersediaan air. Oleh sebab itu, pengelolaan vegetasi harus mempertimbangkan keseimbangan antara manfaat konservasi dan kebutuhan air tanaman (Heinen *et al.*, 2024).

Perubahan tutupan vegetasi akibat konversi lahan dapat mengganggu keseimbangan hidrologi agroekosistem. Hilangnya vegetasi menyebabkan berkurangnya perlindungan tanah, meningkatnya limpasan, serta menurunnya kemampuan tanah dalam menyimpan air. Dampak tersebut dapat memperbesar risiko kekeringan dan degradasi lahan dalam jangka panjang (Dai *et al.*, 2023).

Mekanisme Vegetasi dalam Konservasi Air Tanah

Secara umum, terdapat empat mekanisme utama vegetasi dalam mengatur konservasi air tanah:

1. Intersepsi hujan oleh kanopi

Mengurangi energi hujan dan memperlambat aliran air menuju permukaan tanah.

2. Peningkatan infiltrasi melalui sistem perakaran

Akar menciptakan pori biologis yang meningkatkan masuknya air.

3. Pengurangan evaporasi permukaan tanah

Vegetasi menjaga suhu tanah dan mempertahankan kelembapan.

4. Pengaturan aliran permukaan (runoff)

Tutupan vegetasi meningkatkan hambatan aliran sehingga memperbesar infiltrasi.

Tabel 10.5: Peran Vegetasi dalam Konservasi Air

Komponen Vegetasi	Fungsi Hidrologi	Dampak pada Air Tanah
Kanopi tanaman	Intersepsi hujan	Mengurangi runoff
Akar tanaman	Membentuk pori tanah	Meningkatkan infiltrasi
Biomassa permukaan	Mengurangi evaporasi	Menjaga kelembapan
Agroforestri	Sistem multi-layer	Stabilitas air tanah
Cover crops	Perlindungan tanah	Meningkatkan retensi air

Secara keseluruhan, tutupan vegetasi merupakan elemen penting dalam konservasi air tanah karena mampu menghubungkan proses biologis tanaman dengan fungsi hidrologi tanah. Integrasi vegetasi melalui agroforestri, tanaman penutup, dan pengelolaan residu tanaman dapat meningkatkan infiltrasi, menekan kehilangan air, serta memperkuat ketahanan agroekosistem terhadap perubahan lingkungan (Beniaich *et al.*, 2023).

BAB 11

SIKLUS KARBON, NITROGEN, DAN FOSFOR DALAM AGROEKOSISTEM

11.1 Siklus Karbon dan Peran Tanah sebagai Penyerap Karbon

Karbon merupakan salah satu unsur penyusun utama kehidupan dan termasuk unsur keempat yang paling melimpah di bumi setelah oksigen, silikon, dan aluminium. Unsur ini terdapat pada atmosfer, hidrosfer, litosfer, biosfer, serta seluruh organisme hidup. Meskipun jumlah total karbon di bumi relatif konstan, karbon senantiasa mengalami perpindahan dan daur ulang melalui berbagai proses geologi dan biologis yang dikenal sebagai siklus karbon (*carbon cycle*) (Ciais *et al.*, 2013). Siklus karbon berperan penting dalam menjaga keseimbangan ekosistem, mengatur produktivitas biologis, serta memengaruhi sistem iklim global.

Secara umum, siklus karbon dibedakan menjadi dua mekanisme utama, yaitu siklus karbon cepat (biologis) dan siklus karbon lambat (geologis). Siklus karbon cepat berlangsung dalam rentang waktu harian hingga puluhan tahun melalui proses biologis. Pada mekanisme ini, karbon dioksida (CO_2) dari atmosfer diserap oleh tumbuhan melalui proses fotosintesis dan diubah menjadi senyawa organik sebagai sumber energi dan biomassa. Karbon tersebut kemudian berpindah ke organisme lain melalui rantai makanan sebelum akhirnya kembali ke atmosfer melalui respirasi organisme, dekomposisi bahan organik, maupun proses pembakaran biomassa. Sebaliknya, siklus karbon lambat berlangsung dalam skala waktu ribuan hingga jutaan tahun karena melibatkan proses geologi. Pada mekanisme ini, karbon diserap oleh lautan, terakumulasi dalam sedimen laut, atau terikat dalam bentuk batuan karbonat dan bahan bakar fosil. Karbon tersebut baru dilepaskan kembali ke atmosfer melalui proses-proses geologi seperti aktivitas vulkanik, pelapukan batuan, maupun pembakaran bahan bakar fosil akibat aktivitas manusia. Oleh karena itu, mekanisme ini dikenal sebagai siklus

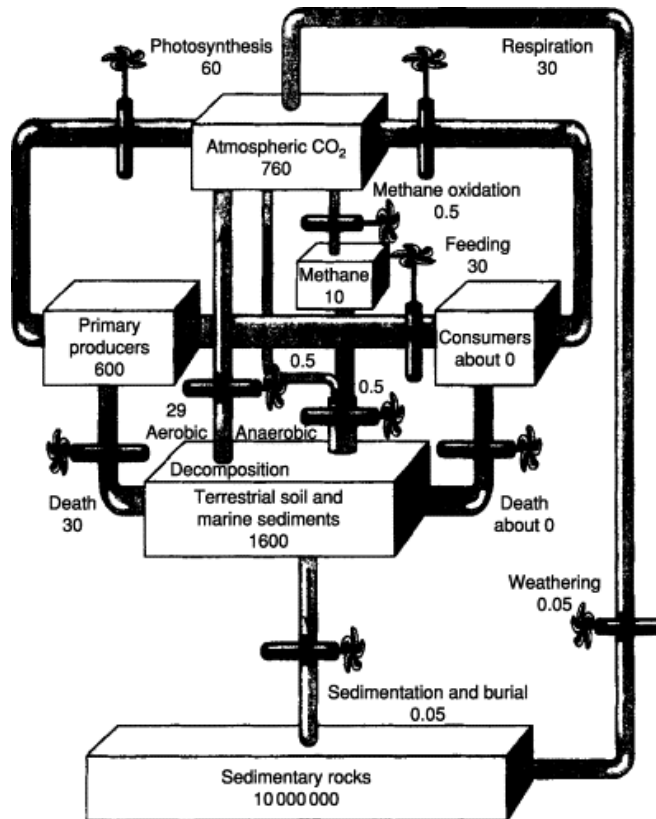
karbon geologis, yang memiliki laju pertukaran karbon jauh lebih lambat dibandingkan siklus biologis.

Di antara berbagai kompartemen penyimpanan karbon di bumi, tanah merupakan salah satu reservoir karbon terbesar yang berperan penting dalam mengatur keseimbangan karbon global. Kemampuan tanah dalam menyimpan karbon terutama ditentukan oleh keberadaan *Soil Organic Carbon* (SOC) atau karbon organik tanah. SOC terbentuk melalui akumulasi residu tanaman dan hewan, hasil fotosintesis, aktivitas mikroorganisme, proses dekomposisi, serta humifikasi yang berlangsung secara terus-menerus (Salazar *et al.*, 2020). Karbon organik tersebut tersimpan dalam berbagai fraksi bahan organik tanah dengan tingkat kestabilan yang berbeda-beda, mulai dari karbon yang mudah terdekomposisi hingga karbon yang stabil dan dapat bertahan selama ratusan bahkan ribuan tahun.

Keberadaan SOC memiliki peranan yang sangat penting, tidak hanya sebagai penyimpan karbon, tetapi juga sebagai indikator utama kualitas tanah. Kandungan SOC yang tinggi mampu memperbaiki struktur tanah, meningkatkan kapasitas menahan air, memperbesar kapasitas tukar kation, menyediakan sumber energi bagi mikroorganisme, serta meningkatkan ketersediaan unsur hara bagi tanaman. Dengan demikian, tanah yang kaya karbon organik akan memiliki tingkat kesuburan yang lebih baik sehingga mampu mendukung pertumbuhan tanaman secara optimal. Kondisi tersebut menciptakan suatu mekanisme umpan balik positif, di mana pertumbuhan tanaman yang baik akan menghasilkan biomassa lebih besar yang pada akhirnya kembali menjadi sumber karbon organik bagi tanah.

Dalam konteks perubahan iklim, peran tanah sebagai penyerap karbon (*carbon sink*) menjadi semakin penting (Gadzhiev *et al.*, 2023). Peningkatan kandungan SOC melalui praktik pengelolaan lahan yang berkelanjutan mampu meningkatkan proses sequestrasi karbon (*carbon sequestration*), yaitu proses penyerapan dan penyimpanan karbon atmosfer ke dalam tanah dalam jangka waktu yang relatif panjang. Semakin besar jumlah karbon yang tersimpan di dalam tanah, semakin kecil konsentrasi karbon dioksida yang berada di atmosfer. Oleh karena itu, pengelolaan tanah yang mampu mempertahankan atau meningkatkan kandungan karbon organik tidak hanya berkontribusi terhadap peningkatan produktivitas pertanian, tetapi juga

menjadi salah satu strategi mitigasi perubahan iklim melalui pengurangan emisi gas rumah kaca. Ilustrasi mengenai distribusi cadangan karbon utama di bumi disajikan pada Gambar 11.1.



Gambar 11.1: Siklus karbon organik jangka pendek dan jangka panjang meliputi produktivitas, sedimentasi, penguburan, dan pelapukan. Angka-angka tersebut merujuk pada cadangan karbon (dalam gigaton) dan fluks karbon (dalam gigaton tahun⁻¹)

(Kump and Crane, 1999)

Dalam konteks agroekosistem, pengelolaan karbon organik tanah menjadi salah satu strategi utama untuk mempertahankan produktivitas lahan sekaligus mendukung mitigasi perubahan iklim. Oleh karena itu, praktik budidaya yang mampu meningkatkan akumulasi karbon di dalam tanah perlu diimplementasikan secara berkelanjutan.

11.2 Siklus Nitrogen: Fiksasi, Nitrifikasi, Denitrifikasi

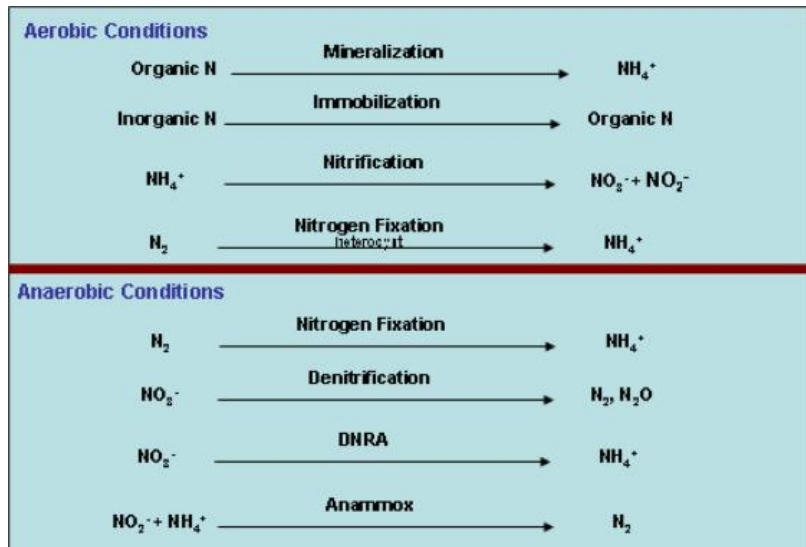
Nitrogen merupakan salah satu unsur hara makro esensial yang berperan penting dalam seluruh proses kehidupan. Sama halnya dengan karbon, nitrogen menjadi komponen penyusun berbagai senyawa biologis, seperti asam amino, protein, asam nukleat (DNA dan RNA), enzim, serta berbagai koenzim yang mendukung metabolisme sel (Björnsne, 2018). Pada tanaman, nitrogen merupakan komponen utama penyusun klorofil sehingga berperan langsung dalam proses fotosintesis, pertumbuhan vegetatif, pembentukan biomassa, serta produktivitas tanaman. Oleh karena itu, ketersediaan nitrogen di dalam tanah sering kali menjadi faktor pembatas utama dalam sistem pertanian.

Atmosfer bumi mengandung sekitar 78% gas nitrogen (N_2), menjadikannya reservoir nitrogen terbesar di bumi. Namun, nitrogen atmosfer berada dalam bentuk molekul diatomik yang sangat stabil akibat ikatan rangkap tiganya, sehingga tidak dapat dimanfaatkan secara langsung oleh sebagian besar organisme. Agar dapat digunakan oleh tanaman dan organisme lain, nitrogen harus mengalami serangkaian transformasi melalui siklus nitrogen, yaitu proses biogeokimia yang mengubah nitrogen dari satu bentuk menjadi bentuk lainnya. Transformasi tersebut sebagian besar dimediasi oleh mikroorganisme tanah yang bekerja pada kondisi aerobik maupun anaerobic (Christian *et al.*, 2016).

Secara umum, siklus nitrogen dalam agroekosistem melibatkan tiga proses utama, yaitu fiksasi nitrogen, nitrifikasi, dan denitrifikasi. Fiksasi nitrogen merupakan proses konversi nitrogen atmosfer (N_2) menjadi amonia (NH_3) atau amonium (NH_4^+) yang dapat dimanfaatkan oleh organisme. Proses ini dilakukan oleh mikroorganisme penambat nitrogen, baik yang hidup bebas maupun yang bersimbiosis dengan tanaman, termasuk kelompok bakteri heterotrofik dan fototrofik. Nitrogen hasil fiksasi selanjutnya dapat diinkorporasikan menjadi senyawa nitrogen organik melalui proses metabolisme.

Amonium yang terbentuk kemudian mengalami nitrifikasi, yaitu proses oksidasi biologis yang berlangsung pada kondisi aerobik (Purswani and Pozo, 2021). Nitrifikasi terjadi dalam dua tahap, yaitu oksidasi amonium menjadi

nitrit (NO_2^-) oleh bakteri pengoksidasi amonia, kemudian oksidasi nitrit menjadi nitrat (NO_3^-) oleh bakteri pengoksidasi nitrit (Ayiti and Babalola, 2022). Nitrat yang dihasilkan merupakan bentuk nitrogen yang paling mudah diserap oleh tanaman, tetapi juga lebih rentan mengalami pencucian (*leaching*) ke lapisan tanah yang lebih dalam. Sebaliknya, pada kondisi anaerobik, nitrat dapat mengalami denitrifikasi, yaitu proses reduksi nitrat secara bertahap menjadi gas nitrogen (N_2) maupun dinitrogen oksida (N_2O) oleh bakteri denitrifikasi. Proses ini menyebabkan hilangnya nitrogen dari tanah kembali ke atmosfer sehingga dapat menurunkan efisiensi pemupukan nitrogen. Selain itu, terbentuknya gas N_2O selama proses denitrifikasi menjadi perhatian penting karena merupakan salah satu gas rumah kaca yang memiliki potensi pemanasan global jauh lebih tinggi dibandingkan karbon dioksida (CO_2). Dengan demikian, pengelolaan siklus nitrogen yang tepat menjadi salah satu aspek penting dalam meningkatkan efisiensi penggunaan pupuk sekaligus mengurangi dampak lingkungan dari sistem pertanian. Ilustrasi mengenai proses-proses utama dalam siklus nitrogen disajikan pada Gambar 11.2



Gambar 11.2: Proses-proses utama dalam siklus nitrogen (N) di lingkungan muara sungai. Mineralisasi dan imobilisasi dapat berlangsung pada kondisi aerobik maupun anaerobik

(Ayiti and Babalola, 2022)

Keseimbangan proses fiksasi, nitrifikasi, dan denitrifikasi sangat menentukan efisiensi pemanfaatan nitrogen oleh tanaman. Pengelolaan nitrogen yang tepat tidak hanya meningkatkan produktivitas pertanian, tetapi juga mengurangi kehilangan nitrogen ke lingkungan serta menekan emisi gas rumah kaca.

11.3 Siklus Fosfor dan Keterbatasan Sumber Fosfor Global

Fosfor merupakan salah satu unsur hara makro esensial yang berperan penting dalam keberlangsungan ekosistem. Unsur ini dibutuhkan dalam berbagai proses fisiologis tanaman, seperti transfer energi, pembentukan asam nukleat, dan perkembangan sistem perakaran, sehingga menjadi salah satu faktor penentu produktivitas pertanian. Selain itu, fosfor juga berperan penting dalam sektor peternakan sebagai komponen nutrisi bagi ternak. Namun, fosfor merupakan sumber daya yang ketersediaannya terbatas karena berasal dari batuan fosfat yang tidak dapat diperbarui dalam skala waktu manusia. Kehilangan fosfor di lingkungan terutama disebabkan oleh erosi tanah yang mencapai sekitar 46% dan limbah peternakan sekitar 40% (Gorazda et al., 2013).

Di dalam tanah, fosfor tersedia melalui proses pelapukan mineral yang mengandung fosfat serta dekomposisi bahan organik oleh aktivitas mikroorganisme. Selain itu, akar tanaman, khususnya rambut akar, juga mampu meningkatkan ketersediaan fosfor melalui eksudat akar yang membantu melarutkan fosfat dari mineral tanah. Meskipun demikian, fosfor memiliki mobilitas yang rendah di dalam tanah karena mudah terikat oleh mineral seperti besi (Fe), aluminium (Al), dan kalsium (Ca), sehingga tidak seluruh fosfor yang tersedia dapat langsung diserap oleh tanaman (Filippelli, 2009). Oleh karena itu, pengelolaan fosfor yang efisien menjadi salah satu aspek penting dalam mendukung produktivitas pertanian sekaligus menjaga keberlanjutan sumber daya fosfat global.

Salah satu pendekatan biologi yang menjanjikan yaitu dengan adanya pemanfaatan Arbuscular Mycorrhizal Fungi (AMF). AMF berperan dalam mobilisasi fosfor dan membantu akar dalam penyerapannya. Benefit yang diberikan tersebut melalui serangkaian proses, yang pertama yaitu eksplorasi tanah melalui hifa, adanya ekstensi dari hifa jamur mampu menjangkau daur fosfor sehingga volume tanah dapat menjadi efektif untuk penyerapan

fosfor. Berikutnya hidrolisis enzyme yang memproduksi sekresi fosfat untuk me mineralisasi fosfor organik, meningkatkan konversi dari fosfor organik menjadi fosfor yang tersedia. Berikutnya pelarutan fosfat inorganik, dengan adanya pengeluaran dari asam organik seperti oxalic, sitric acid untuk melarutkan ikatan mineral fosfat sehingga mampu memobilisasi fosfor terlarut dalam tanah. Common Mycorrhizal Networks (CMNs) akan mengkoneksikan berbagai tanaman untuk adanya sharing nutrisi dan redistribusi. Hal ini mampu meningkatkan distribusi fosfor dan meningkatkan kesinambungan tanaman. Dari proses tersebut struktur dari tanah akan meningkat yang mana hifa mikoriza mampu menstabilisasi agregat tanah dan meningkatkan poros tanah, wal ini mampu mendukung retensi air dan meningkatkan kesuburan tanah.

Salah satu pendekatan biologis yang menjanjikan untuk meningkatkan efisiensi siklus fosfor adalah pemanfaatan Arbuscular Mycorrhizal Fungi (AMF) (Katyayani et al., 2025). AMF berperan dalam meningkatkan ketersediaan fosfor di dalam tanah sekaligus meningkatkan efisiensi penyerapannya oleh akar tanaman. Mekanisme tersebut berlangsung melalui beberapa proses (Khan et al., 2022). Pertama, perluasan jangkauan tanah oleh hifa jamur. Hifa AMF yang memanjang melampaui zona perakaran mampu menjangkau daerah yang tidak dapat dicapai oleh akar, sehingga memperluas volume tanah yang efektif untuk menyerap fosfor. Kedua, mineralisasi fosfor organik melalui sekresi enzim fosfatase yang menghidrolisis senyawa fosfor organik menjadi ortofosfat ($H_2PO_4^-$ dan HPO_4^{2-}), yaitu bentuk fosfor yang dapat diserap oleh tanaman. Ketiga, pelarutan fosfat anorganik melalui eksudasi asam organik, seperti asam oksalat (oxalic acid) dan asam sitrat (citric acid), yang membantu melarutkan mineral pembawa fosfat sehingga meningkatkan ketersediaan fosfor di dalam larutan tanah.

Selain meningkatkan ketersediaan fosfor, AMF juga membentuk Common Mycorrhizal Networks (CMNs), yaitu jaringan hifa yang menghubungkan beberapa tanaman sehingga memungkinkan terjadinya redistribusi air, fosfor, dan unsur hara lainnya antartanaman. Jaringan ini berkontribusi dalam meningkatkan efisiensi akuisisi hara serta mendukung stabilitas dan keberlanjutan agroekosistem. Di samping itu, hifa AMF bersama glomalin-related soil protein (GRSP) berperan dalam menstabilkan agregat tanah, meningkatkan porositas, memperbaiki retensi air, dan menjaga struktur tanah.

Perbaikan sifat fisik tanah tersebut mendukung peningkatan kesuburan tanah, aktivitas mikroorganisme, serta produktivitas tanaman secara berkelanjutan. Pengelolaan fosfor tidak hanya berfokus pada penambahan pupuk fosfat, tetapi juga memerlukan optimalisasi proses biologis di dalam tanah. Pendekatan ini mampu meningkatkan efisiensi penggunaan fosfor sekaligus menjaga keberlanjutan sumber daya fosfat yang ketersediaannya semakin terbatas.

11.4 Siklus Sulfur dan Unsur Mikro dalam Ekosistem Pertanian

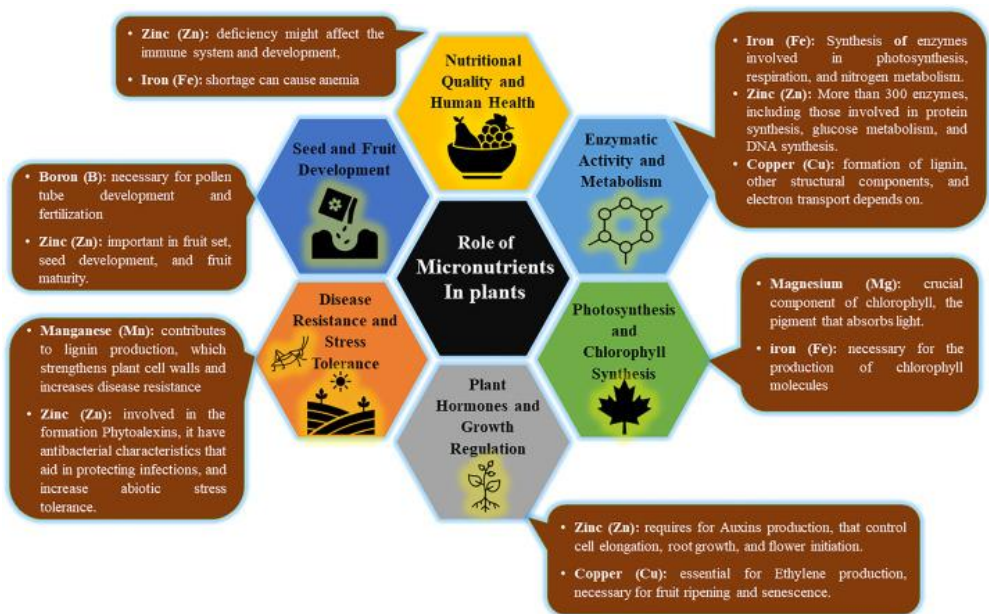
Sulfur merupakan salah satu unsur hara esensial yang berperan penting dalam pertumbuhan dan perkembangan tanaman. Unsur ini menjadi penyusun berbagai senyawa penting, seperti asam amino yang mengandung sulfur (sistein dan metionin), enzim, vitamin, serta protein. Sulfur digolongkan sebagai unsur hara makro sekunder karena dibutuhkan tanaman dalam jumlah yang lebih sedikit dibandingkan unsur hara makro primer, yaitu nitrogen (N), fosfor (P), dan kalium (K). Meskipun demikian, kekurangan sulfur dapat mengganggu berbagai proses fisiologis tanaman, menurunkan efisiensi sintesis protein dan fotosintesis, serta pada akhirnya menyebabkan penurunan pertumbuhan dan produktivitas tanaman.

Ketersediaan sulfur di dalam tanah berasal dari berbagai sumber, salah satunya deposisi atmosfer melalui air hujan (Mibang *et al.*, 2021). Selain itu, sulfur juga berasal dari pelapukan mineral, dekomposisi bahan organik, serta pemupukan. Reservoir sulfur terbesar di bumi terdapat di lautan dalam bentuk sulfat (SO_4^{2-}) terlarut, sedangkan pada litosfer sulfur banyak tersimpan dalam mineral seperti gipsum ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) dan pirit (FeS_2) (Sievert *et al.*, 2007). Dalam siklus biogeokimia, sulfur mengalami perubahan bilangan oksidasi dari -2 pada bentuk sulfida (S^{2-}) dan sulfur organik tereduksi hingga $+6$ pada bentuk sulfat (SO_4^{2-}). Di antara berbagai bentuk tersebut, sulfat merupakan bentuk sulfur yang paling stabil sekaligus menjadi bentuk utama yang dapat diserap oleh tanaman.

Dalam ekosistem pertanian, unsur hara yang dibutuhkan tanaman tidak hanya sulfur, tetapi juga unsur hara makro lainnya, yaitu nitrogen (N), fosfor (P), kalium (K), kalsium (Ca), dan magnesium (Mg). Selain unsur hara makro,

tanaman juga memerlukan unsur hara mikro, seperti boron (B), klorin (Cl), tembaga (Cu), besi (Fe), molibdenum (Mo), mangan (Mn), nikel (Ni), natrium (Na), dan seng (Zn) (Mushtaq *et al.*, 2023). Meskipun dibutuhkan dalam jumlah yang relatif kecil, unsur hara mikro memiliki peran yang sangat penting dalam berbagai proses fisiologis dan metabolisme tanaman, sehingga berpengaruh terhadap pertumbuhan, kesehatan, dan produktivitas tanaman.

Sebagai contoh, seng (Zn) berperan dalam sintesis protein, metabolisme karbohidrat, regulasi aktivitas enzim, serta biosintesis hormon pertumbuhan, seperti auksin (Balandrán-Valladares *et al.*, 2021). Sementara itu, besi (Fe) berperan penting dalam pembentukan klorofil secara tidak langsung, transfer elektron, serta penyusun berbagai protein pada fotosistem yang berperan dalam proses fotosintesis. Oleh karena itu, ketersediaan unsur hara mikro yang memadai menjadi faktor penting dalam menjaga fungsi fisiologis tanaman secara optimal. Fungsi masing-masing unsur hara mikro disajikan pada Gambar 11.3.



Gambar 11.3: Peran unsur hara mikro dalam proses fisiologis dan metabolisme tanaman

(Ahmed *et al.*, 2024)

Meskipun karbon, nitrogen, fosfor, sulfur, dan unsur hara mikro memiliki mekanisme siklus yang berbeda, seluruh unsur tersebut saling berinteraksi dalam mendukung produktivitas dan keberlanjutan agroekosistem. Aktivitas mikroorganisme, dekomposisi bahan organik, serta proses penyerapan oleh tanaman menghubungkan berbagai siklus tersebut menjadi suatu sistem yang dinamis. Oleh karena itu, diperlukan strategi pengelolaan yang mampu menjaga keseimbangan seluruh siklus hara secara terpadu.

11.5 Manajemen Siklus Hara Secara Terpadu dalam Sistem Agroekologi

Salah satu komponen utama dalam agroekosistem adalah tanah. Tanah berfungsi sebagai media tumbuh tanaman sekaligus habitat bagi berbagai organisme, baik yang hidup di permukaan maupun di dalam tanah. Selain menjadi tempat berkembangnya sistem perakaran, tanah juga menyediakan air, unsur hara, serta menjadi lokasi berlangsungnya berbagai proses biologi, fisika, dan kimia yang mendukung pertumbuhan tanaman. Oleh karena itu, pengelolaan agroekosistem tidak hanya berfokus pada penentuan pola tanam, pemilihan komoditas, atau aspek budidaya lainnya, tetapi juga harus memperhatikan praktik pengelolaan tanah secara berkelanjutan (Nicholls *et al.*, 2016).

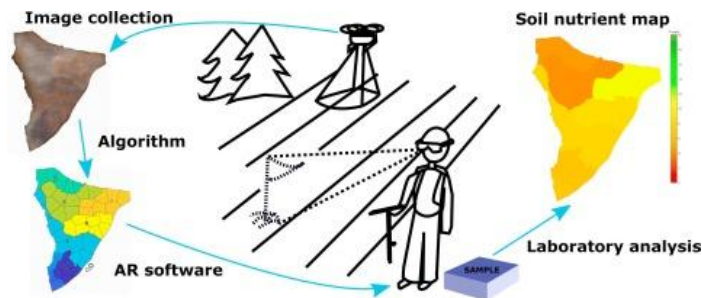
Salah satu pendekatan yang dapat diterapkan adalah prinsip 3R (*Reduce*, *Reuse*, dan *Recycle*). Prinsip *reduce* dilakukan dengan mengurangi penggunaan input eksternal yang berpotensi menimbulkan dampak negatif terhadap lingkungan, seperti penggunaan pupuk dan pestisida sintesis secara berlebihan. Penerapan prinsip ini dapat meminimalkan degradasi tanah serta menjaga keberlangsungan dan keanekaragaman mikroorganisme tanah yang berperan dalam siklus hara. Prinsip *reuse* dapat diterapkan dengan memanfaatkan kembali bahan organik (*organic matter*), seperti sisa tanaman, daun, ranting, dan jerami, sebagai mulsa atau dikembalikan ke lahan. Praktik ini membantu mempertahankan kandungan bahan organik, memperbaiki struktur tanah, serta mendukung keberlangsungan siklus hara. Sementara itu, prinsip *recycle* diwujudkan melalui pengolahan limbah pertanian dan peternakan menjadi produk yang bernilai guna, seperti kompos, pupuk organik, biogas, maupun pakan ternak alternatif. Melalui penerapan prinsip

3R, pemanfaatan sumber daya dalam agroekosistem menjadi lebih efisien, limbah dapat diminimalkan, dan keberlanjutan sistem pertanian dapat lebih terjaga.

Dalam penerepannya, prinsip tersebut dapat diimplementasikan melalui praktik praktik spesifik seperti penjelasan berikut,

11.5.1 Pertanian Presisi

Pertanian presisi (precision agriculture) merupakan pendekatan dalam manajemen pertanian yang memanfaatkan teknologi informasi, sensor, serta pemrosesan data untuk mendukung pengambilan keputusan dalam sektor budidaya tanaman secara tepat, efisien, dan berkelanjutan. Pendekatan ini memungkinkan pengelolaan lahan berdasarkan kondisi spesifik setiap lokasi (site specific management), sehingga penggunaan input pertanian, seperti air, pupuk, dan pestisida, dapat disesuaikan dengan kebutuhan tanaman. Penerapannya dilakukan melalui berbagai teknologi, seperti sensor untuk memantau kelembapan tanah, kondisi irigasi, status hara, serta serangan hama dan penyakit tanaman. Selain itu, pemanfaatan drone dan citra penginderaan jauh (remote sensing) juga semakin luas digunakan untuk pemetaan lahan, pemantauan pertumbuhan tanaman, deteksi dini stres tanaman, hingga evaluasi produktivitas lahan.



Gambar 11.4: Sampling tanah menggunakan drone

(Huuskonen and Oksanen, 2018)

11.5.2 Agroforestri

Agroforestri merupakan salah satu alternatif sistem budidaya yang lebih berkelanjutan dibandingkan sistem monokultur yang telah banyak diterapkan di berbagai wilayah Indonesia (Kuyah *et al.*, 2016). Melalui integrasi tanaman

kehutanan dengan tanaman pertanian dan/atau ternak dalam satu sistem pengelolaan lahan, agroforestri mampu meningkatkan keanekaragaman hayati serta menciptakan ekosistem yang lebih stabil. Keberagaman vegetasi tersebut menyediakan habitat yang lebih beragam bagi berbagai organisme, seperti serangga, burung, mamalia kecil, dan mikroorganisme tanah, sehingga mendukung pelestarian biodiversitas. Selain itu, keberagaman jenis tanaman pada sistem agroforestri menghasilkan masukan bahan organik yang lebih beragam melalui serasah dan biomassa akar. Kondisi ini berkontribusi terhadap perbaikan struktur tanah, peningkatan kandungan bahan organik, serta aktivitas mikroorganisme yang berperan dalam siklus hara. Dalam kaitannya dengan siklus biogeokimia, khususnya siklus karbon, agroforestri berfungsi sebagai reservoir karbon (*carbon sink*) melalui akumulasi biomassa tanaman dan peningkatan karbon organik tanah (Salve *et al.*, 2022). Dengan demikian, sistem agroforestri tidak hanya mendukung produktivitas pertanian, tetapi juga membantu menjaga keberlangsungan siklus karbon dan unsur hara lainnya, sekaligus berkontribusi terhadap mitigasi perubahan iklim.

11.5.3 Cover Crop

Cover crop atau tanaman penutup merupakan salah satu praktik pengelolaan agroekosistem yang bertujuan untuk menjaga kualitas tanah dan meningkatkan keberlanjutan sistem pertanian (Afridi *et al.*, 2022). Tanaman penutup ditanam di sela-sela atau setelah masa tanam komoditas utama untuk melindungi permukaan tanah dari erosi akibat air maupun angin, mengurangi penguapan sehingga mempertahankan kelembapan tanah, serta menekan pertumbuhan gulma. Selain itu, biomassa yang dihasilkan tanaman penutup akan terdekomposisi menjadi bahan organik yang meningkatkan kandungan karbon organik tanah, memperbaiki struktur tanah, meningkatkan kapasitas menahan air, dan mendukung aktivitas mikroorganisme tanah. Penggunaan tanaman penutup dari kelompok leguminosa juga memberikan manfaat tambahan melalui kemampuannya melakukan fiksasi nitrogen secara biologis melalui simbiosis dengan bakteri penambat nitrogen, sehingga dapat meningkatkan ketersediaan nitrogen di dalam tanah dan mengurangi kebutuhan pupuk anorganik. Dengan demikian, penerapan *cover crop* tidak hanya menjaga kesuburan tanah, tetapi juga mendukung siklus karbon dan

nitrogen, meningkatkan efisiensi siklus hara, serta mewujudkan sistem pertanian yang lebih produktif dan berkelanjutan.

Secara keseluruhan, keberlanjutan agroekosistem sangat bergantung pada keseimbangan siklus karbon, nitrogen, fosfor, sulfur, serta unsur hara lainnya. Penerapan berbagai praktik pengelolaan, seperti pertanian presisi, agroforestri, dan penggunaan *cover crop*, dapat meningkatkan efisiensi siklus hara, memperbaiki kualitas tanah, serta mendukung produktivitas pertanian secara berkelanjutan. Dengan demikian, integrasi teknologi, pendekatan biologis, dan prinsip agroekologi menjadi kunci dalam mewujudkan sistem pertanian yang produktif, tangguh, dan ramah lingkungan.

BAB 12

KEANEKARAGAMAN HAYATI DAN FUNGSINYA DALAM AGROEKOSISTEM

12.1 Konsep Keanekaragaman Hayati dalam Pertanian (Agrobiodiversitas)

12.1.1 Pengantar Ekologi Pertanian: Memahami Agroekosistem

Selama berabad-abad, pertanian sering kali dipandang secara reduksionis: sebuah lahan yang dibersihkan, ditanami satu jenis komoditas, diberi input kimia, dan dipanen untuk keuntungan ekonomi. Namun, jika kita melihatnya dengan kacamata ekologi, sebuah lahan pertanian sejatinya adalah sebuah ekosistem yang hidup. Ekosistem yang dimodifikasi oleh manusia untuk menghasilkan pangan, serat, dan bahan baku lainnya ini disebut sebagai agroekosistem.

Sebagai sebuah ekosistem, agroekosistem tidak berdiri sendiri. Di dalamnya terdapat interaksi kompleks antara komponen biotik (tanaman budidaya, gulma, serangga, mikroba tanah, mamalia) dan komponen abiotik (tanah, air, penetrasi cahaya matahari, dan iklim mikro). Meskipun memiliki komponen yang sama dengan ekosistem alami seperti hutan hujan tropis atau sabana, agroekosistem memiliki karakteristik unik yang membedakannya secara mendasar:

1. Karakteristik Ekosistem Alami:

- Sumber Energi: Murni dari radiasi matahari.
- Keanekaragaman: Sangat tinggi, relung ekologi (niche) terisi penuh.
- Siklus Nutrisi: Tertutup dan efisien (nutrisi kembali ke tanah melalui dekomposisi).

- Stabilitas: Tinggi, memiliki resiliensi alami yang kuat terhadap gangguan.

2. Karakteristik Agroekosistem (Konvensional/Intensif):

- Sumber Energi: Matahari didukung energi fosil (pupuk kimia, bahan bakar traktor).
- Keanekaragaman: Rendah (sering kali monokultur), relung ekologi disederhanakan.
- Siklus Nutrisi: Terbuka (nutrisi hilang bersama hasil panen, diganti pupuk eksternal).
- Stabilitas: Rendah, sangat bergantung pada intervensi manusia (subsidi energi).

12.1.2 Pengertian dan Cakupan Agrobiodiversitas

Agrobiodiversitas mencakup seluruh komponen keanekaragaman hayati yang relevan dengan pangan dan pertanian, serta semua komponen yang mendukung ekosistem pertanian secara keseluruhan.

Untuk memahaminya secara teoretis, kita harus membagi agrobiodiversitas ke dalam tiga tingkatan hierarki ekologi:

1. **Keanekaragaman Genetik (Di Dalam Spesies):** Ini adalah variasi gen yang ada di dalam satu jenis tanaman atau hewan budidaya. Sebagai contoh, variasi genetik pada padi (*Oryza sativa*) lokal Indonesia seperti Padi Cianjur, Rojo Lele, hingga padi gogo varietas pedalaman Kalimantan yang memiliki ketahanan berbeda terhadap kekeringan atau serangan hama.
2. **Keanekaragaman Spesies (Di Antara Spesies):** Ini merujuk pada jumlah dan variasi spesies yang hidup berdampingan di dalam agroekosistem. Cakupannya tidak hanya tanaman yang sengaja ditanam (seperti jagung dan kacang tanah dalam sistem tumpang sari), tetapi juga organisme non-budidaya seperti serangga penyerbuk, laba-laba predator, cacing tanah, hingga mikroba penambat nitrogen di perakaran.

3. Keanekaragaman Ekosistem (Lanskap Pertanian): Ini adalah variasi spasial dari bentang alam pertanian. Lanskap pertanian yang beragam terdiri dari mosaik lahan sawah, pekarangan rumah, sabuk hijau (green belts), dan petak-petak hutan sekunder. Keanekaragaman tingkat lanskap ini sangat menentukan mobilitas dan kelestarian fauna bermanfaat di alam.

12.1.3 Evolusi Pertanian dan Teori Gangguan (Disturbance Theory)

Revolusi Hijau pada pertengahan abad ke-20 telah mengubah wajah pertanian global secara drastis. Dorongan untuk memenuhi kebutuhan pangan populasi dunia memicu transisi massal dari sistem polikultur tradisional (yang kaya spesies) menuju sistem monokultur skala besar yang intensif.

Secara ekologis, proses ini dapat dijelaskan menggunakan Teori Gangguan (Disturbance Theory). Di alam liar, gangguan berskala kecil hingga sedang (intermediate disturbance) sebenarnya dapat memicu suksesi alami dan meningkatkan biodiversitas karena membuka ruang bagi spesies baru untuk tumbuh. Namun, apa yang terjadi pada pertanian konvensional intensif adalah gangguan antropogenik (buatan manusia) yang ekstrem, kronis, dan terus-menerus.

Pembajakan tanah secara masif memutus miselium jamur baik, aplikasi pestisida spektrum luas membunuh musuh alami sekaligus hama, dan herbisida menghilangkan gulma yang sebenarnya berfungsi sebagai penutup tanah. Gangguan yang tiada henti ini memaksa agroekosistem berada pada fase suksesi awal yang tidak pernah matang. Lahan pertanian dipaksa menjadi homogen, bersih, dan statis. Akibatnya, rantai makanan terputus, dan relung ekologi yang kosong memicu terjadinya Asymmetric Competition (kompetisi tidak seimbang), di mana satu atau dua spesies pengganggu (hama/gulma tangguh) meledak populasinya tanpa ada kompetitor atau predator alami yang mampu mengendalikannya.

12.1.4 Paradoks Monokultur dan Hukum Entropi

Demi mengejar efisiensi mekanisasi dan standardisasi hasil panen, kita menciptakan hamparan satu varietas tanaman homogen seluas puluhan hingga ratusan hektare. Secara ekonomi jangka pendek, ini terlihat sangat menguntungkan. Namun secara ekologis, sistem ini menentang hukum alam dan menciptakan bom waktu.

Berdasarkan Hukum Termodinamika Kedua (Konsep Entropi), setiap sistem alami di alam semesta secara spontan akan bergerak dari kondisi teratur menuju kondisi acak atau tidak teratur (entropi tinggi), kecuali jika ada energi yang terus-menerus dimasukkan untuk menjaga keteraturan tersebut.

Hutan hujan alami menjaga keteraturannya sendiri (entropi rendah) secara mandiri melalui keanekaragaman hayati yang tinggi dan siklus nutrisi internal. Sebaliknya, sistem monokultur buatan manusia adalah sistem dengan tingkat keteraturan artifisial yang sangat ekstrem. Tanpa keanekaragaman hayati sebagai benteng pertahanan alami, sistem monokultur memiliki kecenderungan alami yang sangat kuat untuk runtuh menuju kekacauan (entropi tinggi), baik dalam bentuk ledakan hama, epidemi penyakit tanaman, maupun degradasi unsur hara tanah.

Untuk mencegah keruntuhan tersebut, manusia terperangkap dalam siklus ketergantungan: mereka harus terus memasukkan "energi tambahan" dari luar berupa pupuk sintesis dosis tinggi, pestisida kimia yang semakin toksik, dan bahan bakar fosil untuk mesin-mesin pertanian. Ketika biaya energi eksternal ini secara ekologis dan ekonomi tidak lagi tertahankan, di situlah sistem pertanian konvensional menemui titik jenuhnya.

12.2 Keanekaragaman Genetik Tanaman Budidaya dan Kerabat Liarnya (CROP WILD RELATIVES)

Domestikasi adalah proses evolusioner di mana manusia secara sengaja memilih, memelihara, dan mengembangbiakkan tanaman liar agar memiliki sifat-sifat yang menguntungkan bagi kebutuhan konsumsi manusia. Proses ini mengubah bentuk fisik, fisiologi, hingga struktur genetik tanaman secara dramatis selama ribuan tahun. Untuk memahami fenomena ini secara teoretis, ahli genetika tumbuhan menggunakan konsep Genepool (Kolam Gen) yang

diperkenalkan oleh Harlan dan de Wet (1971). Kolam gen ini dibagi menjadi tiga tingkatan konsentris berdasarkan tingkat kemudahan transfer gen melalui persilangan biasa:

- a. Genepool Primer (GP1): Mencakup varietas tanaman budidaya itu sendiri (cultivars) dan kerabat liarnya yang sangat dekat. Persilangan di dalam GP1 berlangsung sangat mudah, alami, dan menghasilkan keturunan yang sepenuhnya subur (fertile).
- b. Genepool Sekunder (GP2): Mencakup spesies kerabat liar yang berbeda namun masih dalam genus yang sama. Persilangan biologis masih bisa dilakukan, tetapi pemulia tanaman akan menghadapi hambatan reproduksi tertentu, seperti penurunan viabilitas benih atau keturunan generasi pertama yang mandul (sterile).
- c. Genepool Tersier (GP3): Mencakup kerabat liar yang berkerabat jauh (beda genus atau sub-genus). Persilangan alami di ladang hampir mustahil dilakukan karena ketidakcocokan kromosom yang ekstrem. Pemindahan gen dari GP3 ke tanaman budidaya memerlukan teknologi canggih laboratorium seperti penyelamatan embrio (embryo rescue) lewat kultur jaringan atau rekayasa genetika tingkat lanjut.

Ketika manusia purba mulai mendomestikasi tanaman purba dari GP1, mereka menciptakan apa yang disebut sebagai domestication syndrome (sindrom domestikasi). Sifat-sifat liar yang penting bagi kesintasan tanaman di alam, seperti biji yang mudah rontok (shattering) untuk penyebaran alami, kulit biji yang keras, dan senyawa toksik pertahanan diri, dihilangkan melalui seleksi buatan. Manusia memilih tanaman dengan biji yang tidak mudah rontok (agar mudah dipanen), ukuran buah yang lebih besar, dan rasa yang lebih manis. Secara tidak sadar, proses ini menggeser kendali evolusi dari seleksi alam menjadi seleksi antropogenik.

12.2.1 Pentingnya Crop Wild Relatives (CWR) dan Teori Ko-evolusi

Crop Wild Relatives adalah tumbuhan liar yang berkerabat dekat dengan tanaman budidaya (berada dalam GP1, GP2, atau GP3) yang terus tumbuh dan berevolusi di habitat alami mereka seperti hutan, pegunungan, atau rawa tanpa campur tangan manusia.

Pentingnya CWR bagi agroekosistem masa depan dijelaskan melalui Teori Ko-evolusi (Co-evolutionary Arms Race atau Hipotesis Red Queen). Ketika patogen mengembangkan mekanisme baru untuk menyerang tumbuhan, tumbuhan liar merespons secara evolusioner dengan memutasi genom mereka untuk menciptakan senyawa pertahanan baru (misalnya fitoaleksin atau alkaloid tertentu). Interaksi gen-demi-gen (gene for gene hypothesis) ini menghasilkan variasi genetik yang sangat kaya dan tangguh di alam liar.

Sebaliknya, pada tanaman budidaya modern, perlombaan senjata evolusioner ini telah dihentikan secara paksa oleh manusia melalui aplikasi pestisida dan isolasi lahan. Akibatnya, ketika patogen baru yang telah bermutasi menyerang, tanaman budidaya kita tidak memiliki "amunisi" genetik untuk bertahan. Di sinilah peran vital CWR muncul. CWR bertindak sebagai perpustakaan gen raksasa yang menyediakan gen-gen fungsional untuk resistensi biotik (hama/penyakit) dan toleransi abiotik (kemampuan sistem perakaran bertahan dalam kondisi kekeringan ekstrem, tanah salin, atau suhu panas akibat perubahan iklim global).

Sebagai contoh, varietas padi modern komersial di Asia tenggara pernah terselamatkan dari kelaparan massal akibat virus rumput kerdil (grassy stunt virus) berkat transfer gen resisten tunggal dari spesies padi liar asal India, *Oryza nivara*. Tanpa keberadaan varietas liar tersebut, industri pertanian padi global bisa mengalami kelumpuhan total pada masanya.

12.2.2 Fenomena Erosi Genetik dan Bottleneck Effect

Erosi genetik adalah hilangnya keanekaragaman genetik secara bertahap di dalam suatu populasi atau spesies, yang ditandai dengan punahnya varietas-varietas lokal tradisional dan menyusutnya populasi kerabat liar di alam. Salah

satu penyebab terjadinya erosi genetik adalah dengan adanya intensifikasi dan standarisasi pada pertanian komersional.

Secara genetika populasi, intensifikasi pertanian komersial memicu terjadinya Efek Leher Botol (Bottleneck Effect) Ekstrem. Dampaknya adalah hilangnya plastisitas fenotipe, kemampuan suatu organisme untuk mengubah penampilannya atau respons fisiologisnya terhadap perubahan lingkungan. Lahan pertanian kita menjadi rentan secara struktural. Jika terjadi perubahan iklim mikro atau munculnya ras patogen baru, seluruh tanaman di hamparan tersebut akan hancur secara bersamaan karena mereka memiliki susunan genetik yang identik (vulnerability of genetic uniformity). Erosi genetik diperparah oleh rusaknya habitat asli CWR di Indonesia akibat deforestasi, alih fungsi lahan hutan menjadi perkebunan monokultur skala besar, dan urbanisasi.

12.3 Peran Serangga, Burung, dan Fauna Lain dalam Agroekosistem

Dalam pandangan pertanian konvensional reduksionis, fauna di lahan pertanian sering kali disederhanakan menjadi satu label: "hama" jika mereka memakan tanaman, atau "bukan hama" jika mereka tidak merusak. Namun, ekologi memandang komunitas fauna melalui Teori Jaring-Jaring Makanan (Food Web Theory). Di dalam agroekosistem, setiap organisme menempati tingkatan trofik tertentu yang terikat dalam aliran energi dan siklus materi.

Secara teoretis, kompleksitas jaring makanan dipahami menggunakan pendekatan Teori Graf (Graph Theory), di mana spesies direpresentasikan sebagai titik (nodes) dan interaksi makan dimakan direpresentasikan sebagai garis penghubung (links). Dua parameter struktural utama yang menentukan stabilitas sistem ini adalah Kekayaan Spesies (S) yang merujuk pada jumlah total nodes, serta Konektivitas (C) yang mengukur rasio interaksi aktual terhadap total interaksi potensial dengan rumus: $C = L / (S^2)$.

Pada ekosistem alami, nilai kekayaan spesies (S) yang tinggi dan pola interaksi yang tersebar dalam kompartemen-kompartemen kecil (modular web) berfungsi sebagai peredam kejutan ekologis. Jika salah satu jalur interaksi terputus, energi tetap dapat mengalir melalui jalur alternatif. Namun, ketika manusia menyederhanakan struktur tanaman menjadi monokultur, nilai S

menurun drastis secara artifisial, menghancurkan modularitas jaring makanan, dan menyisakan rantai makanan yang pendek, linear, serta kaku.

Penyederhanaan struktural ini memicu apa yang disebut sebagai Kaskade Trofik (Trophic Cascade), yaitu perubahan tidak langsung dalam kepadatan populasi atau biomassa yang merambat turun melalui tingkatan trofik dalam jaring makanan akibat hilangnya atau melemahnya fungsi kontrol dari predator puncak.

Kaskade trofik membuktikan bahwa stabilitas lahan pertanian tidak ditentukan oleh seberapa bersih lahan tersebut dari fauna, melainkan oleh keutuhan struktur interaksi antar-tingkat trofiknya.

12.3.1 Hipotesis Regulasi Populasi: Top-Down vs. Bottom-Up dan Kekuatan Interaksi

Untuk memahami mengapa suatu organisme meledak menjadi hama, ekologi pertanian menyediakan dua kerangka penjelasan teoretis: Hipotesis Regulasi Top Down (Kendali Atas) dan Hipotesis Regulasi Bottom Up (Kendali Bawah).

- a. **Regulasi Bottom-Up:** Menyatakan bahwa populasi organisme pada tingkat trofik yang lebih tinggi dikendalikan oleh ketersediaan energi dan kualitas nutrisi pada tingkat trofik di bawahnya. Dalam pertanian, hamparan monokultur tanaman yang seragam yang sering kali diberi pupuk nitrogen (N) dosis tinggi memberikan suplai makanan yang melimpah dan sangat bernutrisi bagi serangga herbivora, memicu pertumbuhan populasi mereka secara logistik menuju kapasitas dukung (carrying capacity) maksimum ekosistem.
- b. **Regulasi Top-Down:** Menyatakan bahwa populasi mangsa (herbivora/hama) dikendalikan secara ketat oleh predator, parasitoid, dan patogen (musuh alami) yang berada di tingkat trofik di atasnya melalui mortalitas akibat pemangsaan atau parasitisme.

Dalam ekologi jaring makanan modern, efektivitas regulasi top-down ini sangat ditentukan oleh konsep Kekuatan Interaksi (Interaction Strength). Robert May (1972) secara matematis membuktikan sebuah paradoks: jaring makanan yang besar dan memiliki banyak interaksi kuat cenderung tidak

stabil dan mudah runtuh. Stabilitas ekosistem justru dipertahankan oleh keberadaan banyak interaksi lemah yang bertindak sebagai "jangkar". Interaksi lemah ini terjadi ketika predator bersifat generalis (memiliki banyak pilihan makanan) sehingga mereka tidak memberikan tekanan pemangsaan yang terlalu ekstrem pada satu spesies mangsa saja, melainkan berpindah-pindah tergantung kelimpahan mangsa terdekat (prey switching).

Perbandingan Struktur Interaksi

- Jaring Makanan Polikultur: Banyak interaksi lemah. Predator memangsa Hama B, C, dan D secara bergantian. Populasi stabil dan elastis.
- Jaring Makanan Monokultur: Sedikit interaksi kuat. Hanya tersisa satu jalur linear kaku dari Predator ke Hama B. Sangat tidak stabil; jika predator hilang, hama langsung meledak.

Pada agroekosistem intensif, manusia secara tidak sengaja memotong interaksi-interaksi lemah ini melalui homogenisasi lanskap. Ketika pestisida kimia spektrum luas diaplikasikan, regulasi top-down yang sudah rapuh ini terputus total. Karena serangga hama umumnya memiliki laju reproduksi yang jauh lebih cepat dan strategi adaptasi tinggi (r-strategist) dibanding predatornya (K-strategist), hama tersebut akan mengalami Resurgensi (ledakan populasi ulang) yang jauh lebih hebat dari kondisi awal akibat rusaknya sistem kendali top-down.

12.3.2 Relung Ekologi (Ecological Niche) dan Fungsi Spesies Fauna

Berdasarkan Prinsip Eksklusi Kompetitif (Prinsip Gause), dua spesies tidak dapat menempati relung ekologi (niche) yang persis sama dalam jangka panjang jika sumber daya mereka terbatas. Di dalam agroekosistem yang sehat, keanekaragaman fauna yang tinggi memastikan bahwa seluruh dimensi relung ekologi terisi secara fungsional, yang terbagi ke dalam tiga peran utama:

A. Serangga Penyerbuk (Pollinators) dan Keberhasilan Reproduksi

Banyak tanaman budidaya, khususnya hortikultura (buah-buahan dan sayuran), bersifat self-incompatible atau membutuhkan vektor luar untuk fertilisasi. Serangga penyerbuk seperti lebah liar, tawon, kupu-kupu, dan lalat syrphid mengisi relung ini. Keberadaan mereka meningkatkan arsitektur genetika tanaman melalui penyerbukan silang yang menghasilkan biji dan buah dengan kualitas biologis yang lebih baik.

B. Musuh Alami: Predator dan Parasitoid

Predator (seperti kumbang koksidi dan capung) mengonsumsi banyak mangsa sepanjang hidupnya. Sementara itu, parasitoid (seperti tawon *Trichogramma* spp.) memiliki mekanisme regulasi yang unik: mereka meletakkan telurnya di dalam tubuh atau telur hama, dan larva yang menetas akan memakan inangnya dari dalam secara perlahan hingga inang tersebut mati. Parasitoid bekerja dengan akurasi relung yang sangat spesifik, menjadikannya agen pengendali hayati yang sangat efisien dalam teori Pengendalian Hama Terpadu (PHT).

C. Makrofauna Tanah sebagai Insinyur Ekosistem (Ecosystem Engineers)

Cacing tanah, semut, dan rayap tanah tidak berinteraksi langsung dengan tajuk tanaman, tetapi mereka mengaktifkan relung bawah tanah (below-ground niche). Melalui aktivitas menggali dan mencerna bahan organik, mereka mengubah struktur fisik tanah, menciptakan makropori untuk aerasi, dan mempercepat siklus hara. Kehilangan makrofauna tanah akibat pemadatan tanah oleh mesin berat atau aplikasi nematisida akan mengeraskan tanah dan memutus jalur nutrisi alami tanaman.

12.4 Keanekaragaman Fungsional dan dan Jasa Ekosistem

Selama beberapa dekade, evaluasi biodiversitas dalam suatu ekosistem didominasi oleh pengukuran indeks kekayaan spesies (berapa banyak jenis spesies yang ada) dan pemerataan spesies. Namun, ekologi pertanian modern menyadari bahwa kelangsungan proses ekologis tidak hanya ditentukan oleh siapa spesies yang ada di sana, melainkan oleh apa yang dilakukan oleh spesies-spesies tersebut. Paradigma ini melahirkan konsep Keanekaragaman Fungsional (Functional Diversity).

Keanekaragaman fungsional didefinisikan sebagai variasi dari sifat-sifat fungsional (functional traits) dari seluruh organisme yang ada dalam suatu komunitas. Sifat fungsional adalah karakteristik morfologi, fisiologi, atau fenologi organisme yang memengaruhi performa mereka dan dampaknya terhadap fungsi ekosistem. Untuk memahaminya secara teoretis, kita dapat memetakan organisme ke dalam dua kategori sifat fungsional:

1. **Functional Effect Traits:** Sifat organisme yang secara langsung memengaruhi jalannya proses ekosistem (misalnya, kemampuan bakteri *Rhizobium* menambat nitrogen bebas di udara).
2. **Functional Response Traits:** Sifat yang menentukan bagaimana suatu organisme merespons perubahan lingkungan atau gangguan (misalnya, kemampuan tanaman berbiji keras untuk bertahan dari kebakaran lahan).

Untuk memahami bagaimana teori sifat fungsional ini bekerja di lapangan, kita dapat membedah karakteristik biologis beberapa organisme konkret yang umum ditemukan pada agroekosistem di Indonesia:

1. Bakteri *Bradyrhizobium japonicum* (Bawah Tanah / Below-ground)

Bakteri ini hidup bersimbiosis di dalam bintil akar tanaman legum (seperti kedelai atau kacang tanah).

- **Functional Effect Trait:** Memiliki kompleks enzim nitrogenase yang mampu memutus ikatan gas nitrogen (N_2) bebas di atmosfer untuk diubah menjadi amonium (NH_4^+) yang siap diserap oleh tanaman. Efek langsungnya adalah peningkatan ketersediaan hara nitrogen tanah secara gratis.
- **Functional Response Trait:** Kepekaan sintesis osmolit pelindung sel saat menghadapi stres osmotik. Ketika lahan mengalami kekeringan ekstrem, strain bakteri tertentu mampu mengonfigurasi permeabilitas dinding selnya agar tidak mengalami dehidrasi sehingga fungsi penambatan nitrogen tetap berjalan.

2. Laba-Laba Serigala / Wolf Spider (*Pardosa pseudoannulata*) (Atas Tanah / Above-ground)

Predator generalis yang sangat aktif berburu di permukaan air dan pangkal batang padi pada ekosistem sawah.

- **Functional Effect Trait:** Memiliki perilaku pemangsaan agresif dengan laju konsumsi fungsional yang tinggi. Seekor laba-laba serigala dewasa dapat memangsa hingga 10–20 ekor wereng batang coklat (*Nilaparvata lugens*) per hari, berkontribusi langsung pada fungsi penekanan populasi hama sawah.
- **Functional Response Trait:** Sifat kanibalisme intraspesifik dan kemampuan migrasi spasial. Ketika petani memanen padi dan mengeringkan lahan, ketersediaan mangsa jatuh bebas. Laba-laba ini merespons dengan memakan sesama yang berukuran lebih kecil atau bermutasi menjauh ke gulma pematang yang lembap agar tetap sintas hingga musim tanam berikutnya.

3. Lebah Tanpa Sengat / Klanceng (*Tetragonula laeviceps*) (Kanopi / Above-ground)

Serangga penyerbuk lokal berukuran kecil yang bersarang di rongga-rongga pohon atau bambu di sekitar pekarangan lahan pertanian.

- **Functional Effect Trait:** Memiliki struktur kaki belakang (*corbicula*) penyimpan polen serta perilaku floral fidelity (kesetiaan pada jenis bunga yang sama). Sifat ini menjadikannya agen penyerbukan silang tanaman hortikultura yang efisien untuk memacu fruit set.
- **Functional Response Trait:** Ukuran tubuh yang mikro (< 5 mm) dan toleransi jelajah suhu yang lebar. Tubuhnya yang kecil memungkinkan lebah ini tetap aktif mencari makan di bawah perlindungan kanopi daun saat terjadi angin kencang atau cuaca mendung, kondisi yang biasanya membuat lebah madu besar (*Apis dorsata*) berhenti terbang.

12.4.1 Klasifikasi Jasa Ekosistem (Ecosystem Services) dan Penimbangan Trade-off

Berdasarkan kerangka teoretis Millennium Ecosystem Assessment (2005), jasa ekosistem pertanian dibagi menjadi empat kategori fungsional:

1. **Jasa Penyediaan (Provisioning):** Produk material langsung yang dihasilkan oleh agroekosistem dan memiliki nilai ekonomi langsung. Contoh: gabah padi, buah-buahan, serat kapas, bahan obat herbal dari empon-empon.
2. **Jasa Pengaturan (Regulating):** Kontrol proses ekologis tak kasat mata yang menjaga keseimbangan lingkungan luar. Contoh: penahanan erosi tanah oleh akar rumput vertiver, sekuestrasi karbon oleh bahan organik tanah, pemurnian air, kontrol hayati populasi hama.
3. **Jasa Pendukung (Supporting):** Proses fundamental jangka panjang yang mendasari keberadaan semua jasa ekosistem lainnya. Contoh: siklus nutrisi (N, P, K) oleh mikroba, pembentukan lapisan tanah atas (topsoil) melalui dekomposisi bahan organik.
4. **Jasa Kultural (Cultural):** Manfaat non-material yang memengaruhi psikologis, estetika, dan spiritual manusia. Contoh: lanskap keindahan terasering sawah untuk ekowisata, nilai spiritual sistem ritual panen tradisional.

Dalam pengelolaannya, pertanian intensif terjebak dalam masalah pertimbangan trade off yang timpang. Ketika suatu kebijakan pertanian memaksimalkan Jasa Penyediaan secara agresif demi melipatgandakan tonase panen, hal tersebut hampir selalu dibayar mahal dengan anjloknya Jasa Pengaturan dan Jasa Pendukung. Penggunaan pupuk kimia sintetis berlebihan meracuni makrofauna tanah dan memicu eutrofikasi di perairan sekitar. Tugas ekologi pertanian di masa depan adalah mendesain agroekosistem yang mampu mengoptimalkan titik temu (synergy) di antara keempat kategori jasa tersebut.

12.5 Konservasi Keanekaragaman Hayati Pertanian di Indonesia

Dalam konteks agrobiodiversitas, lahan pertanian adalah medan tempur konservasi yang sesungguhnya. Untuk memahami bagaimana fauna dan flora pertanian dapat bertahan di tengah ekspansi manusia, kita harus meminjam jembatan teoretis dari Robert MacArthur dan E.O. Wilson (1967): Teori Biogeografi Pulau (Theory of Island Biogeography).

Di dalam lanskap pertanian modern, sisa-sisa hutan alami, sabuk hijau, pekarangan tradisional, atau koridor sungai bertindak seperti "Pulau" (Islands), sedangkan hamparan monokultur yang intensif, jalan aspal, dan pemukiman bertindak seperti "Laut" (Matrix) yang mengisolasi pulau-pulau tersebut.

Berdasarkan teori ini, kelestarian keanekaragaman hayati di lahan pertanian ditentukan oleh dua faktor utama:

1. Ukuran Habitat (Patch Size): Semakin besar luasan fragmen habitat alami yang tersisa di sekitar lahan pertanian, semakin rendah laju kepunahan (extinction rate) spesies fungsional di dalamnya.
2. Isolasi Spasial (Distance): Semakin jauh jarak antar-fragmen habitat, semakin sulit bagi organisme (seperti serangga predator atau burung hantu) untuk bermigrasi atau berpindah melakukan kolonisasi (colonization rate).

Jika matriks di luar pulau terlalu homogen dan beracun akibat penggunaan pestisida ekstrem, organisme bermanfaat akan terjebak, mengalami penurunan perkawinan silang (inbreeding), dan lambat laun punah secara lokal.

Oleh karena itu, pendekatan teoretis modern bergeser menuju Konservasi Berbasis Lanskap, yang memperdebatkan dua strategi utama:

- Land-Sparing (Penghematan Lahan): Memisahkan secara tegas antara kawasan pertanian intensif hasil tinggi di satu sisi, dan kawasan konservasi alam murni di sisi lain.
- Land-Sharing (Berbagi Lahan): Mengintegrasikan fungsi konservasi langsung ke dalam lahan produksi dengan menanam tanaman pelindung,

pagar hidup (hedgerows), dan pertanian multikultur sehingga seluruh lanskap pertanian ramah bagi biodiversitas.

12.5.1 Strategi Komplementer: Konservasi In-situ dan Ex-situ

Di Indonesia, perlindungan terhadap plasma nutfah pertanian (varietas lokal dan kerabat liar/CWR) dilakukan melalui kombinasi dua strategi teoretis yang saling melengkapi:

A. Konservasi Ex-situ (Di Luar Habitat Alami)

Strategi ini memindahkan materi genetik tanaman dari lokasi aslinya ke fasilitas buatan manusia untuk mengantisipasi kepunahan total di alam. Di Indonesia, strategi ini dijalankan melalui Bank Benih Nasional (seperti yang dikelola oleh Balai Besar Pengujian Standar Instrumen Bioteknologi dan Sumber Daya Genetik Pertanian / BB Biogen, serta BRIN). Benih disimpan dalam kondisi suhu ekstrem di bawah nol derajat Celsius (cryopreservation). Kelemahannya secara teoretis adalah pembekuan proses evolusi; benih yang disimpan tidak lagi berinteraksi dengan perubahan iklim dan patogen aktual yang bermutasi di ladang.

B. Konservasi In-situ / On-farm (Di Dalam Sistem Produksi)

Strategi ini membiarkan varietas lokal dan kerabat liar tetap ditanam, dikelola, dan diseleksi secara dinamis oleh petani di lahan mereka sendiri. Di Indonesia, bentuk konservasi in-situ skala mikro yang paling efektif adalah sistem Pekarangan Rumah. Prof. Otto Soemarwoto (1987) membuktikan bahwa pekarangan masyarakat Indonesia yang menggabungkan tanaman semusim, tanaman kayu tahunan, ternak, dan kolam ikan menciptakan struktur kanopi berlapis (multilayer canopy) yang meniru arsitektur hutan hujan alami. Di sini, proses adaptasi genetik berjalan secara real-time terhadap perubahan iklim mikro.

BAB 13

SISTEM PERTANIAN TUMPANG SARI DAN POLIKULTUR

13.1 Konsep dan Rasionalitas Sistem Tumpang Sari

Sistem tumpang sari merupakan salah satu bentuk polatanam dimana pada suatu lahan ditanam dua atau lebih jenis tanaman pada periode waktu yang sama atau pada periode waktu yang saling tumpang tindih. Polatanam ini disebut juga sebagai polikultur (Sullivan, 1998). Berbeda dari rotasi tanaman yang memisahkan jenis tanaman secara temporal, tumpang sari menekankan koeksistensi tanaman dalam satu ruang produksi sehingga interaksi antarspesies menjadi bagian dari desain agronomis. Secara konseptual, sistem tumpang sari ini dilandasi oleh adanya permasalahan pada polatanam monokultur yang cenderung menyederhanakan ekosistem pertanian, meningkatkan ketergantungan pada input eksternal, dan memperbesar risiko kegagalan produksi akibat meningkatnya serangan hama dan penyakit, fluktuasi iklim, atau harga pasar. Dalam konteks tersebut, tumpang sari bukan sekadar teknik menanam beberapa komoditas dalam satu bidang, melainkan strategi ekologis untuk mengatur kompetisi, komplementaritas, dan fasilitasi antar tanaman (Vandermeer, 1992).

Dari aspek agronomi, polatanam tumpang sari dapat meningkatkan efisiensi penggunaan sumber daya seperti cahaya, air, unsur hara, ruang tumbuh, dan waktu tanam (Shiddieq and Sudira, 2018). Sistem ini juga dikaitkan dengan peningkatan stabilitas hasil, pengurangan risiko produksi, pengendalian gulma, pengelolaan hama dan penyakit, serta perbaikan fungsi ekosistem pertanian. Pengukuran klasik untuk menilai keuntungan tumpang sari adalah **Land Equivalent Ratio** atau LER, yaitu rasio luas lahan monokultur yang diperlukan untuk menghasilkan output setara dengan satu satuan luas lahan tumpang sari. Nilai LER lebih dari 1 menunjukkan bahwa tumpang sari lebih

efisien secara penggunaan lahan dibandingkan monokultur (Mead and Willey, 1980; Liu *et al.*, 2018).

13.1.1 Konsep Dasar Sistem Tumpang Sari

Tumpang sari dapat dipahami sebagai sistem produksi tanaman yang menggabungkan dua prinsip utama: **diversifikasi spasial** dan **diversifikasi temporal**. Diversifikasi spasial terjadi ketika beberapa tanaman menempati ruang tumbuh berbeda dalam satu bidang, misalnya tanaman tinggi dengan tanaman rendah, tanaman berakar dalam dengan tanaman berakar dangkal, atau tanaman utama dengan tanaman penutup tanah. Diversifikasi temporal terjadi ketika fase pertumbuhan tanaman tidak sepenuhnya bersamaan, sehingga puncak kebutuhan sumber daya tidak terjadi pada waktu yang sama (Juventia *et al.*, 2022; Assopi *et al.*, 2025).

Tumpang sari terdiri dari beberapa bentuk yaitu Mixed intercropping menanam berbagai tanaman tanpa pola barisan yang tegas. Row intercropping menempatkan tanaman dalam barisan berbeda. Strip intercropping menggunakan jalur tanaman yang cukup lebar untuk dikelola secara terpisah, tetapi masih memungkinkan interaksi ekologis. Relay intercropping menanam tanaman kedua sebelum tanaman pertama dipanen, sehingga ada tumpang tindih waktu pertumbuhan. Berbagai catatan literatur menunjukkan bahwa bentuk tumpang sari sangat bergantung pada tujuan seperti peningkatan hasil, konservasi tanah, penekanan gulma, pengendalian hama, penyediaan pakan, pengurangan risiko, atau efisiensi tenaga kerja (Lithourgidis *et al.*, 2011; Stomph *et al.*, 2020).

Pada polatanam tumpang sari terdapat **komplementaritas sumber daya**. Dimana dua atau lebih tanaman saling kompatibel apabila jenis tanaman tersebut menggunakan sumber daya secara berbeda sehingga kompetisi langsung dapat dihindari. Contohnya, kombinasi tanaman berakar dalam dan dangkal dapat mengeksplorasi lapisan tanah yang berbeda. Tanaman tinggi dapat menyediakan naungan parsial bagi tanaman yang toleran terhadap intensitas cahaya lebih rendah. Legum dapat memperkaya sistem melalui fiksasi nitrogen biologis, meskipun manfaatnya sangat dipengaruhi jenis legum, kondisi tanah, manajemen residu, dan waktu ketersediaan nitrogen bagi tanaman pendamping (Hanifa *et al.*, 2025; Mapegau *et al.*, 2025).

13.1.2 Rasionalitas Agronomis Sistem Tumpang Sari

Rasionalitas pertama sistem tumpang sari adalah **efisiensi penggunaan lahan**. Pada lahan terbatas, terutama dalam sistem pertanian rakyat, satu bidang tanah perlu menghasilkan lebih dari satu output. Tumpang sari memungkinkan petani memperoleh hasil utama, hasil sekunder, pakan ternak, biomassa, atau produk bernilai ekonomi tambahan dari area yang sama. LER menjadi indikator penting untuk membaca rasionalitas ini. Jika satu hektar tumpang sari menghasilkan kombinasi output yang membutuhkan lebih dari satu hektar monokultur untuk menghasilkan jumlah yang sama, maka sistem tersebut memiliki keunggulan penggunaan lahan (Stomph *et al.*, 2020; Xu *et al.*, 2020).

Rasionalitas kedua adalah **efisiensi sumber daya tumbuh**. Monokultur sering kali meninggalkan ruang ekologis yang tidak sepenuhnya dimanfaatkan, baik secara vertikal, horizontal, maupun temporal. Tumpang sari mencoba mengisi ruang tersebut melalui arsitektur tanaman yang berbeda. Misalnya, tanaman sereal yang tinggi dapat dikombinasikan dengan legum rendah; tanaman dengan tajuk renggang dapat dipadukan dengan tanaman penutup tanah; tanaman berumur panjang dapat disisipi tanaman berumur pendek pada fase awal pertumbuhan. Dengan desain yang tepat, interaksi ini dapat meningkatkan pemanfaatan cahaya, kelembapan tanah, dan hara (Mead and Willey, 1980; Stomph *et al.*, 2020)

Rasionalitas ketiga adalah **stabilitas hasil**. Dalam sistem monokultur, kegagalan satu komoditas dapat langsung berarti kegagalan ekonomi lahan tersebut. Dalam tumpang sari, risiko disebar ke beberapa tanaman. Jika satu tanaman terganggu oleh kekeringan, hama, atau harga rendah, tanaman lain dapat tetap memberikan hasil. Inilah alasan tumpang sari banyak berkembang pada sistem pertanian kecil, lahan marginal, dan wilayah dengan ketidakpastian iklim tinggi. Literatur diversifikasi pertanian menunjukkan bahwa diversifikasi dapat mendukung ketahanan sistem produksi melalui penyebaran risiko dan peningkatan fungsi ekosistem (Weih, Mínguez and Tavoletti, 2022).

13.1.3 Rasionalitas Ekologis Sistem Tumpang Sari

Kontribusi penting sistem tumpang sari adalah peningkatan kompleksitas ekosistem pertanian. Keanekaragaman ini dapat meningkatkan habitat bagi organisme tanah, serangga menguntungkan, musuh alami hama, dan mikrobiota rizosfer. Dalam kerangka agroekologi, peningkatan keanekaragaman bukan tujuan estetis, melainkan instrumen untuk memperkuat fungsi ekosistem seperti daur hara, regulasi hama, konservasi air, penutupan tanah, dan stabilisasi iklim mikro (Tamburini *et al.*, 2020).

Pada aspek tanah, tumpang sari dapat memperbaiki penutupan permukaan tanah sehingga menekan erosi, mengurangi evaporasi, dan menghambat pertumbuhan gulma. Pada sistem tumpangsari dengan legum, tumpang sari juga berpotensi memperbaiki neraca nitrogen, terutama apabila biomassa legum dikembalikan ke tanah. Namun, manfaat ini tidak otomatis. Jika tanaman legum dipanen seluruh biomasanya tanpa pengembalian residu, kontribusi terhadap tanah dapat berkurang. Karena itu, rasionalitas ekologis tumpang sari selalu bergantung pada desain tanaman, kepadatan, jarak tanam, pemupukan, pengelolaan residu, dan kondisi agroklimat (Brooker *et al.*, 2015).

Rasionalitas perlindungan tanaman dalam tumpang sari bertumpu pada gagasan bahwa keragaman tanaman dapat mengganggu dominasi organisme pengganggu tertentu. Pada monokultur, hama atau patogen spesifik tanaman memiliki sumber pakan dan inang yang melimpah serta homogen. Pada tumpang sari, heterogenitas tanaman dapat menghambat pergerakan hama, mengganggu pencarian inang, atau meningkatkan keberadaan musuh alami. Sistem seperti **trap cropping**, **repellent intercrops**, dan **push-pull cropping** merupakan contoh penerapan prinsip ini. (Sidauruk *et al.*, 2015; Sidauruk, Panjaitan and Sipayung, 2024).

Berbagai laporan mengindikasikan bahwa peningkatan diversitas tanaman tidak selalu otomatis meningkatkan predator hama atau hasil panen. Dalam sejumlah kasus, tanaman perangkap dapat menarik hama tetapi tidak cukup menahan hama agar tidak kembali ke tanaman utama. Karena itu, tumpang sari untuk perlindungan tanaman perlu dirancang dengan mempertimbangkan perilaku hama, jarak antar tanaman, waktu tanam, daya tarik tanaman

perangkap, serta strategi tambahan seperti sanitasi lahan atau pengendalian mekanis (Sidauruk and Sipayung, 2018).

Pada pengendalian gulma, tumpang sari bekerja melalui penutupan tajuk dan kompetisi terhadap ruang tumbuh. Tanaman sela yang cepat menutup tanah dapat mengurangi cahaya yang mencapai permukaan tanah, sehingga menekan perkecambahan dan pertumbuhan gulma. Namun, bila tanaman sela terlalu kompetitif, ia juga dapat menekan tanaman utama. Oleh sebab itu, rasionalitas tumpang sari terletak pada kemampuan mengatur keseimbangan antara kompetisi terhadap gulma dan kompetisi antar tanaman budidaya. (Yadollahi *et al.*, 2014; Tamburini *et al.*, 2020)

13.1.4 Rasionalitas Ekonomi Sistem Tumpang Sari

Rasionalitas ekonomi tumpang sari perlu dinilai lebih luas daripada hasil per hektar satu tanaman. Monokultur mungkin menghasilkan produksi tinggi untuk satu komoditas, tetapi tumpang sari dapat memberikan **total nilai ekonomi** yang lebih stabil melalui kombinasi produk. Oleh karena itu, evaluasi tumpang sari perlu mencakup LER, pendapatan bersih, benefit-cost ratio, kebutuhan tenaga kerja, risiko harga, stabilitas hasil antar musim, dan nilai non-pasar seperti konservasi tanah atau pengurangan pestisida.

Meskipun tumpang sari memiliki banyak potensi, literatur menunjukkan bahwa keberhasilannya tidak otomatis. Ada beberapa resiko yang mungkin terjadi pada penerapan polatanam tumpangsari. Risiko pertama adalah **kompetisi negatif** antar tanaman. Jika dua tanaman memiliki kebutuhan hara, air, cahaya, dan ruang tumbuh yang sama pada waktu yang sama, maka tumpang sari dapat menurunkan hasil salah satu atau seluruh komponen tanaman. Oleh karena itu, pemilihan pasangan tanaman menjadi inti keberhasilan (Xu *et al.*, 2020). Resiko kedua adalah **kesulitan penetapan jenis tanaman**. Kombinasi yang berhasil di satu agroekosistem belum tentu berhasil di lokasi lain. Tanah, curah hujan, suhu, varietas, kesuburan lahan, tekanan hama, dan tujuan petani sangat menentukan hasil. Hal ini menjelaskan mengapa tumpang sari harus dipahami sebagai prinsip desain, bukan resep tunggal (Stomph *et al.*, 2020).

13.2 Interaksi Kompetisi dan Fasilitasi antar Tanaman

Interaksi antar tanaman merupakan dasar ekologis dari sistem pertanian majemuk seperti tumpang sari, agroforestri, tanaman penutup tanah, living mulch, dan campuran varietas. Dalam ekologi tanaman, dua bentuk interaksi yang paling menentukan kinerja komunitas tanaman adalah **kompetisi** dan **fasilitasi**. Kompetisi terjadi ketika dua atau lebih tanaman menggunakan sumber daya yang sama dan ketersediaannya terbatas, seperti cahaya, air, nitrogen, fosfor, ruang perakaran, atau penyerbuk. Fasilitasi terjadi ketika satu tanaman meningkatkan pertumbuhan, kelangsungan hidup, atau hasil tanaman lain melalui modifikasi lingkungan, penyediaan sumber daya, perlindungan mikroklimat, pengurangan tekanan biotik, atau dukungan struktural (Callaway and Walker, 1997).

Dalam sistem pertanian, kompetisi dan fasilitasi tidak berdiri sebagai dua kategori yang sepenuhnya terpisah. Keduanya sering berlangsung bersamaan, berubah menurut umur tanaman, kepadatan populasi, jarak tanam, ketersediaan air, kesuburan tanah, dan tekanan organisme pengganggu. Karena itu, keberhasilan tumpang sari tidak ditentukan oleh ada atau tidaknya kompetisi, tetapi oleh kemampuan merancang sistem agar **kompetisi negatif ditekan** dan **fasilitasi ekologis diperkuat** (Montesinos, 2015). Literatur mutakhir menempatkan tumpang sari sebagai bagian dari diversifikasi pertanian yang dapat meningkatkan jasa ekosistem, efisiensi sumber daya, stabilitas hasil, dan ketahanan sistem produksi jika desain spesies, varietas, ruang, dan waktu dikelola secara tepat (Stomph *et al.*, 2020; Tamburini *et al.*, 2020). Diversifikasi pertanian dapat mempromosikan berbagai jasa ekosistem tanpa harus mengorbankan hasil.

13.2.1 Konsep Kompetisi antar Tanaman

Kompetisi antar tanaman muncul ketika kebutuhan ekologis dua tanaman bertumpang tindih. Dalam konteks agronomi, kompetisi dapat dibedakan menjadi **kompetisi atas tanah**, **kompetisi atas cahaya**, **kompetisi atas air**, **kompetisi atas unsur hara**, dan **kompetisi atas ruang tajuk maupun akar**. Kompetisi dapat terjadi secara intraspesifik, yaitu antar individu dari spesies yang sama, atau interspesifik, yaitu antar spesies berbeda. Pada monokultur, kompetisi intraspesifik mendominasi; pada tumpang sari, kompetisi

interspesifik menjadi lebih penting karena dua tanaman atau lebih tumbuh dalam satu ruang dan waktu (Fowler, 1986).

Kompetisi tidak selalu merugikan sistem secara keseluruhan. Dalam beberapa kasus, tanaman yang lebih kompetitif terhadap gulma justru memberi keuntungan sistem karena menekan organisme yang tidak diinginkan. Namun, kompetisi menjadi masalah ketika tanaman pendamping mengurangi hasil tanaman utama secara tidak proporsional. Misalnya, tanaman sela yang tumbuh terlalu cepat dapat menaungi tanaman utama, menyerap nitrogen pada fase awal, atau mendominasi air tanah pada musim kering (Aschehoug *et al.*, 2016).

Dalam sistem tumpang sari, indikator yang sering digunakan untuk membaca hasil bersih interaksi kompetisi dan fasilitasi adalah **Land Equivalent Ratio** atau LER. LER membandingkan luas lahan monokultur yang diperlukan untuk menghasilkan output setara dengan satu satuan luas tumpang sari. Nilai LER lebih dari 1 menunjukkan keuntungan penggunaan lahan. Nilai tersebut dapat muncul karena komplementaritas sumber daya, fasilitasi nutrisi, pengurangan hama, atau sekadar karena salah satu tanaman sangat dominan. Oleh karena itu, LER perlu dibaca bersama indikator lain seperti partial LER, agresivitas tanaman, competitive ratio, relative crowding coefficient, indeks panen, efisiensi penggunaan air, dan serapan hara (Hamzei and Seyedi, 2015).

13.2.2 Konsep Fasilitasi antar Tanaman

Fasilitasi antar tanaman adalah interaksi positif ketika keberadaan satu tanaman memperbaiki kondisi bagi tanaman lain. Dalam sistem pertanian, bentuk fasilitasi yang paling banyak dibahas adalah **fasilitasi hara**, terutama oleh legum melalui fiksasi nitrogen biologis. Legum dapat meningkatkan nitrogen sistem melalui hubungan simbiotik dengan rhizobia, walaupun manfaat langsung bagi tanaman non-legum bergantung pada spesies, waktu tanam, dekomposisi residu, sinkronisasi mineralisasi, dan kondisi tanah. Fasilitasi nitrogen sering lebih jelas dalam sistem jangka panjang atau ketika biomassa legum dikembalikan ke tanah (Warman and Kristiana, 2018). Fasilitasi juga dapat terjadi melalui mobilisasi fosfor. Beberapa tanaman mengeksudasi asam organik atau enzim fosfatase yang membantu melarutkan fosfor yang kurang tersedia, sehingga tanaman lain di sekitarnya dapat

memperoleh manfaat. Selain itu, fasilitasi melalui **modifikasi mikroklimat**, misalnya tanaman tinggi memberikan naungan parsial bagi tanaman bawah yang sensitif terhadap panas atau radiasi berlebih. Dalam agroforestri, pohon dapat memoderasi suhu, kelembapan, dan angin; namun pada kepadatan berlebih, pohon yang sama dapat menjadi pesaing utama air dan cahaya. (Hairiah, van Noordwijk and Suprayogo, 2002).

13.2.3 Interaksi Kompetisi–Fasilitasi dalam Tumpang Sari

Pada tumpang sari, hasil akhir merupakan resultan dari kompetisi dan fasilitasi. Sistem yang berhasil biasanya memiliki tiga ciri. Pertama, terdapat **diferensiasi relung**, yaitu tanaman menggunakan sumber daya yang berbeda dalam ruang atau waktu. Kedua, terdapat **komplementaritas fungsional**, misalnya kombinasi tanaman tinggi–rendah, akar dalam–dangkal, cepat tumbuh–lambat tumbuh, atau sereal–legum. Ketiga, terdapat **manajemen kepadatan dan waktu tanam** yang mencegah dominasi satu tanaman (Rasmussen *et al.*, 2024).

Desain tumpangsari yang produktif harus mempertimbangkan hasil, stabilitas, dan efisiensi sumber daya secara bersamaan melalui rekayasa interaksi yang membutuhkan pemilihan varietas, proporsi tanam, pola baris, waktu tanam, dan pengelolaan input (Stomph *et al.*, 2020). Dalam sistem sereal–legum, sereal biasanya lebih kompetitif terhadap cahaya dan nitrogen mineral, sedangkan legum berkontribusi melalui fiksasi nitrogen dan peningkatan kualitas residu. Pada sistem jagung–kacang, jagung dapat memberi dukungan struktural, tetapi juga dapat menaungi kacang. Pada sistem tanaman utama–cover crop, cover crop dapat menekan gulma dan memperbaiki tanah, tetapi harus dikendalikan agar tidak bersaing dengan tanaman utama. Pada agroforestri, pohon dapat menyediakan naungan, seresah, mikrohabitat, dan perlindungan angin, tetapi juga dapat bersaing kuat atas air, cahaya, dan hara.

Arah interaksi antar tanaman dipengaruhi oleh beberapa faktor utama yaitu:

1. **identitas spesies dan varietas.** Varietas berumur genjah, berakar moderat, atau bertajuk tegak mungkin lebih kompatibel dibanding varietas yang terlalu agresif.

2. **rasio populasi.** Proporsi tanaman yang tidak seimbang dapat membuat satu spesies taaman mendominasi.
3. **pola ruang.** Barisan ganda, strip, atau relay dapat mengubah intensitas kompetisi.
4. **waktu tanam.** Tanaman sela yang ditanam lebih lambat dapat mengurangi kompetisi awal terhadap tanaman utama.
5. **kesuburan tanah.** Pada tanah miskin atau tanah marjinal, fasilitasi hara dapat lebih berarti; pada tanah sangat subur, kompetisi cahaya mungkin lebih dominan.
6. **ketersediaan air.** Pada lahan kering, kompetisi air sering menjadi faktor pembatas.
7. **tekanan hama dan penyakit.** Diversifikasi dapat meningkatkan regulasi biologis, tetapi efeknya tergantung jenis hama, struktur vegetasi, dan lanskap.

13.3 Keuntungan Agroekologis Polikultur dibanding Monokultur

Keuntungan utama polikultur bukan terletak pada meningkatnya keragaman fungsional dalam agroekosistem. Keragaman fungsional ini mencakup perbedaan bentuk tajuk, kedalaman akar, kebutuhan hara, siklus hidup, toleransi naungan, kemampuan fiksasi nitrogen, daya tarik terhadap musuh alami hama, serta kontribusi terhadap penutupan tanah. Berbagai publikasi internasional secara konsisten menempatkan diversifikasi pertanian termasuk polikultur sebagai strategi penting untuk memulihkan jasa ekosistem tanpa selalu mengorbankan hasil panen. Diversifikasi pertanian dapat meningkatkan berbagai jasa ekosistem seperti biodiversitas, kualitas tanah, sekuestrasi karbon, dan profitabilitas meningkat seiring durasi praktik diversifikasi (Stomph et al., 2020; Alarcón Segura et al., 2022; Hüber et al., 2022; Raveloaritiana and Wanger, 2026).

Tabel 13.1: Keuntungan agroekologis polikultur dibanding monokultur

Dimensi agroekologis	Keuntungan polikultur	Mekanisme utama
Biodiversitas	Meningkatkan keanekaragaman tanaman, serangga, mikroba, dan organisme tanah	Variasi habitat, tajuk, akar, bunga, dan residu
Tanah	Memperbaiki struktur, bahan organik, infiltrasi, dan aktivitas biologi tanah	Penutupan tanah, akar beragam, residu organik campuran
Hara	Meningkatkan efisiensi dan daur hara	Fiksasi nitrogen, mobilisasi fosfor, perbedaan kedalaman akar
Hama dan penyakit	Mengurangi dominasi hama spesifik dan mendukung perkembangan musuh alami	Dilusi inang, tanaman perangkap, habitat predator dan parasitoid
Gulma	Menekan pertumbuhan gulma	Penutupan tajuk, kompetisi ruang, tanaman penutup
Air dan iklim mikro	Mengurangi evaporasi dan suhu ekstrem	Naungan, mulsa hidup, peningkatan infiltrasi
Produktivitas sistem	Meningkatkan total output dan efisiensi lahan	Komplementaritas sumber daya dan pembagian relung
Stabilitas hasil	Mengurangi risiko kegagalan total	Diversifikasi komoditas dan toleransi stres berbeda

Ketahanan sosial-ekologis	Meningkatkan fleksibilitas sistem petani	Keragaman produk, fungsi ekosistem, pengurangan input eksternal

13.4 Desain Sistem Tumpang Sari Berbasis Prinsip Ekologi

Pada sistem tumpang sari hal mendasar yang menjadi pertanyaan adalah **fungsi ekologis apa yang ingin dibangun dalam satu lahan?** Dalam pendekatan agroekologi, tumpang sari bukan sekadar pencampuran dua atau lebih tanaman, melainkan rekayasa hubungan antar tanaman agar terjadi komplementaritas sumber daya, fasilitasi biologis, pengendalian organisme pengganggu, perlindungan tanah, dan stabilitas hasil (Sidauruk, 2016). Praktik diversifikasi seperti intercropping, rotasi, campuran kultivar, agroforestri, bahan organik, dan integrasi tanaman-ternak dipandang sebagai instrumen ekologis yang bekerja melalui mekanisme berbeda, tetapi saling memperkuat.

Dengan demikian, sistem tumpang sari yang baik harus memenuhi tiga syarat utama: **produktif secara agronomis, efisien secara ekologis, dan layak secara manajerial**. Produktif berarti mampu menghasilkan total output yang setara atau lebih baik daripada monokultur. Efisien berarti mampu menggunakan cahaya, air, hara, ruang, dan waktu secara lebih lengkap. Layak berarti dapat diterapkan petani dengan sumber daya, tenaga kerja, alat, pengetahuan, dan pasar yang tersedia. Oleh karena itu dibutuhkan desain yang tepat sesuai dengan **prinsip ekologi** berikut ini:

13.4.1 Komplementaritas Relung

Prinsip paling mendasar dalam desain tumpang sari adalah **komplementaritas relung** atau *niche complementarity*. Dua atau lebih tanaman sebaiknya dipilih karena memiliki cara berbeda dalam menggunakan sumber daya. Perbedaan itu dapat berupa tinggi tanaman, bentuk tajuk, kedalaman akar, umur panen, kebutuhan cahaya, kebutuhan hara, toleransi naungan, dan pola pertumbuhan (Xing *et al.*, 2023). Contoh sederhana adalah menggabungkan tanaman tinggi dengan tanaman rendah, tanaman berakar dalam dengan tanaman berakar dangkal, atau tanaman berumur panjang dengan tanaman berumur pendek. Kombinasi seperti ini mengurangi

kompetisi langsung karena masing-masing tanaman menempati ruang ekologis yang berbeda.

13.4.2 Mengatur Kompetisi agar Tidak Menekan Tanaman Utama

Kompetisi dalam tumpang sari tidak dapat dihilangkan, tetapi dapat diatur. Karena itu, desain tumpang sari harus mengidentifikasi **fase kritis kompetisi**, terutama fase awal pertumbuhan, pembentukan tajuk, pembungaan, pengisian biji, atau pembentukan umbi. Pengaturan kompetisi dapat dilakukan melalui jarak tanam, rasio populasi, waktu tanam, orientasi barisan, pemangkasan, penjarangan, dan pemilihan varietas. Misalnya, tanaman sela dapat ditanam lebih lambat agar tidak mengganggu fase awal tanaman utama. Tanaman yang terlalu agresif dapat ditempatkan dalam barisan terpisah atau strip yang lebih lebar. Sistem tumpang sari yang produktif memerlukan pengaturan interaksi antar tanaman agar kompetisi negatif dikurangi dan pemanfaatan sumber daya meningkat (Stomph *et al.*, 2020).

13.4.3 Memperkuat Fasilitas antar Tanaman

Polatanam ttumpang sari harus dirancang untuk memperkuat fasilitas, yaitu keadaan ketika satu tanaman memperbaiki kondisi tumbuh tanaman lain. Fasilitas dapat terjadi melalui beberapa mekanisme.

1. fasilitas nitrogen. Tanaman legum dapat memfiksasi nitrogen atmosfer melalui simbiosis dengan rhizobia. Nitrogen ini tidak selalu langsung berpindah dalam jumlah besar ke tanaman non-legum pada musim yang sama, tetapi kontribusinya penting melalui residu akar, biomassa, seresah, dan peningkatan bahan organik tanah. Karena itu, sereal-legum menjadi kombinasi klasik dalam desain tumpang sari.
2. fasilitas iklim mikro. Tanaman tinggi dapat memberikan naungan parsial, mengurangi suhu permukaan tanah, mengurangi evaporasi, dan melindungi tanaman bawah dari stres radiasi atau angin. Prinsip ini penting pada sistem agroforestri, kebun campuran, tanaman sela di perkebunan, serta lahan tropis kering.
3. fasilitas perlindungan tanaman. Tanaman tertentu dapat mengganggu pencarian inang oleh hama, menyediakan nektar bagi parasitoid, menjadi

habitat predator, atau berfungsi sebagai tanaman perangkap. Namun, manfaat ini bersifat kontekstual. Tanaman pendamping harus dipilih berdasarkan hubungan ekologisnya dengan hama, musuh alami, dan tanaman utama.

4. fasilitasi struktur fisik. Tanaman tegak dapat menjadi penopang tanaman merambat. Contoh klasik adalah jagung sebagai penopang kacang rambat, atau tanaman berkayu sebagai penyangga tanaman panjat dalam sistem kebun campuran.

13.4.4 Diversifikasi Fungsional

Dalam agroekologi, yang lebih penting adalah **keragaman fungsi**, bukan sekadar jumlah spesies. Dua tanaman yang sangat mirip kebutuhan ekologisnya dapat menimbulkan kompetisi tinggi. Sebaliknya, dua tanaman dengan fungsi berbeda dapat saling melengkapi (Tamburini *et al.*, 2020).

13.4.5 Menutup Tanah untuk Mengurangi Erosi, Gulma, dan Kehilangan Air

Tanah terbuka adalah titik lemah agroekosistem. Permukaan tanah yang terbuka mudah mengalami erosi, kehilangan air melalui evaporasi, peningkatan suhu, pemadatan, dan invasi gulma. Karena itu, desain tumpang sari berbasis ekologi harus memasukkan prinsip **penutupan tanah**. Penutupan tanah dapat dicapai melalui tanaman penutup, legum merambat, tanaman sela cepat tumbuh, mulsa hidup, atau residu tanaman. Tanaman penutup berfungsi menekan gulma, memperbaiki struktur tanah, meningkatkan bahan organik, dan mengurangi limpasan (Rochmah, Suwanto and Muliasari, 2020). Pada lahan kering dan tropis, tumpang sari yang mampu menutup tanah secara cepat dapat meningkatkan efisiensi air dan stabilitas produksi, terutama ketika musim hujan tidak menentu (Yohana *et al.*, 2022).

13.4.6 Model Desain Ekologis Tumpang Sari

Dalam menetapkan desain tumpang sari perlu diperhatikan langkah langkah berikut ini: (1) Menetapkan tujuan utama (2) Memahami kondisi agroekologi Lahan dan (3) Memilih tanaman utama dan tanaman pendamping.

Ada beberapa model desain ekologis polatanam tumpangsari:

1. Model Serealia-Legum: Serealia seperti jagung, sorgum, atau padi gogo biasanya memiliki pertumbuhan tajuk kuat dan kebutuhan nitrogen tinggi. Legum seperti kedelai, kacang tanah, kacang hijau, atau kacang tunggak dapat menutup tanah dan memperbaiki neraca nitrogen sistem. Rasional ekologisnya adalah kombinasi antara produktivitas karbon dari serealia dan fungsi nitrogen dari legum.
2. Model Tanaman Tahunan–Tanaman Sela: Pada perkebunan muda atau tanaman tahunan yang tajuknya belum menutup, ruang antarbaris dapat dimanfaatkan untuk tanaman sela. Contohnya kelapa sawit muda dengan jagung atau kacang-kacangan, kelapa dengan kakao atau pisang, serta karet muda dengan tanaman pangan. Rasional ekologisnya adalah memanfaatkan ruang kosong, menekan gulma, menambah pendapatan awal, dan memperbaiki tanah.
3. Model Multi-Strata Tropis: Model multi-strata meniru struktur vegetasi alami dengan beberapa lapisan tajuk. Sistem ini umum dalam agroforestri, kebun campuran, pekarangan, dan sistem tanaman perkebunan. Tanaman tinggi memberikan struktur dan iklim mikro, tanaman sedang mengisi lapisan produksi utama, dan tanaman bawah menutup tanah atau menghasilkan produk tambahan. Rasional ekologisnya adalah optimalisasi cahaya vertikal, konservasi tanah, iklim mikro stabil, biodiversitas tinggi, dan diversifikasi pendapatan.
4. Model Tanaman Utama–Tanaman Penutup Tanah: Model ini menggunakan tanaman penutup untuk melindungi tanah, menekan gulma, dan memperbaiki bahan organik. Sistem ini cocok pada lahan miring, perkebunan, atau lahan yang rawan erosi. Tantangan utamanya adalah mengelola tanaman penutup agar tidak menjadi pesaing utama bagi air dan hara.

13.5 Contoh Sistem Polikultur Tradisional dan Modern di Indonesia

Di Indonesia, polikultur sudah berkembang secara tradisional sesuai dengan pengalaman ekologis petani, kebutuhan rumah tangga, adat lokal, dan adaptasi terhadap kondisi lahan tropis. Selanjutnya sistem polikultur modern berkembang sesuai dengan tujuan peningkatan produktivitas, efisiensi input, konservasi tanah, pengendalian hama, diversifikasi pendapatan, dan adaptasi perubahan iklim. Perbedaan utamanya bukan pada jumlah tanaman, melainkan pada **cara sistem dirancang**. Polikultur tradisional biasanya bersifat kompleks, lokal, multi-fungsi, dan bertahap secara turun-temurun. Polikultur modern cenderung lebih terencana, menggunakan varietas unggul, jarak tanam terukur, kalender tanam, input terkontrol, dan indikator evaluasi seperti hasil, pendapatan, Land Equivalent Ratio, efisiensi hara, atau penurunan serangan organisme pengganggu tanaman (Kugbe *et al.*, 2018).

13.5.1 Sistem Polikultur Tradisional di Indonesia

Ada beberapa sistem polikultur tradisional yang ditemukan di Indonesia:

1. Polikultur Pekarangan: Sistem ini berkembang luas di Jawa, Sunda, Madura, Bali, dan berbagai wilayah lain dengan variasi lokal. Pekarangan ditanami campuran tanaman pangan, buah, rempah, obat, tanaman hias, tanaman kayu, pakan ternak, serta kadang dikombinasikan dengan unggas, kambing, kolam ikan, atau kandang ternak.
2. Kebun Campuran: biasanya berupa lahan kering dengan tanaman tahunan, tanaman kayu, bambu, buah-buahan, tanaman obat, rempah, dan tanaman pangan musiman.
3. Repong damar: merupakan agroforestri tradisional masyarakat Krui, Lampung Barat, yang menggabungkan damar mata kucing (*Shorea javanica*) dengan berbagai tanaman buah, kayu, rempah, dan tanaman bawah.
4. Parak: kebun campuran yang terdiri durian, manggis, petai, jengkol, kelapa, pinang, kayu manis, kopi, pisang, bambu, tanaman obat, dan tanaman pangan lokal.

5. Tumpang Sari Ladang: terutama pada lahan kering, petani menerapkan tumpang sari tradisional seperti jagung dengan kacang tanah, jagung dengan kacang tunggak, jagung dengan ubi kayu, atau padi gogo dengan jagung dan legum.
6. Padi–Ikan Tradisional: polikultur yang menggabungkan tanaman padi dengan ikan air tawar dalam satu lahan sawah. Dalam praktik tradisional, ikan dipelihara di sawah selama fase tertentu pertumbuhan padi atau setelah tanam hingga menjelang panen.

13.5.2 Sistem Polikultur Modern di Indonesia

Ada beberapa sistem polikultur modern yang ditemukan di Indonesia:

1. Tumpang sari Tanaman semusim: Dalam desain modern, pola tanam dapat berupa 1 baris jagung: 1 baris kedelai, 2 baris jagung: 1 baris kedelai, atau sistem strip. Jarak tanam disesuaikan agar jagung tidak terlalu menaungi kedelai. Pemupukan juga diatur agar kebutuhan jagung terpenuhi tanpa menekan pembentukan bintil akar legum. Tujuan sistem ini adalah meningkatkan produktivitas lahan, efisiensi nitrogen, pendapatan ganda, dan stabilitas hasil.
2. Tumpang sari Tanaman Tahunan-Tanaman Semusim: Pada lahan kering, sistem modern yang cukup relevan adalah kombinasi ubi kayu, jagung, dan kacang tanah. Ubi kayu memiliki umur panjang dan pertumbuhan awal relatif lambat, sehingga ruang antarbaris dapat dimanfaatkan untuk jagung atau kacang tanah pada fase awal.
3. Tumpang sari Tanaman Semusim-Tanaman Refugia: Sistem refugia adalah bentuk polikultur modern yang menempatkan tanaman berbunga di pematang sawah atau tepi lahan untuk mendukung musuh alami hama. Tanaman seperti bunga matahari, kenikir, kembang kertas, wijen, kacang-kacangan, atau tanaman berbunga lokal dapat menyediakan nektar, polen, dan habitat bagi parasitoid dan predator (Maesyaroh *et al.*, 2022)
4. Agroforestri: menggabungkan beberapa tanaman tahunan pada suatu lahan dengan mempertimbangkan kebutuhan tanaman terhadap cahaya matahari (Nair *et al.*, 2010).

5. Aquaponik: Polikultur modern juga berkembang dalam bentuk integrasi tanaman–ikan berbasis teknologi. Limbah metabolik ikan diubah oleh mikroorganisme menjadi nutrisi bagi tanaman, sementara tanaman membantu menyerap nutrisi dan memperbaiki kualitas air (Krastanova *et al.*, 2022).

Tabel 13.2: Perbandingan polikultur tradisional dan modern di Indonesia

Aspek	Polikultur Tradisional	Polikultur Moder
Dasar pengembangan	Pengetahuan lokal, adat, pengalaman turun-temurun	Perkembangan agronomi, agroekologi, teknologi budidaya
Struktur tanaman	Kompleks, banyak spesies, sering multi-strata	Lebih terukur, jumlah spesies lebih terbatas
Tujuan utama	Pangan, obat, kayu, budaya, risiko, pendapatan	Produktivitas, efisiensi input, konservasi, pasar
Contoh	Pekarangan, talun, dusun, repong damar, parak	Jagung–kedelai, agroforestri kopi, agroforestri kakao, tanaman refugia, mina-padi modern
Keunggulan	Biodiversitas tinggi, resilien, lokal-adaptif	Mudah dievaluasi, dapat direplikasi, kompatibel dengan pasar
Kelemahan	Sulit distandardisasi, produktivitas komoditas utama bisa rendah	Dapat terlalu teknis, kadang mengurangi kompleksitas ekologis
Ukuran keberhasilan	Ketersediaan pangan, stabilitas, fungsi sosial-ekologis	Hasil, pendapatan, LER, efisiensi input, jasa ekosistem

BAB 14

SISTEM AGROFORESTRI: INTEGRASI POHON DALAM PERTANIAN

14.1 Pengertian, Klasifikasi, dan Manfaat Agroforestri

Agroforestri merupakan salah satu bentuk pengelolaan lahan yang mempertemukan prinsip prinsip kehutanan dan pertanian dalam satu sistem produksi yang saling berhubungan. Dalam pengertian yang paling mendasar, agroforestri bukan hanya praktik menanam pohon di sekitar lahan pertanian, melainkan suatu sistem penggunaan lahan yang secara sengaja mengintegrasikan tanaman berkayu, tanaman pertanian, dan atau ternak dalam satu kesatuan ruang maupun waktu. Integrasi tersebut dirancang agar setiap komponen tidak berdiri sendiri, tetapi saling berinteraksi secara ekologis, ekonomis, dan sosial. FAO mendefinisikan agroforestri sebagai sistem pengelolaan lahan yang menggabungkan tanaman berkayu tahunan, seperti pohon, perdu, palem, atau bambu, dengan tanaman pertanian dan atau hewan dalam bentuk susunan ruang atau urutan waktu tertentu, serta di dalamnya terdapat interaksi ekologis dan sosial ekonomi antar komponen (FAO, 2026).

Dalam perkembangan ilmu agroforestri modern, Nair (1993) menjelaskan bahwa sistem agroforestri harus memiliki tiga ciri utama. Pertama, terdapat paling sedikit dua komponen biologis, yaitu tanaman berkayu dan tanaman pertanian atau ternak. Kedua, sistem tersebut menghasilkan lebih dari satu jenis keluaran, baik berupa produk maupun jasa lingkungan. Ketiga, terdapat interaksi yang nyata antar-komponen, baik dalam bentuk saling mendukung maupun saling bersaing. Interaksi inilah yang menjadi inti dari agroforestri. Pohon dapat memberikan naungan yang mengurangi tekanan suhu bagi tanaman tertentu, tetapi naungan yang terlalu rapat dapat menurunkan intensitas cahaya dan menghambat pertumbuhan tanaman bawah. Pohon dapat memperbaiki kesuburan tanah melalui serasah, tetapi akar pohon juga dapat bersaing dengan tanaman pertanian dalam menyerap air dan unsur hara. Oleh

karena itu, agroforestri harus dipahami sebagai sistem yang memerlukan pengaturan, bukan sekadar campuran tanaman.

Tabel 14.1: Klasifikasi Agroforestri Berdasarkan Komponen Penyusun

Jenis Sistem	Komponen Utama	Ciri-ciri	Contoh di Lapangan	Manfaat Utama
Agrisilvikultur (Pohon + Tanaman Pertanian)	Pohon (berkayu) + Tanaman pertanian (tahunan atau semusim)	- Dua komponen utama (pohon & tanaman) - Diatur dalam ruang atau waktu - Interaksi ekologis dan ekonomi antar-komponen	- Jagung/ kacang tanah di antara jati, sengon, mahoni - Kopi bernaungan - Kakao bernaungan - Jahe, kunyit, porang di bawah tegakan pohon	- Diversifikasi hasil - Pendapatan jangka pendek dan jangka panjang - Perbaikan kesuburan tanah - Konservasi tanah dan air
Silvopastura (Pohon + Ternak/ Padang Penggembalaan)	Pohon (berkayu) + Ternak atau hijauan pakan/ padang penggembalaan	- Integrasi pohon dengan ternak - Pohon berfungsi sebagai pakan, naungan, pagar hidup, sumber kayu	- Padang penggembalaan di bawah tegakan akasia, gamal, lamtoro - Ternak kambing/ sapi di kebun pohon pakan	- Pakan ternak berkelanjutan - Naungan & kenyamanan ternak - Perbaikan tanah (serasah & fiksasi N) - Kayu bakar & pagar hidup
Agrosilvopastura (Pohon + Tanaman Pertanian + Ternak)	Pohon (berkayu) + Tanaman pertanian + Ternak	- Tiga komponen utama dalam satu unit pengelolaan - Aliran bahan organik dan energi saling terkait	- Pekarangan multiguna (buah, sayuran, rempah, unggas/ kambing) - Kebun campuran dengan sapi/ kambing	- Diversifikasi produk (pangan, pakan, kayu) - Efisiensi penggunaan sumber daya - Ketahanan ekonomi rumah tangga

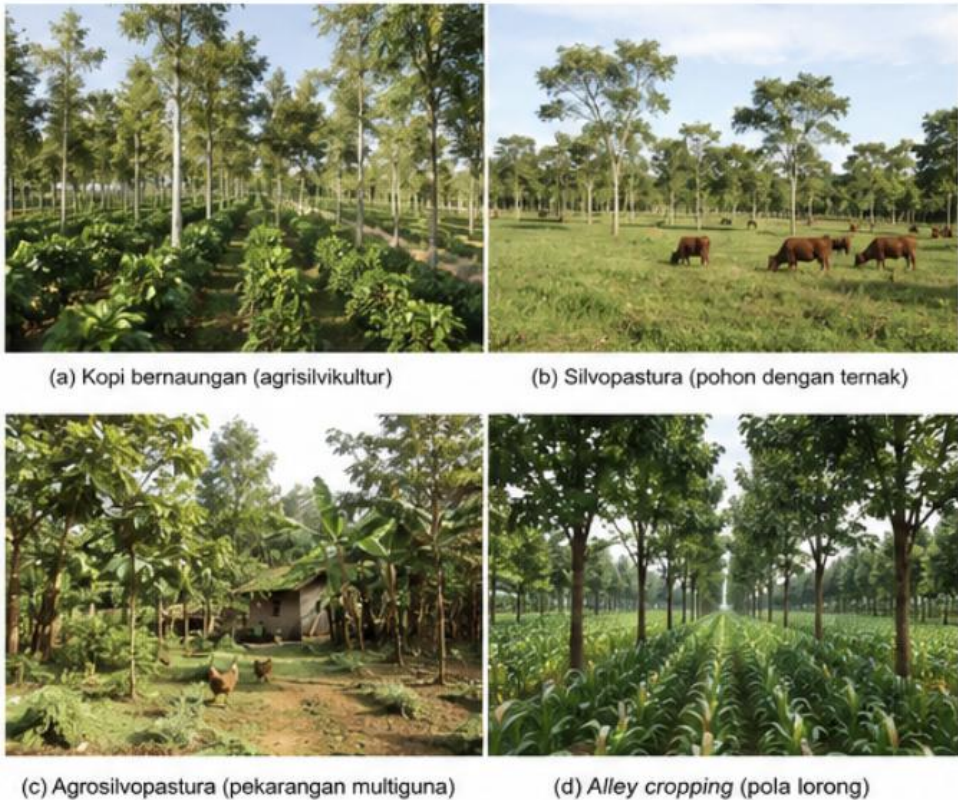
Tabel 14.2: Klasifikasi Agroforestri Berdasarkan Pola Ruang dan Waktu

Dasar Klasifikasi	Tipe Pola/Sistem	Deskripsi	Contoh Penerapan
Pola Ruang (Spatial Arrangement)	Pola campuran (<i>mixed</i>)	Pohon dan tanaman pertanian ditanam secara tidak beraturan dalam satu bidang	Pekarangan, kebun campuran
	Pola barisan/lorong (<i>alley cropping</i>)	Pohon ditanam dalam barisan/lorong, ruang di antaranya untuk tanaman pertanian	Jagung di antara barisan lamtoro, gamal, turi
	Pola batas lahan (<i>boundary planting</i>)	Pohon ditanam di tepi/batas lahan sebagai pagar hidup atau penahan angin	Pagar hidup gamal, lamtoro, glirisidia di batas sawah
	Pola multistrata (<i>multistrata</i>)	Terdapat susunan tajuk bertingkat (dari bawah ke atas)	Kebun kopi bernaungan, kebun buah campuran
Urutan Waktu (Temporal Arrangement)	Sistem simultan (<i>simultaneous</i>)	Pohon dan tanaman/ ternak dikelola pada waktu yang sama	Kopi di bawah naungan, ternak di bawah tegakan pohon
	Sistem sekuensial (<i>sequential</i>)	Komponen pohon dan tanaman hadir secara bergantian dalam siklus waktu	Improved fallow (bera) dengan penanaman lamtoro/gamal

Sumber: Nair (1993); FAO (2026); van Noordwijk (2019) (diolah)

Manfaat agroforestri dapat dijelaskan dari tiga dimensi utama, yaitu ekologis, ekonomi, dan sosial. Dari sisi ekologis, agroforestri berperan penting dalam konservasi tanah dan air. Tajuk pohon mengurangi energi pukulan air hujan sebelum mencapai permukaan tanah. Serasah daun dan ranting membentuk lapisan penutup tanah yang menekan penguapan, memperbaiki struktur tanah, dan meningkatkan kandungan bahan organik. Sistem perakaran pohon membantu memperkuat agregat tanah, meningkatkan porositas, dan memperbesar kemampuan tanah dalam menyerap air. Pada lahan miring,

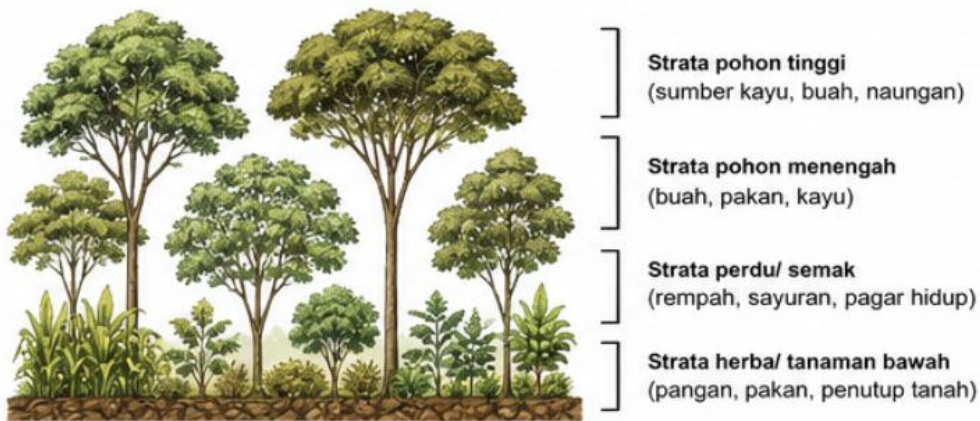
keberadaan pohon dan tanaman bawah dapat mengurangi limpasan permukaan serta menekan erosi. Oleh karena itu, agroforestri memiliki peran penting pada lahan kering, lahan berlereng, dan wilayah pertanian yang rentan mengalami degradasi.



Gambar 14.1: Contoh Sistem Agroforestri di Lapangan

Berdasarkan komponen penyusunnya, agroforestri secara umum dapat diklasifikasikan menjadi tiga kelompok utama, yaitu agrisilvikultur, silvopastura, dan agrosilvopastura. Agrisilvikultur merupakan sistem yang menggabungkan tanaman berkayu dengan tanaman pertanian. Contohnya adalah tanaman jagung, kacang tanah, jahe, kunyit, atau porang yang ditanam di antara barisan sengon, jati, mahoni, atau tanaman buah. Sistem kopi bernaungan dan kakao bernaungan juga termasuk dalam agrisilvikultur karena tanaman perkebunan dikelola bersama pohon penayang. Pada sistem ini, petani

memperoleh hasil jangka pendek dari tanaman semusim atau tanaman perkebunan, serta hasil jangka panjang dari pohon kayu atau pohon buah.



Gambar 14.2: Struktur Vertikal (Multistrata) dalam Agroforestri

Dengan demikian, agroforestri dapat dipahami sebagai sistem pengelolaan lahan yang berupaya menyeimbangkan produktivitas pertanian, keberlanjutan ekologi, dan ketahanan sosial-ekonomi masyarakat. Sistem ini tidak menggantikan pertanian, tetapi memperkaya pertanian melalui kehadiran pohon. Agroforestri juga tidak sama dengan hutan alam, karena tetap berada dalam ruang pengelolaan manusia yang diarahkan untuk memenuhi kebutuhan hidup. Kekuatan agroforestri terletak pada kemampuannya membangun hubungan yang lebih seimbang antara manusia, tanaman, ternak, tanah, air, dan lanskap. Dalam konteks pembangunan pertanian berkelanjutan, agroforestri menjadi pendekatan penting karena mampu menjawab persoalan degradasi lahan, ketidakpastian iklim, penurunan kesuburan tanah, kehilangan biodiversitas, dan kerentanan ekonomi petani secara bersamaan.

14.2 Interaksi Pohon–Tanaman Semusim dalam Sistem Agroforestri

Bayala dan Prieto (2020) menjelaskan bahwa hubungan pohon dan tanaman dalam memperoleh air tidak hanya dapat dilihat sebagai kompetisi sederhana, karena akar pohon juga berperan dalam pengambilan, pembagian, dan redistribusi air di dalam profil tanah. Beberapa pohon berakar dalam mampu mengangkat air dari lapisan tanah bawah ke lapisan yang lebih atas melalui

proses yang dikenal sebagai hydraulic lift atau hydraulic redistribution. Air yang berpindah ke lapisan atas tersebut dapat membantu menjaga kelembapan tanah di sekitar akar tanaman lain, meskipun besarnya manfaat sangat dipengaruhi oleh jenis pohon, kondisi tanah, perbedaan kelembapan antar-lapisan tanah, dan musim. Dalam praktiknya, pemahaman tentang kedalaman dan sebaran akar sangat penting agar desain agroforestri tidak menimbulkan persaingan air yang berlebihan.

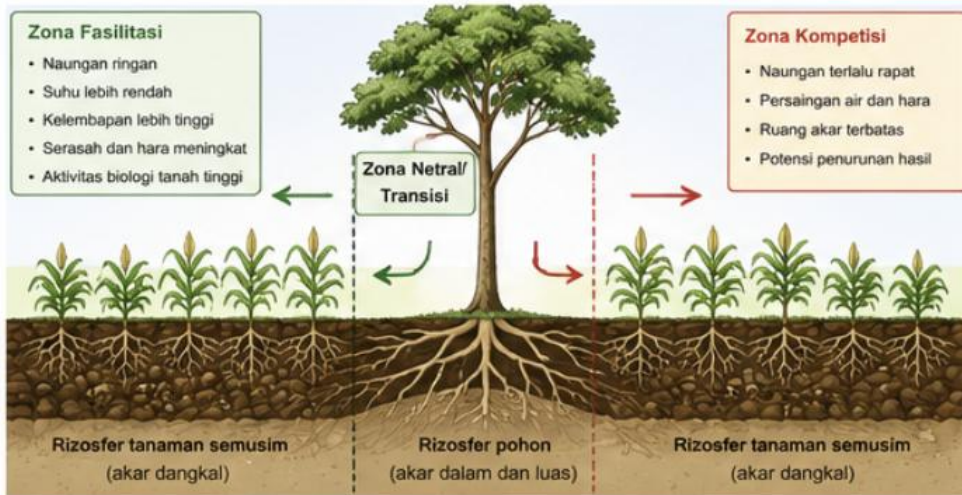
Tabel 14.3: Interaksi Pohon-Tanaman Semusim dalam Sistem Agroforestri

Jenis Interaksi	Mekanisme Utama	Dampak Negatif (Kompetisi)	Dampak Positif (Fasilitasi)	Faktor yang Mempengaruhi
Cahaya	Naungan tajuk pohon mengurangi intensitas cahaya yang diterima tanaman semusim	- Fotosintesis menurun - Pertumbuhan terhambat - Hasil tanaman semusim menurun	- Menurunkan suhu dan radiasi - Mengurangi evaporasi tanah - Melindungi dari angin kencang - Menguntungkan tanaman toleran naungan	- Jenis pohon dan arsitektur tajuk - Kerapatan dan jarak tanam - Tinggi pemangkasan - Musim dan posisi matahari - Jenis tanaman semusim
Air	Pohon dan tanaman semusim menyerap air dari tanah dengan kedalaman akar yang berbeda	- Persaingan pada lapisan tanah atas - Kekeringan tanah lebih cepat - Menurunkan hasil tanaman	- Akar dalam meningkatkan infiltrasi - Redistribusi air (<i>hydraulic lift</i>) - Menjaga kelembapan tanah - Mengurangi limpasan permukaan	- Kedalaman dan sebaran akar - Curah hujan dan musim - Tekstur dan kedalaman tanah - Ketersediaan air tanah - Jenis tanaman semusim
Unsur Hara	Pohon mempengaruhi siklus hara melalui serasah, fiksasi nitrogen, dan pengambilan hara dari lapisan dalam	- Pohon menyerap hara lebih banyak - Kekurangan hara pada tanaman semusim	- Serasah menambah bahan organik - Peningkatan ketersediaan N, P, K - Pemompaan hara dari lapisan dalam - Memperbaiki aktivitas biologi tanah	- Jenis pohon (<i>leguminosa/non legum</i>) - Kualitas dan jumlah serasah - Laju dekomposisi - Status hara awal tanah - Pengelolaan pemupukan
Tanah & Struktur	Akar pohon memperbaiki struktur tanah dan meningkatkan bahan organik	- Kompetisi ruang akar - Akar pohon dapat menghambat akar tanaman semusim	- Struktur tanah lebih baik - Kapasitas simpan air meningkat - Erosi berkurang - Aktivitas mikroorganisme meningkat	- Jenis dan pertumbuhan akar - Kandungan bahan organik - Kemiringan lahan - Pengelolaan mulsa/serasah
Iklim Mikro	Tajuk pohon memodifikasi iklim mikro di sekitar tanaman semusim	- Kelembapan terlalu tinggi - Sirkulasi udara rendah - Risiko penyakit meningkat	- Suhu lebih rendah dan stabil - Angin berkurang - Mengurangi stres panas dan kekeringan	- Kerapatan tajuk - Waktu dan intensitas pemangkasan - Letak dan arah angin dominan - Musim
Biologi & Alelopati	Pohon mempengaruhi organisme lain dan dapat melepaskan senyawa alelopatik	- Alelopati menghambat perkecambahan/pertumbuhan - Menjadi inang hama/penyakit	- Menyediakan habitat musuh alami - Meningkatkan penyerbuk - Diversitas organisme tanah meningkat	- Jenis pohon dan tanaman sela - Keragaman vegetasi - Penggunaan pestisida - Pola pengelolaan lahan

Sumber: Modifikasi dari Nair (1993); Schroth & Sinclair (2003); Jose (2009); Bayala & Prieto (2020); Nair, Kumar & Nair (2021)

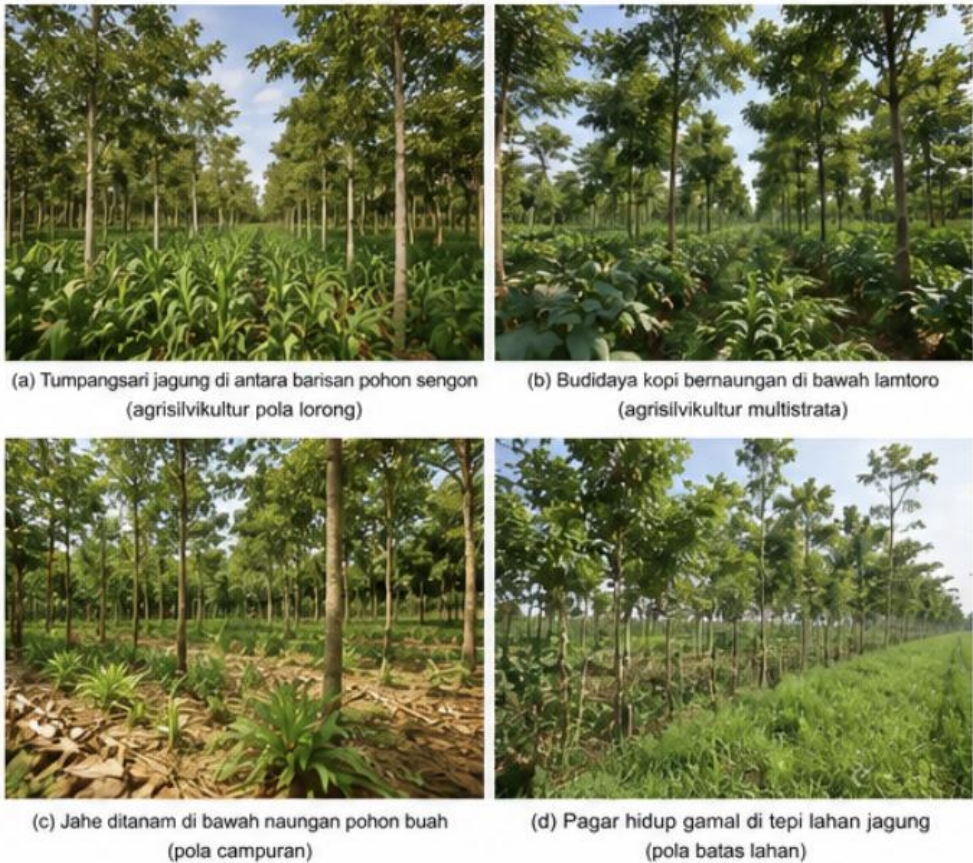
Interaksi terhadap unsur hara juga menjadi ciri penting agroforestri. Pohon dapat memperbaiki kesuburan tanah melalui serasah daun, ranting, bunga, buah, dan akar halus yang mati lalu terurai menjadi bahan organik. Bahan organik tersebut memperbaiki struktur tanah, meningkatkan kapasitas tukar kation, memperbaiki daya simpan air, dan menjadi sumber energi bagi mikroorganisme tanah. Pohon berakar dalam juga dapat mengambil unsur hara dari lapisan tanah bawah dan mengembalikannya ke permukaan melalui guguran serasah. Proses ini sering disebut sebagai pemompaan hara. Pada pohon leguminosa seperti lamtoro, gamal, kaliandra, turi, dan dadap, kontribusi terhadap kesuburan tanah dapat bertambah melalui kemampuan

bersimbiosis dengan bakteri penambat nitrogen. Namun, manfaat hara tersebut tidak terjadi secara otomatis. Kecepatan dekomposisi serasah, kualitas bahan organik, rasio karbon dan nitrogen, kelembapan tanah, serta aktivitas mikroorganisme sangat menentukan seberapa cepat unsur hara tersedia bagi tanaman semusim (Schroth and Sinclair, 2003; Nair, Kumar and Nair, 2021).



Gambar 14.3: Zona Interaksi Pohon dan Tanaman Semusim

Interaksi pohon–tanaman semusim juga perlu dilihat dari sudut produktivitas lahan secara keseluruhan. Dalam agroforestri, penurunan hasil salah satu komponen belum tentu berarti sistem gagal, karena hasil total dapat berasal dari beberapa komponen. Misalnya, hasil jagung di bawah pohon mungkin lebih rendah dibandingkan monokultur jagung, tetapi petani memperoleh tambahan hasil dari kayu, buah, pakan, atau jasa konservasi tanah. Oleh karena itu, penilaian agroforestri sebaiknya tidak hanya menggunakan ukuran hasil tanaman semusim per musim, tetapi juga mempertimbangkan hasil total lahan, stabilitas produksi, nilai ekonomi jangka panjang, dan manfaat ekologis. Pendekatan ini sejalan dengan pandangan agroforestri sebagai sistem multifungsi, bukan sistem produksi tunggal (Jose, 2009; Kuyah et al., 2019).



Gambar 14.4: Contoh Agroforestri Pohon - Tanaman Semusim di Lapangan

Dari sisi pengelolaan, interaksi yang merugikan dapat dikurangi melalui beberapa cara. Pemangkasan tajuk dilakukan untuk mengatur cahaya dan mengurangi transpirasi pohon. Pemangkasan cabang juga menghasilkan biomassa yang dapat digunakan sebagai mulsa atau pakan ternak. Pengaturan jarak tanam membantu mengurangi kompetisi akar dan tajuk. Pemilihan jenis pohon leguminosa dapat meningkatkan masukan nitrogen dan bahan organik. Penggunaan mulsa dari serasah dapat memperbaiki kelembapan tanah. Pada lahan miring, penempatan pohon mengikuti kontur dapat membantu mengurangi erosi dan limpasan permukaan. Dengan demikian, pengelolaan agroforestri tidak hanya bertujuan menjaga pohon tetap hidup, tetapi mengatur agar hubungan pohon dan tanaman semusim berada pada titik yang menguntungkan.



(a) Naungan terlalu rapat – pertumbuhan jagung terhambat



(b) Naungan optimal – jagung tumbuh baik

Gambar 14.5: Perbandingan Naungan pada Tanaman Semusim

Dengan demikian, interaksi pohon–tanaman semusim dalam agroforestri tidak dapat dinilai secara sederhana sebagai hubungan yang selalu menguntungkan atau selalu merugikan. Interaksi tersebut merupakan proses dinamis yang berubah menurut waktu, ruang, jenis tanaman, iklim, tanah, dan cara pengelolaan. Pohon dapat menjadi pesaing, tetapi juga dapat menjadi pelindung. Pohon dapat menurunkan hasil tanaman semusim apabila tidak dikelola, tetapi dapat meningkatkan keberlanjutan lahan apabila dipilih dan ditempatkan dengan tepat. Inti dari agroforestri bukan sekadar mencampur tanaman, melainkan mengelola hubungan antar-komponen agar terbentuk keseimbangan antara produksi, konservasi, dan ketahanan penghidupan petani.

14.3 Pengaruh Pohon terhadap Sifat Tanah dan Iklim Mikro

Tanah dalam agroforestri bukan sekadar media tumbuh, melainkan pusat berlangsungnya interaksi antara akar, air, unsur hara, bahan organik, mikroorganisme, dan aktivitas manusia. Pohon memengaruhi tanah melalui beberapa jalur. Pertama, pohon menghasilkan serasah berupa daun, ranting, bunga, buah, dan akar halus yang mati. Serasah tersebut kemudian terurai dan menjadi sumber bahan organik tanah. Kedua, akar pohon membantu memperbaiki struktur tanah, meningkatkan porositas, dan memperkuat agregat tanah. Ketiga, pohon berakar dalam dapat mengambil air dan unsur hara dari lapisan tanah bawah, kemudian mengembalikannya ke permukaan melalui guguran serasah. Keempat, tajuk pohon melindungi permukaan tanah dari pukulan langsung air hujan dan radiasi matahari yang berlebihan. Melalui mekanisme tersebut, pohon dapat berperan sebagai penghubung antara proses biologis, fisik, dan kimia tanah (Schroth and Sinclair, 2003; Nair, Kumar and Nair, 2021).

Aspek Tanah	Mekanisme Pengaruh Pohon	Dampak Positif terhadap Tanah	Contoh di Lapangan
 Sifat Fisik Tanah	- Akar membentuk pori dan kanal di dalam tanah - Serasah menutup permukaan tanah - Tajuk mengurangi pukulan hujan - Mengurangi limpasan permukaan	- Struktur tanah lebih remah dan stabil - Infiltrasi air meningkat - Erosi dan pemadatan tanah menurun - Suhu tanah lebih stabil - Kapasitas simpan air meningkat	- Kebun kopi bernaungan - Tumpangsari jagung dengan pohon lamtoro - Agroforestri di lahan miring
 Sifat Kimia Tanah	- Serasah menambah bahan organik - Leguminosa menambat nitrogen - Pemompaan hara oleh akar dalam - Dekomposisi serasah melepaskan hara	- Kandungan bahan organik & C-organik naik - Ketersediaan N, P, K meningkat - Kapasitas tukar kation meningkat - pH tanah lebih stabil (tergantung jenis pohon) - Kesuburan tanah meningkat	- Lamtoro, gamal, kaliandra pada kebun campuran - Sengon pada tumpangsari tanaman pangan
 Sifat Biologi Tanah	- Serasah dan eksudat akar sebagai sumber energi mikroba - Akar menyediakan habitat - Keragaman tanaman meningkat	- Aktivitas mikroorganisme meningkat - Populasi cacing tanah meningkat - Dekomposisi bahan organik lebih cepat - Keanekaragaman biota tanah meningkat - Siklus hara lebih efisien	- Kebun multistrata - Sistem agroforestri dengan penutup tanah
 Fungsi Kehidupan Tanah	- Perbaikan struktur, hara, dan biologi - Mikroklimat permukaan tanah membaik - Interaksi akar-mikroba yang sinergis	- Produktivitas tanaman lebih stabil - Ketahanan terhadap kekeringan meningkat - Cadangan karbon tanah meningkat - Ketahanan tanah terhadap degradasi meningkat	- Agroforestri kakao bernaungan - Kebun buah-buahan campuran - Sistem talun dan repong damar

Sumber: Schroth & Sinclair (2003); Muchane et al. (2020); Ngaba et al. (2024); Nair, Kumar & Nair (2021) (diolah)

Gambar 14.6: Pengaruh Pohon terhadap Sifat Tanah dalam Sistem Agroforestri

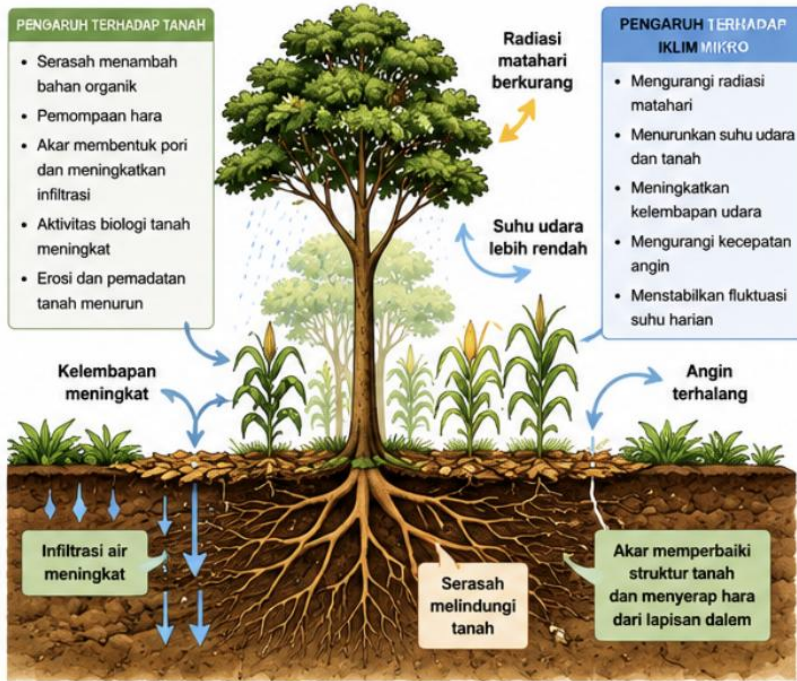
Salah satu pengaruh paling nyata dari pohon terhadap sifat tanah adalah peningkatan bahan organik. Serasah pohon yang jatuh ke permukaan tanah menjadi masukan penting bagi pembentukan humus. Bahan organik memperbaiki kemampuan tanah dalam menyimpan air, meningkatkan kapasitas tukar kation, memperbaiki struktur tanah, serta menyediakan energi bagi mikroorganisme tanah. Pada sistem pertanian monokultur yang terbuka, bahan organik sering kali berkurang karena sisa tanaman diangkut keluar lahan, tanah sering diolah, dan permukaan tanah lebih terbuka terhadap erosi. Sebaliknya, pada agroforestri, keberadaan pohon memungkinkan terjadinya masukan bahan organik secara lebih berkelanjutan. Semakin beragam jenis pohon dan semakin baik pengelolaan serasahnya, semakin besar peluang tanah memperoleh pasokan bahan organik secara terus-menerus.

Dalam konteks perubahan iklim, peran pohon terhadap tanah dan iklim mikro menjadi semakin penting. Peningkatan suhu, perubahan pola hujan, kekeringan, dan kejadian cuaca ekstrem dapat memperbesar tekanan terhadap sistem pertanian. Agroforestri dapat membantu mengurangi sebagian tekanan tersebut melalui peningkatan cadangan bahan organik tanah, perbaikan infiltrasi, pengurangan erosi, pengaturan suhu, dan perlindungan terhadap angin. Nair, Kumar and Nair (2021) menekankan bahwa agroforestri memiliki peran penting dalam pertanian berkelanjutan karena mampu menghubungkan produksi, konservasi tanah, penyimpanan karbon, dan ketahanan sistem pertanian. Namun, manfaat tersebut hanya dapat tercapai apabila pohon dikelola secara tepat dan tidak menimbulkan kompetisi berlebihan terhadap tanaman pertanian.

Komponen Iklim Mikro	Pengaruh Pohon	Dampak bagi Tanaman Semusim
 Radiasi Matahari	Tajuk mengurangi intensitas dan durasi radiasi yang mencapai permukaan tanah	Mengurangi stres panas, menjaga kelembapan, melindungi daun dari luka bakar, tetapi jika naungan terlalu rapat dapat menurunkan fotosintesis
 Suhu Udara dan Tanah	Naungan menurunkan suhu udara dan suhu permukaan tanah, menstabilkan fluktuasi suhu	Suhu lebih sejuk dan stabil, pertumbuhan akar lebih baik, aktivitas mikroba tanah meningkat
 Kelembapan Udara dan Tanah	Mengurangi evaporasi dan transpirasi berlebihan	Kelembapan relatif meningkat, tanaman lebih tahan kekeringan, ketersediaan air di tanah lebih terjaga
 Kecepatan Angin	Tajuk dan batang menghalangi aliran angin	Mengurangi kehilangan air, mengurangi kerusakan mekanis tanaman, menjaga stabilitas tanaman
 Hujan & Limpasan	Kanopi memecah energi hujan, serasah menahan percikan dan limpasan	Infiltrasi meningkat, limpasan & erosi menurun, cadangan air tanah meningkat

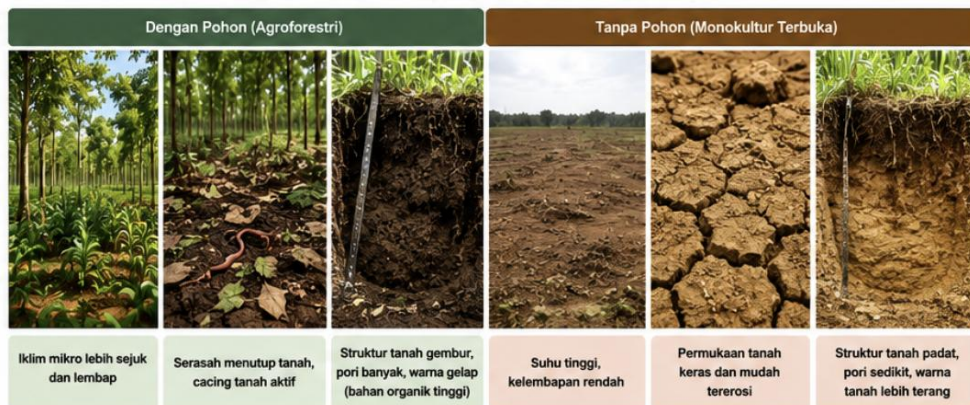
Sumber: Jose (2009); Nair, Kumar & Nair (2021); Visscher et al. (2023) (diolah)

Gambar 14.7: Pengaruh Pohon terhadap Iklim Mikro



Gambar 14.8: Mekanisme Pengaruh Pohon terhadap Tanah dan Iklim Mikro

Pengaruh pohon terhadap sifat tanah dan iklim mikro juga memiliki implikasi praktis bagi desain agroforestri. Pada tanah miskin bahan organik, pohon penghasil serasah berkualitas baik dan leguminosa dapat menjadi pilihan penting. Pada lahan miring, pohon sebaiknya ditempatkan mengikuti kontur untuk mengurangi erosi dan limpasan. Pada wilayah panas dan kering, pohon bertajuk sedang dapat membantu menurunkan suhu dan menjaga kelembapan. Pada wilayah lembap, pohon perlu dikelola agar tajuk tidak terlalu rapat dan sirkulasi udara tetap baik. Dengan demikian, desain agroforestri perlu memperhatikan hubungan antara jenis pohon, sifat tanah, iklim lokal, kebutuhan tanaman bawah, dan tujuan petani.



Sumber foto: Koleksi penulis di beberapa lokasi agroforestri (Indonesia)

Gambar 14.9: Kondisi Lahan dengan dan Tanpa Pohon

Dengan demikian, pohon dalam sistem agroforestri dapat dipahami sebagai pengatur tanah dan iklim mikro. Melalui serasah, akar, tajuk, dan proses biologis yang menyertainya, pohon mampu memperbaiki bahan organik, karbon tanah, struktur tanah, siklus hara, infiltrasi, suhu, kelembapan, dan perlindungan lahan. Namun, pengaruh tersebut tidak selalu otomatis menguntungkan. Pada kondisi tertentu, pohon juga dapat meningkatkan kompetisi air, cahaya, dan unsur hara. Oleh karena itu, agroforestri yang baik adalah agroforestri yang mampu menempatkan pohon sebagai penyangga fungsi ekologis tanpa mengabaikan kebutuhan tanaman pertanian dan kepentingan ekonomi petani. Keseimbangan antara fungsi tanah, iklim mikro, dan produktivitas inilah yang menjadi dasar penting dalam pengembangan sistem agroforestri yang berkelanjutan.

14.4 Agroforestri sebagai Strategi Konservasi dan Ketahanan Pangan

Sebagai strategi konservasi, agroforestri bekerja melalui kehadiran pohon di dalam lanskap pertanian. Pohon memiliki tajuk, akar, serasah, dan biomassa yang berperan dalam mengurangi erosi, memperbaiki struktur tanah, meningkatkan infiltrasi air, mempertahankan kelembapan, menyimpan karbon, dan menyediakan habitat bagi berbagai organisme. Pada lahan pertanian terbuka, tanah lebih mudah terpapar pukulan air hujan dan radiasi matahari langsung. Akibatnya, lapisan tanah atas dapat hilang melalui erosi,

bahan organik menurun, dan kemampuan tanah menyimpan air semakin rendah. Dalam agroforestri, tajuk pohon memecah energi air hujan, serasah melindungi permukaan tanah, sedangkan akar memperkuat tanah dan membantu pergerakan air ke dalam profil tanah. Dengan mekanisme ini, pohon tidak hanya menjadi komponen produksi, tetapi juga menjadi instrumen konservasi tanah dan air (Schroth and Sinclair, 2003; Muchane et al., 2020).

Tabel 14.4: Peran Agroforestri sebagai Strategi Konservasi

Aspek Konservasi	Mekanisme Pengaruh Pohon	Dampak Positif	Contoh dalam Agroforestri
Tanah	- Serasah menutupi permukaan tanah dan melindungi dari pukulan hujan - Akar memperbaiki struktur dan membentuk pori tanah - Pengembalian bahan organik berkelanjutan	- Erosi berkurang - Struktur tanah lebih stabil - Kandungan bahan organik & karbon tanah meningkat - Kesuburan tanah membaik	Kopi bernaungan, kebun campuran, sistem lorong (<i>alley cropping</i>), agroforestri di lahan miring
Air	- Tajuk mengurangi kecepatan hujan - Serasah meningkatkan infiltrasi - Akar meningkatkan porositas dan perkolasi	- Limpasan dan erosi menurun - Ketersediaan air tanah meningkat - Kelembapan tanah lebih terjaga - Risiko banjir berkurang	Pagar hidup, tanaman multi-strata, agroforestri di daerah aliran sungai
Keanekaragaman Hayati	- Struktur vegetasi beragam - Menyediakan habitat, pakan, dan tempat berlindung bagi flora dan fauna - Menghubungkan fragmen hutan	- Keanekaragaman flora & fauna meningkat - Populasi penyerbuk dan musuh alami hama terjaga - Jasa ekosistem meningkat	Kebun campuran, pekarangan beragam, hutan rakyat, kebun kopi/kakao bernaungan
Iklim & Karbon	- Pohon menyimpan karbon dalam biomassa dan tanah - Mengurangi suhu ekstrem - Mengurangi angin kencang	- Emisi GRK berkurang - Suhu mikro lebih stabil - Ketahanan terhadap perubahan iklim meningkat	Sistem agroforestri berbasis pohon kayu, buah, dan leguminosa
Lanskap	- Membentuk koridor ekologis - Mengurangi tekanan terhadap hutan alam - Menjaga fungsi penyangga	- Fragmentasi habitat berkurang - Tekanan eksploitasi hutan menurun - Kualitas ekosistem lanskap terjaga	Hutan rakyat, agroforestri di tepian hutan, kebun di daerah hulu DAS

Sumber: Schroth & Sinclair (2003); Muchane et al. (2020); Nair, Kumar & Nair (2021); FAO (2026)

Pada tingkat lanskap, agroforestri dapat menjadi bagian dari pendekatan konservasi yang lebih luas. Pohon dalam lahan pertanian dapat membentuk jalur hijau, pagar hidup, koridor satwa kecil, penyangga daerah aliran sungai, serta penutup lahan pada area miring atau marginal. Dalam sistem daerah aliran sungai, agroforestri dapat membantu mengurangi erosi di bagian hulu, menjaga infiltrasi air, dan mengurangi sedimentasi di bagian hilir. Pada lahan-lahan marginal, agroforestri dapat memulihkan fungsi lahan melalui kombinasi tanaman pionir, leguminosa, tanaman buah, tanaman pakan, dan tanaman kayu. Pendekatan ini menunjukkan bahwa agroforestri bukan hanya teknologi tingkat petak, tetapi juga strategi pengelolaan lanskap.



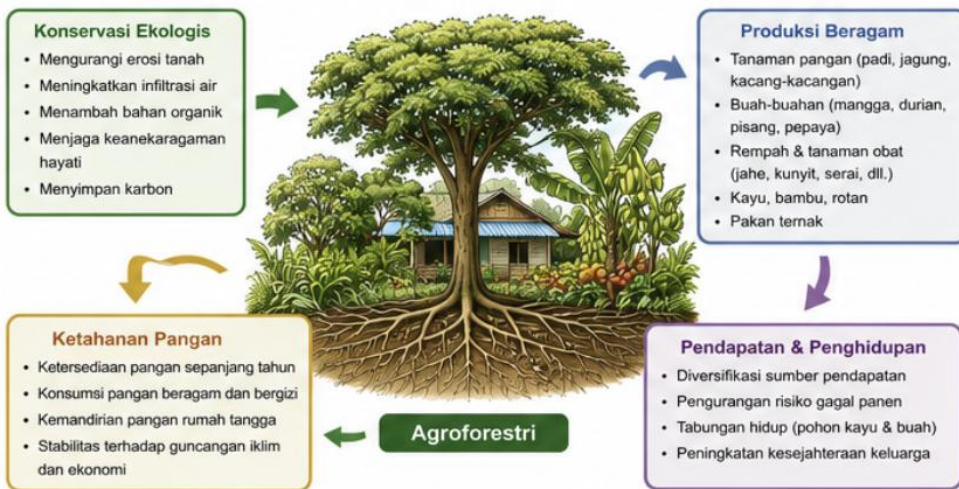
Gambar 14.10: Contoh Sistem Agroforestri dan Manfaat Konservasinya

Peran agroforestri dalam ketahanan pangan dapat dipahami melalui empat dimensi, yaitu ketersediaan pangan, akses pangan, pemanfaatan pangan, dan stabilitas pangan. Dari dimensi ketersediaan, agroforestri menyediakan berbagai jenis hasil dari satu bidang lahan. Tanaman semusim menghasilkan pangan dalam jangka pendek, pohon buah menghasilkan pangan musiman, tanaman perkebunan memberi pendapatan berkala, sedangkan pohon kayu atau tanaman tahunan menjadi aset jangka panjang. Dalam sistem pekarangan, misalnya, keluarga petani dapat memperoleh sayuran, buah, rempah, tanaman obat, telur, daging ternak kecil, kayu bakar, dan bahan pakan. Keragaman ini membuat agroforestri lebih dekat dengan konsep ketahanan pangan rumah tangga dibandingkan sistem monokultur yang hanya menghasilkan satu jenis komoditas.

Tabel 14.5: Peran Agroforestri dalam Ketahanan Pangan

Dimensi Ketahanan Pangan	Kontribusi Agroforestri	Contoh Bentuk Sistem	Manfaat bagi Rumah Tangga
Ketersediaan (Availability)	Menyediakan berbagai jenis pangan dan produk lain dari satu lahan.	Kebun campuran, pekarangan, kopi/kakao bernaungan.	Pangan tersedia sepanjang tahun, tidak tergantung satu komoditas.
Akses (Access)	Sumber pendapatan beragam untuk memperoleh pangan dan kebutuhan lainnya.	Agroforestri dengan pohon buah, kayu, rempah, pakan.	Pendapatan stabil dari berbagai produk; mengurangi kerentanan ekonomi.
Pemanfaatan (Utilization)	Meningkatkan keberagaman konsumsi dan kualitas gizi melalui produk beragam.	Pekarangan multistrata, kebun buah, sayuran, tanaman obat.	Asupan gizi lebih baik; kesehatan keluarga meningkat.
Stabilitas (Stability)	Mengurangi risiko gagal panen dan guncangan iklim melalui diversifikasi dan ketahanan ekosistem.	Sistem multistrata, agroforestri di lahan kering, kebun campuran.	Lebih tahan terhadap kekeringan, hama, fluktuasi harga, dan bencana.
Keberlanjutan (Sustainability)	Menjaga fungsi lahan, sumber daya alam, dan produktivitas jangka panjang.	Hutan rakyat, agroforestri di hulu DAS, sistem lorong, talun, tembawang.	Lahan tetap produktif untuk generasi mendatang; mendukung konservasi ekosistem.

Sumber: HLPE (2017); FAO (2026); Kuyah et al. (2019); Nair, Kumar & Nair (2021)



Sumber: Adaptasi dari Jose (2009); Nair, Kumar & Nair (2021); FAO (2026)

Gambar 14.11: Agroforestri dan Ketahanan Pangan Rumah Tangga

Agroforestri dapat dipahami sebagai strategi konservasi produktif. Sistem ini tidak memisahkan perlindungan lingkungan dari praktik pertanian, tetapi menyatukannya dalam satu tata kelola lahan. Melalui pohon, agroforestri membantu menjaga tanah, air, karbon, dan biodiversitas. Melalui tanaman pangan, buah, pakan, rempah, obat, dan hasil kayu, agroforestri mendukung

ketahanan pangan dan ekonomi rumah tangga. Dalam menghadapi degradasi lahan, perubahan iklim, dan kerentanan pangan, agroforestri menjadi salah satu pendekatan penting untuk membangun sistem pertanian yang lebih tangguh, beragam, dan berkelanjutan.

14.5 Model Agroforestri Lokal: Kasus dari Kepulauan Indonesia

Model agroforestri lokal umumnya lahir dari pengalaman panjang masyarakat dalam menyesuaikan proses produksi dengan kondisi lahan. Petani tidak hanya mempertimbangkan hasil ekonomi, tetapi juga keamanan pangan, ketersediaan kayu bakar, pakan ternak, tanaman obat, bahan bangunan, buah buahan, perlindungan tanah, serta hubungan sosial dengan keluarga dan komunitas. Dalam literatur agroforestri, praktik lokal Indonesia sering disebut sebagai contoh penting bagaimana pengetahuan tradisional dan fungsi ekologis dapat berjalan bersama. Tropenbos Indonesia (2024) mencatat bahwa praktik agroforestri di Indonesia telah berkembang selama berabad abad dan mencakup sistem sederhana hingga sistem yang sangat kompleks, termasuk komoditas seperti kopi, kakao, karet, rempah, pohon buah, pangan, dan pakan. Pada tingkat lokal, nama dan bentuk sistem tersebut berbeda beda. Di Jawa dikenal pekarangan dan talun, di Lampung dikenal repong damar, di Kalimantan dikenal tembawang, di Sumatra Barat dikenal parak, sementara di berbagai wilayah lain terdapat kebun campuran, hutan rakyat, kebun kopi bernaungan, kebun kakao, serta sistem pangan lokal berbasis pohon.

Tabel 14.6: Model Agroforestri Lokal di Kepulauan Indonesia

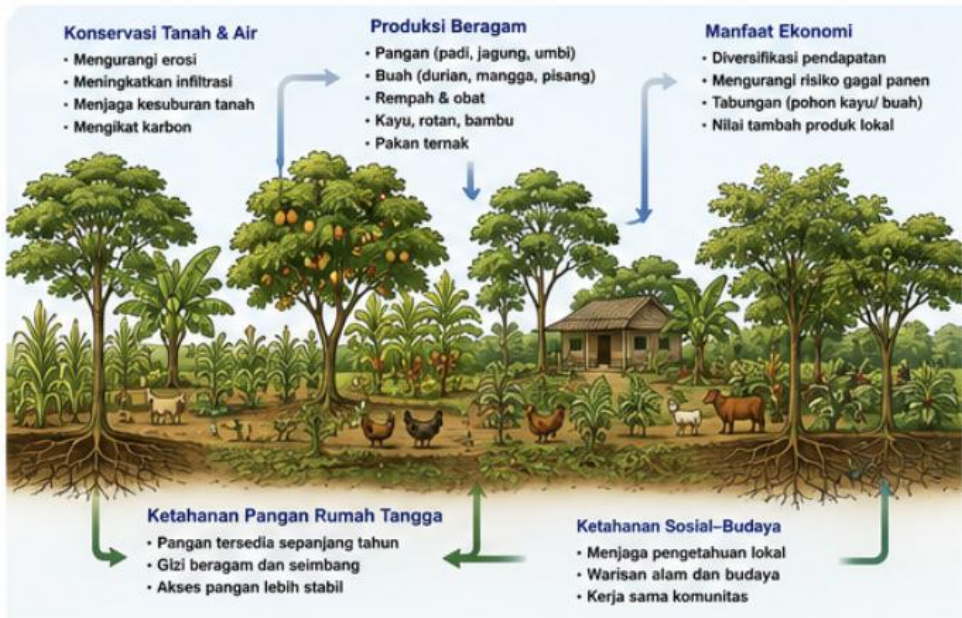
Wilayah	Nama Lokal (Sistem)	Ciri Utama Sistem	Komponen Tanaman Umum	Fungsi Utama	Manfaat Ekologis	Manfaat Sosial–Ekonomi
Jawa	Pekarangan	Sistem skala rumah tangga, berstruktur bertingkat, dekat rumah, intensif dikelola.	Kelapa, pisang, pepaya, mangga, jeruk, jambu, sayuran, rempah (jahe, kunyit), tanaman obat, ternak ayam/itik, ikan (kolam).	Pangan harian, gizi keluarga, tanaman obat, kayu bakar, sumber pendapatan tambahan.	Menjaga kelembapan tanah, menambah bahan organik, konservasi biodiversitas lokal.	Ketersediaan pangan sepanjang tahun, penghematan pengeluaran, warisan keluarga.
Jawa Barat dll.	Talun	Sistem kebun campuran siklik: tanaman semusim di awal, lalu bertahap menjadi kebun pohon campuran.	Padl/jagung/kacang, bambu, pohon buah (durian, petai), mahoni, albasia, kalandra.	Pangan jangka pendek dan hasil pohon jangka menengah–panjang.	Memperbaiki struktur tanah, mengurangi erosi, menjaga kesuburan.	Diversifikasi hasil dan risiko, sumber kayu dan buah, pendapatan bertahap.
Lampung (Pesisir Barat)	Repong Damar	Agroforest berbasis damar mata kucing dengan struktur menyerupai hutan.	Damar mata kucing, durian, manggis, petai, jengkol, karet, pisang, rotan, bambu, tanaman obat.	Produksi resin damar, buah, kayu, tanaman obat, pakan.	Tutupan pohon tinggi, perlindungan tanah–air, penyimpanan karbon, habitat satwa.	Pendapatan utama dari damar, sistem adat kuat, sumber kayu dan buah, identitas budaya.
Kalimantan	Tembawang	Kebun hutan warisan turun–temurun, multistrata, dikelola berbasis kearifan lokal.	Tengkawang, durian, rambutan, langsung, ulin/meranti, rotan, bambu, tanaman obat, sayuran.	Pangan, obat, kayu, rotan, hasil hutan bukan kayu.	Keanekaragaman tinggi, konservasi plasma nutfah, menjaga mikroklimat.	Warisan keluarga, ruang budaya, sumber pangan dan pendapatan jangka panjang.
Sumatra Barat	Parak	Kebun campuran milik keluarga/suku; mengikuti sistem sosial masyarakat.	Durian, petai, pinang, kelapa, kayu manis, pala, kopi, kakao, cabai, sayuran.	Pangan, rempah, tanaman perkebunan, kayu, bahan bangunan.	Menjaga kesuburan tanah, melindungi lereng, menyimpan karbon.	Pendapatan beragam, ketahanan pangan, pewarisan lahan.
Nusa Tenggara (Timur, Flores, Sumba, dll.)	Kebun campuran kering	Adaptif terhadap iklim kering; menggabungkan pohon pakan, pangan, dan ternak.	Lamtoro, gamal, turi, kelor, jambu mete, kelapa, kemiri, jagung, kacang, umbi, rumput pakan, ternak (kambing/sapi).	Pakan ternak, pangan, kayu bakar, konservasi air.	Mengurangi kekeringan, menahan angin, perbaikan bahan organik, cegah erosi.	Pakan ternak sepanjang tahun, diversifikasi pangan, pendapatan musiman.
Papua	Kebun/ Dusun sagu & agroforestri lokal	Integrasi pohon pangan, palma, umbi, dan tanaman hutan; berbasis kearifan lokal.	Sagu, keladi, pisang, kelapa, pinang, buah lokal (matoa, merbau, mangga), sayuran lokal, tanaman hutan.	Pangan pokok, buah, bahan bangunan, tanaman obat.	Konservasi biodiversitas lokal, menjaga fungsi hutan, penyimpanan karbon.	Ketahanan pangan, identitas budaya, sumber obat dan bahan bangunan.

Sumber: Tropenbos Indonesia (2024); CIFOR–ICRAF (2023); Bintoro et al. (2022); Rahmat et al. (2023); Hairiah et al. (2003); Wambrauw et al. (2024) (diolah)

Tabel 14.7: Kontribusi Agroforestri Lokal terhadap Konservasi dan Ketahanan Pangan

Aspek	Konservasi	Ketahanan Pangan	Ketahanan Ekonomi	Ketahanan Sosial–Budaya
Tanah	Mengurangi erosi, memperbaiki struktur, meningkatkan bahan organik	Tanah subur mendukung produksi pangan berkelanjutan	Menurunkan biaya pupuk & rehabilitasi lahan	Menjaga lahan produktif untuk generasi berikutnya
Air	Meningkatkan infiltrasi, menjaga cadangan air tanah, kurangi banjir	Air tersedia di musim kering untuk tanaman & ternak	Menurunkan risiko gagal panen, hemat biaya air	Menjaga sumber air komunal dan nilai adat
Keanekaragaman Hayati	Habitat flora–fauna, penyerbuk, musuh alami, plasma nutfah	Pangan beragam bergizi seimbang, tanaman lokal terjaga	Mengurangi ketergantungan pada input eksternal	Pelestarian pengetahuan lokal dan varietas lokal
Iklim	Penyimpanan karbon, menurunkan suhu, adaptasi perubahan iklim	Mengurangi stres panas & kekeringan pada tanaman	Mengurangi kerentanan terhadap perubahan iklim	Memperkuat hubungan manusia dengan alam
Penghidupan	Sumber kayu, pakan, obat, energi berkelanjutan	Pangan, gizi, bahan rumah tangga tersedia sepanjang tahun	Diversifikasi pendapatan, stabilitas ekonomi keluarga	Memperkuat ikatan keluarga dan komunitas melalui kerja sama

Sumber: HLPE (2017); Duffy et al. (2021); Kuyah et al. (2019); Nair, Kumar & Nair (2021) (diolah)



Gambar 14.12: Peran Agroforestri Lokal dalam Konservasi dan Ketahanan Pangan

Dari sudut pandang konservasi, model agroforestri lokal dapat menjadi jembatan antara pertanian dan perlindungan hutan. Sistem seperti repong damar, tembawang, parak, talun, dan pekarangan membuktikan bahwa lahan yang dikelola masyarakat dapat tetap memiliki tutupan pohon, struktur vegetasi bertingkat, dan keanekaragaman jenis yang tinggi. Sistem ini juga dapat mengurangi tekanan terhadap hutan alam karena sebagian kebutuhan kayu, buah, pakan, obat, dan bahan bangunan tersedia dari lahan kelola masyarakat. Namun, agar fungsi ini bertahan, perlu ada kebijakan yang memberi ruang bagi pengelolaan berbasis masyarakat, pengakuan hak, akses pasar yang adil, dan dukungan terhadap produk lokal.



(a) Pekarangan di Jawa: beragam tanaman dan ternak di sekitar rumah



(b) Talun di Jawa Barat: kebun campuran berstruktur bertingkat



(c) Repong damar di Lampung: damar mata kucing dengan pohon buah



(d) Tembawang di Kalimantan: kebun hutan warisan turun-temurun



(e) Parak di Sumatra Barat: kebun campuran rempah dan buah



(f) Agroforestri di Nusa Tenggara: kombinasi pohon pakan dan jagung



(g) Dusun sagu di Papua: sagu sebagai pangan utama



(h) Kebun kakao bernaungan: agroforestri komoditas bernaungan



(i) Kebun kopi bernaungan: menjaga kelembapan dan tanah

Gambar 14.13: Contoh Model Agroforestri Lokal di Berbagai Wilayah Indonesia

BAB 15

KONSEP IKLIM MIKRO DAN FAKTOR-FAKTOR PEMBENTUKNYA

15.1 Konsep Iklim Mikro dan Faktor Pembentukannya

Iklim mikro adalah kondisi iklim pada ruang yang terbatas dan spesifik, seperti di bawah tajuk tanaman, di dalam rumah kaca, atau di antara bangunan, yang dapat berbeda dari wilayah sekitarnya. Iklim ini terbentuk melalui interaksi antara atmosfer dan permukaan bumi pada skala lokal, sehingga memengaruhi suhu, kelembapan, kecepatan angin, dan radiasi. Pemahaman tentang iklim mikro sangat penting dalam bidang pertanian, kehutanan, perkebunan, peternakan, dan perencanaan wilayah untuk mendukung pengelolaan sumber daya alam yang lebih efektif dan berkelanjutan. Beberapa unsur utama yang menjadi karakteristik iklim mikro meliputi:

15.1.1 Suhu Udara

Suhu udara adalah tingkat panas atau dingin udara yang dipengaruhi oleh aktivitas molekul di atmosfer. Suhu umumnya menurun seiring bertambahnya lintang dan ketinggian tempat, serta dipengaruhi oleh kondisi daratan, lautan, dan unsur iklim lainnya. Dalam pembahasan iklim mikro, suhu udara menjadi unsur yang penting karena sangat dipengaruhi oleh kondisi permukaan bumi. Udara tidak dipanaskan secara langsung oleh sinar matahari, melainkan melalui kontak dengan permukaan yang telah menyerap panas matahari, sehingga suhu udara di dekat permukaan dapat lebih tinggi dibandingkan suhu udara pada lapisan yang lebih atas.

15.1.2 Kelembapan Udara

Kelembapan udara adalah jumlah uap air yang terkandung dalam udara, yang dapat dinyatakan sebagai kelembapan mutlak maupun kelembapan relatif. Kelembapan dipengaruhi oleh proses evaporasi, transpirasi tanaman, kondisi cuaca, dan aktivitas manusia. Di daerah tropis basah seperti Indonesia,

kelembapan relatif umumnya tinggi dan cenderung stabil, sering kali melebihi 60%. Tingkat kelembapan sangat memengaruhi proses penguapan; semakin jenuh udara dengan uap air, semakin lambat penguapan terjadi. Pada kelembapan 100%, udara berada dalam kondisi jenuh sehingga penguapan dari tanah dan tanaman hampir tidak terjadi, sedangkan pada kondisi panas dan kering penguapan berlangsung lebih cepat, terutama jika didukung oleh pergerakan udara yang cukup.

15.1.3 Radiasi Matahari

Radiasi matahari merupakan sumber energi utama yang menggerakkan berbagai proses fisik di atmosfer dan berperan penting dalam pembentukan cuaca serta iklim mikro. Energi ini dipancarkan dalam bentuk gelombang elektromagnetik, termasuk gelombang inframerah yang membawa panas ke permukaan bumi. Intensitas radiasi yang diterima suatu wilayah dipengaruhi oleh sudut datang sinar matahari, lama penyinaran, kondisi permukaan bumi, serta tutupan awan. Selain itu, keberadaan vegetasi, bangunan, dan karakteristik lahan juga memengaruhi jumlah radiasi yang diserap atau dipantulkan. Area terbuka umumnya menerima radiasi lebih besar dibandingkan area yang terlindungi, sehingga memiliki suhu yang lebih tinggi, sedangkan di kawasan perkotaan pantulan radiasi dari bangunan dan permukaan keras dapat meningkatkan suhu lingkungan secara signifikan.

15.1.4 Kecepatan dan Arah Angin

Angin adalah udara yang bergerak dari daerah bertekanan tinggi menuju daerah bertekanan rendah akibat perbedaan tekanan udara dan pengaruh rotasi bumi. Dalam iklim mikro, kecepatan angin berperan penting dalam mengatur suhu dan kelembapan lingkungan karena memengaruhi perpindahan panas serta laju penguapan. Semakin tinggi kecepatan angin, semakin besar efek pendinginan yang terjadi akibat pertukaran udara di sekitar permukaan. Selain membantu menurunkan suhu, angin juga mempercepat penguapan air dari tanah, tanaman, dan permukaan lainnya, sehingga menjadi salah satu faktor utama yang memengaruhi kondisi iklim mikro pada suatu wilayah.

15.1.5 Suhu Tanah

Suhu tanah memainkan peran krusial dalam membentuk iklim mikro, yakni kondisi iklim di lapisan udara dekat permukaan bumi. Tanah yang menyerap panas matahari akan memancarkannya kembali, sehingga sangat memengaruhi kelembapan udara, kecepatan angin, dan tingkat penguapan di lingkungan sekitar.

15.2 Pengaruh Topografi, Vegetasi, dan Mulsa terhadap Iklim Mikro

Iklim mikro adalah kondisi atmosfer pada ruang yang terbatas dan dekat dengan permukaan bumi yang dapat berbeda dari wilayah sekitarnya. Unsur-unsurnya meliputi suhu udara, kelembapan udara, radiasi matahari, suhu tanah, kecepatan angin, dan kandungan air tanah. Kondisi iklim mikro sangat dipengaruhi oleh faktor lingkungan setempat, terutama topografi, vegetasi, dan penutup permukaan tanah seperti mulsa. Dalam bidang pertanian dan perkebunan, pengelolaan faktor-faktor tersebut penting untuk menciptakan lingkungan tumbuh yang lebih optimal, meningkatkan efisiensi penggunaan air, mengurangi stres lingkungan, dan mendukung produktivitas tanaman secara berkelanjutan.

15.2.1 Pengaruh Topografi terhadap Iklim Mikro

Topografi merupakan bentuk permukaan bumi yang meliputi ketinggian, kemiringan, arah lereng, dan bentuk lahan. Perbedaan topografi memengaruhi penerimaan radiasi matahari, distribusi air, dan pergerakan udara sehingga menghasilkan kondisi iklim mikro yang berbeda.

1. **Pengaruh Ketinggian Tempat:** Semakin tinggi suatu lokasi, suhu udara cenderung semakin rendah. Kondisi ini memengaruhi pertumbuhan tanaman, aktivitas mikroorganisme tanah, dan proses evapotranspirasi.
2. **Pengaruh Kemiringan Lereng:** Kemiringan lereng memengaruhi jumlah radiasi matahari yang diterima permukaan tanah. Lereng yang menerima radiasi lebih besar umumnya memiliki suhu lebih tinggi, kelembapan tanah lebih rendah, dan laju evaporasi yang lebih besar.

3. Pengaruh Arah Lereng: Perbedaan orientasi lereng menyebabkan variasi penerimaan sinar matahari yang berdampak pada suhu, kelembapan, evaporasi, dan pola angin lokal. Kondisi ini memengaruhi pertumbuhan vegetasi dan kesesuaian lahan untuk budidaya.
4. Pengaruh Bentuk Lahan: Bentuk lahan seperti dataran, perbukitan, lembah, dan pegunungan menciptakan perbedaan suhu, kelembapan, radiasi matahari, angin, dan ketersediaan air yang berpengaruh terhadap produktivitas tanaman dan pengelolaan lahan.

15.2.2 Pengaruh Vegetasi terhadap Iklim Mikro

Vegetasi merupakan faktor penting dalam pembentukan iklim mikro karena memengaruhi radiasi matahari, suhu udara dan tanah, kelembapan, angin, serta siklus air. Keberadaannya umumnya menciptakan lingkungan yang lebih sejuk, lembap, dan stabil dibandingkan lahan terbuka.

1. Pengaruh terhadap Radiasi Matahari: Tajuk tanaman mengurangi radiasi matahari yang mencapai permukaan tanah sehingga suhu tanah lebih rendah dan penguapan air berkurang.
2. Pengaruh terhadap Suhu Udara: Proses transpirasi pada tanaman menghasilkan efek pendinginan alami yang dapat menurunkan suhu udara di sekitarnya.
3. Pengaruh terhadap Kelembapan Udara: Transpirasi melepaskan uap air ke atmosfer sehingga meningkatkan kelembapan udara dan mendukung pertumbuhan tanaman.
4. Pengaruh terhadap Angin: Vegetasi berfungsi sebagai penahan angin yang dapat mengurangi kecepatan angin, menekan evaporasi, dan menjaga kestabilan suhu.
5. Pengaruh terhadap Siklus Air: Sistem perakaran tanaman meningkatkan infiltrasi dan penyimpanan air dalam tanah sehingga kelembapan tanah lebih terjaga.

15.2.3 Pengaruh Mulsa terhadap Iklim Mikro

Mulsa adalah bahan penutup permukaan tanah yang digunakan untuk memodifikasi kondisi lingkungan di sekitar tanaman. Mulsa dapat berupa bahan organik seperti jerami, daun kering, pelepah kelapa sawit, kompos, dan serbuk gergaji, maupun bahan anorganik seperti plastik. Penggunaan mulsa merupakan salah satu teknik pengelolaan iklim mikro yang paling efektif dalam budidaya tanaman.

1. Pengaruh terhadap Suhu Tanah

Mulsa berfungsi sebagai lapisan isolator yang mengurangi perpindahan panas antara atmosfer dan tanah. Pada siang hari, mulsa menekan pemanasan berlebih, sedangkan pada malam hari membantu mempertahankan panas sehingga suhu tanah lebih stabil. Mulsa organik, seperti jerami, juga dapat memantulkan sebagian radiasi matahari sehingga suhu tanah lebih rendah dibandingkan tanah tanpa mulsa.

2. Pengaruh terhadap Kelembapan Tanah

Mulsa mengurangi kontak langsung antara permukaan tanah dan atmosfer sehingga laju evaporasi menurun. Manfaat meliputi ketersediaan air lebih lama, efisiensi penggunaan air meningkat, dan frekuensi penyiraman dapat dikurangi.

3. Pengaruh terhadap Kelembapan Udara

Dengan menekan kehilangan air melalui evaporasi, mulsa membantu mempertahankan kondisi mikroklimat yang lebih lembap di sekitar tanaman.

4. Pengaruh terhadap Aktivitas Biologi Tanah

Mulsa organik menyediakan bahan organik yang menjadi sumber energi bagi mikroorganisme tanah. Aktivitas biologis yang meningkat akan memperbaiki struktur tanah dan meningkatkan ketersediaan unsur hara.

5. Pengaruh terhadap Pertumbuhan Gulma

Mulsa menghalangi penetrasi cahaya ke permukaan tanah sehingga pertumbuhan gulma berkurang. Dengan demikian, kompetisi air dan unsur hara antara gulma dan tanaman utama dapat diminimalkan.

15.2.4 Interaksi Topografi, Vegetasi, dan Mulsa dalam Pembentukan Iklim Mikro

Topografi, vegetasi, dan mulsa tidak bekerja secara terpisah, melainkan saling berinteraksi membentuk kondisi iklim mikro yang kompleks. Pada lahan perkebunan kelapa sawit, (a) topografi menentukan distribusi radiasi matahari dan aliran air. (b) vegetasi membentuk naungan serta mengatur kelembapan dan suhu udara. (c) Mulsa membantu menjaga kelembapan tanah dan menstabilkan suhu permukaan.

Kombinasi ketiga faktor tersebut dapat menciptakan lingkungan yang lebih kondusif bagi pertumbuhan tanaman sekaligus meningkatkan efisiensi penggunaan sumber daya air dan energi.

Implikasi dalam Pertanian dan Perkebunan

Pemahaman mengenai pengaruh topografi, vegetasi, dan mulsa terhadap iklim mikro sangat penting dalam praktik budidaya modern. Beberapa penerapannya meliputi: (1) Penentuan lokasi tanam berdasarkan kondisi topografi. (2) Pengaturan jarak tanam untuk memperoleh naungan yang optimal. (3) Penggunaan tanaman penutup tanah untuk memperbaiki mikroklimat. (3) Pemanfaatan mulsa organik untuk konservasi air dan tanah. (4) Pengelolaan lanskap yang mampu mengurangi dampak perubahan iklim.

Melalui pengelolaan faktor-faktor tersebut, produktivitas tanaman dapat ditingkatkan sekaligus menjaga keberlanjutan sistem pertanian dan perkebunan.

15.3 Modifikasi Iklim Mikro Melalui Teknik Budidaya

Iklim mikro adalah kondisi atmosfer di sekitar permukaan tanah yang memengaruhi pertumbuhan tanaman, meliputi suhu udara dan tanah, kelembapan, radiasi matahari, serta kecepatan angin. Kondisinya dapat berbeda dari iklim regional karena dipengaruhi oleh karakteristik lingkungan dan pengelolaan lahan. Dalam pertanian, modifikasi iklim mikro melalui teknik budidaya seperti penggunaan mulsa, naungan, irigasi, penahan angin, agroforestri, dan rumah kaca dilakukan untuk menciptakan lingkungan tumbuh yang lebih optimal. Pengelolaan yang tepat dapat meningkatkan

produktivitas tanaman, efisiensi penggunaan sumber daya, serta mendukung keberlanjutan pertanian di tengah perubahan iklim.

15.3.1 Konsep Modifikasi Iklim Mikro

Modifikasi iklim mikro adalah upaya mengubah atau mengendalikan kondisi lingkungan di sekitar tanaman melalui intervensi budidaya agar unsur-unsur iklim berada pada kisaran yang mendukung pertumbuhan optimal tanaman. Tujuan utama modifikasi iklim mikro meliputi: (1) Mengurangi suhu yang terlalu tinggi atau meningkatkan suhu terlalu rendah. (2) Meningkatkan ketersediaan air bagi tanaman. (3) Menekan kehilangan air melalui evaporasi dan transpirasi. (4) Mengurangi kerusakan akibat angin. (5) Mengoptimalkan penerimaan cahaya matahari. (6) Menciptakan lingkungan yang kurang mendukung perkembangan hama dan penyakit.

15.3.2 Teknik Budidaya untuk Memodifikasi Iklim Mikro

1. Pengaturan Jarak Tanam

Jarak tanam memengaruhi tingkat penetrasi cahaya matahari, sirkulasi udara, suhu, dan kelembapan di sekitar tanaman. Pengaruh jarak tanam terhadap iklim mikro yaitu jika (a) jarak tanam yang terlalu rapat meningkatkan kelembapan udara dan mengurangi sirkulasi udara. (b) jarak tanam yang terlalu renggang meningkatkan suhu tanah dan kehilangan air akibat evaporasi. (c) Jarak tanam yang optimal menciptakan keseimbangan antara penerimaan cahaya dan kelembapan lingkungan.

Dalam perkebunan kelapa sawit, pengaturan populasi tanaman yang sesuai dapat meningkatkan efisiensi penggunaan radiasi matahari sekaligus menjaga kondisi iklim mikro yang mendukung pertumbuhan.

2. Penggunaan Mulsa

Mulsa merupakan bahan penutup permukaan tanah yang dapat berupa bahan organik maupun anorganik. Penggunaan mulsa akan mempengaruhi iklim mikro melalui mekanisme penurunan suhu tanah pada siang hari, pengurangan kehilangan air melalui evaporasi, menjaga kelembapan tanah, mengurangi fluktuasi suhu harian, dan menekan pertumbuhan gulma. Pada perkebunan kelapa sawit, penggunaan pelepah hasil pemangkasan sebagai mulsa dapat

meningkatkan konservasi air dan memperbaiki kondisi mikroklimat di sekitar perakaran.

3. Penggunaan Tanaman Penutup Tanah

Tanaman penutup tanah (*cover crops*) banyak digunakan untuk melindungi permukaan tanah dari paparan langsung sinar matahari dan hujan. Penggunaan penutup tanah akan mempengaruhi iklim mikro melalui mekanisme penurunan suhu permukaan tanah, peningkatan kelembapan tanah, pengurangan laju erosi, perbaikan infiltrasi air, dan peningkatan aktivitas mikroorganisme tanah. Pada tanaman perkebunan, legum penutup tanah seperti *Mucuna bracteata* sering digunakan untuk memperbaiki kondisi mikroklimat sekaligus meningkatkan kesuburan tanah.

4. Sistem Naungan (*Shading*)

Naungan dapat berasal dari pohon pelindung, tanaman sela, atau bahan buatan seperti paranet. Penggunaan naungan akan mempengaruhi iklim mikro melalui mekanisme pengurangan intensitas radiasi matahari, penurunan suhu udara dan suhu tanah, peningkatan kelembapan udara, dan pengurangan stres panas pada tanaman. Sistem naungan sangat penting pada tanaman yang sensitif terhadap cahaya berlebihan seperti kopi, kakao, vanili, dan berbagai tanaman hortikultura.

5. Pengelolaan Irigasi

Air tidak hanya berfungsi sebagai sumber kebutuhan tanaman tetapi juga sebagai pengatur kondisi mikroklimat. Pengelolaan irigasi akan mempengaruhi iklim mikro melalui mekanisme peningkatan kelembapan udara, penurunan suhu lingkungan dengan pendinginan evaporative, dan menjaga kelembapan tanah pada tingkat optimal. Metode irigasi seperti irigasi tetes dapat mempertahankan kondisi mikroklimat yang stabil dengan penggunaan air yang lebih efisien.

6. Pembuatan *Windbreaker* atau Penahan Angin

Windbreak adalah barisan pohon atau tanaman yang ditanam untuk mengurangi kecepatan angin. Pembuatan penahan angin mempengaruhi iklim mikro melalui mekanisme pengurangan laju evaporasi, pengurangan kerusakan tanaman akibat angin kencang, menjaga kelembapan udara,

dan pengurangan kehilangan panas dari permukaan tanah. Tanaman seperti gamal (*Gliricidia sepium*), sengon, dan kaliandra sering digunakan sebagai penahan angin pada lahan pertanian dan perkebunan.

7. Sistem Agroforestri

Agroforestri merupakan sistem penggunaan lahan yang mengombinasikan tanaman pertanian dengan pohon dalam satu unit pengelolaan penurunan suhu lingkungan, pengurangan fluktuasi suhu harian, peningkatan kelembapan udara, dan pengurangan dampak resiko kekeringan. Sistem agroforestri juga meningkatkan ketahanan ekosistem terhadap perubahan iklim.

8. Pengolahan Tanah Konservasi

Teknik pengolahan tanah minimum (*minimum tillage*) atau tanpa olah tanah (*zero tillage*) dapat membantu menjaga kondisi mikroklimat tanah. Perlakuan pengolahan tanah konservasi akan mempengaruhi iklim mikro melalui mekanisme, mengurangi kehilangan kelembapan tanah, menjaga kandungan bahan organik, menurunkan suhu permukaan tanah, dan mempertahankan aktivitas biologis tanah. Pendekatan ini semakin banyak diterapkan dalam pertanian berkelanjutan untuk menjaga kualitas lingkungan tumbuh tanaman.

9. Penggunaan Rumah Kaca dan *Screen House*

Pada budidaya intensif, modifikasi iklim mikro dapat dilakukan melalui penggunaan struktur pelindung seperti rumah kaca dan *screen house*. Penggunaan rumah kaca akan mempengaruhi iklim mikro melalui mekanisme pengendalian suhu dan kelembapan udara, pengaturan intensitas Cahaya, pengurangan pengaruh cuaca ekstrem, dan melindungi tanaman dari hama tertentu. Teknologi ini memungkinkan produksi tanaman sepanjang tahun dengan kondisi lingkungan yang lebih terkontrol.

15.3.3 Manfaat Modifikasi Iklim Mikro

Penerapan teknik budidaya yang mampu memodifikasi iklim mikro memberikan berbagai manfaat, antara lain:

1. Aspek Pertumbuhan Tanaman

Pertumbuhan tanaman pada areal yang menerapkan modifikasi iklim mikro akan lebih baik karena perlakuan tersebut dapat meningkatkan laju

fotosintesis, memperbaiki perkembangan akar, meningkatkan efisiensi penyerapan hara, dan mengurangi cekaman lingkungan.

2. Aspek Produktivitas

Produktivitas tanaman pada areal yang menerapkan modifikasi iklim mikro akan lebih baik karena perlakuan tersebut dapat meningkatkan hasil panen, memperbaiki kualitas produk, dan mengurangi kehilangan hasil akibat cuaca ekstrem.

3. Aspek Lingkungan

Kondisi lingkungan pada areal yang menerapkan modifikasi iklim mikro akan lebih baik karena perlakuan tersebut dapat, mengurangi erosi tanah, meningkatkan konservasi air, menambah kandungan bahan organik tanah, dan mendukung keberlanjutan sistem pertanian.

15.3.4 Tantangan dalam Modifikasi Iklim Mikro

Meskipun memberikan banyak manfaat, penerapan modifikasi iklim mikro juga menghadapi beberapa tantangan, antara lain kebutuhan biaya tambahan untuk infrastruktur tertentu, pemeliharaan sistem naungan atau penahan angin, ketersediaan bahan mulsa, penyesuaian teknik budidaya terhadap kondisi lokal, dan perubahan iklim yang semakin ekstrem. Oleh karena itu, pemilihan teknik modifikasi iklim mikro harus disesuaikan dengan jenis tanaman, kondisi lingkungan, dan kemampuan pengelolaan petani.

15.4 Iklim Mikro dalam Sistem Pertanian Terasering dan Lahan Miring

Lahan miring dan berbukit banyak dimanfaatkan untuk pertanian di Indonesia, tetapi rentan terhadap erosi, kehilangan air, penurunan kesuburan tanah, dan fluktuasi iklim mikro. Oleh karena itu, diperlukan teknik pengelolaan yang dapat menjaga kondisi lingkungan tumbuh sekaligus melestarikan sumber daya lahan. Salah satu metode yang banyak diterapkan adalah terasering, yang tidak hanya mengendalikan erosi dan limpasan permukaan, tetapi juga memperbaiki kondisi iklim mikro melalui pengaturan suhu, kelembapan, radiasi matahari, dan ketersediaan air sehingga mendukung pertanian berkelanjutan di daerah perbukitan dan pegunungan.

15.4.1 Konsep Iklim Mikro pada Lahan Miring

Iklim mikro adalah kondisi atmosfer di sekitar permukaan tanah yang meliputi suhu udara dan tanah, kelembapan, radiasi matahari, kecepatan angin, serta ketersediaan air tanah. Pada lahan miring, kondisi ini dipengaruhi oleh kemiringan dan arah lereng, ketinggian tempat, tutupan vegetasi, serta kondisi tanah dan konservasi air. Perbedaan posisi lereng dapat menyebabkan variasi suhu dan kelembapan yang cukup besar; lereng yang menerima sinar matahari lebih banyak cenderung lebih panas dan kering, sedangkan limpasan air yang tinggi pada lahan miring dapat mengurangi kelembapan tanah jika tidak diimbangi dengan tindakan konservasi.

15.4.2 Sistem Terasering sebagai Modifikasi Iklim Mikro

Terasering merupakan teknik konservasi tanah dan air dengan membentuk bidang-bidang datar atau bertingkat pada lereng. Tujuan utamanya adalah memperpendek panjang lereng, memperkecil kemiringan efektif, menurunkan kecepatan aliran permukaan, dan meningkatkan infiltrasi air ke dalam tanah. Selain fungsi konservasi tersebut, terasering juga memodifikasi kondisi iklim mikro di sekitar tanaman melalui mekanisme sebagai berikut:

1. Pengaruh terhadap Suhu Tanah: Terasering meningkatkan penyimpanan air tanah dan mengurangi fluktuasi suhu, sehingga suhu tanah lebih rendah dan stabil.
2. Pengaruh terhadap Kelembapan Tanah: Terasering mengurangi limpasan, meningkatkan peresapan air, dan menjaga cadangan air tanah sehingga kelembapan tanah lebih terjaga.
3. Pengaruh terhadap Kelembapan Udara: Meningkatnya ketersediaan air tanah mendorong evaporasi dan transpirasi, sehingga kelembapan udara meningkat dan risiko cekaman kekeringan berkurang.
4. Pengaruh terhadap Kecepatan Angin: Terasering yang dipadukan dengan vegetasi konservasi dapat menurunkan kecepatan angin, mengurangi kehilangan air, dan meningkatkan efisiensi penggunaan air oleh tanaman.
5. Pengaruh terhadap Radiasi Matahari: Terasering memungkinkan pengaturan arah tanam yang lebih baik sehingga distribusi cahaya lebih merata dan risiko pemanasan berlebih pada tanah berkurang.

15.4.3 Peran Vegetasi dalam Iklim Mikro Lahan Terasering

Efektivitas terasering dalam memperbaiki iklim mikro akan meningkat jika dipadukan dengan vegetasi konservasi. Vegetasi membantu menurunkan suhu udara, meningkatkan kelembapan, mengurangi kecepatan angin, menahan pukulan hujan, dan meningkatkan infiltrasi air. Oleh karena itu, lahan yang memiliki tutupan vegetasi umumnya lebih sejuk dan lembap dibandingkan lahan terbuka. Pada sistem terasering, vegetasi yang sering digunakan antara lain rumput penguat teras, *legume cover crop* (LCC), tanaman tahunan, pohon pelindung, dan sistem agroforestri.

15.4.4 Iklim Mikro dan Produktivitas Tanaman pada Lahan Miring

Perbaikan iklim mikro melalui sistem terasering memberikan berbagai manfaat terhadap produktivitas pertanian.

1. Meningkatkan Efisiensi Penggunaan Air: Peningkatan infiltrasi dan kapasitas penyimpanan air memungkinkan tanaman memperoleh pasokan air yang lebih stabil selama musim kemarau
2. Meningkatkan Aktivitas Mikroorganisme Tanah: Kelembapan dan suhu tanah yang lebih stabil mendukung perkembangan mikroorganisme yang berperan dalam dekomposisi bahan organik dan penyediaan unsur hara).
3. Mengurangi Stres Lingkungan: Fluktuasi suhu yang lebih kecil dan ketersediaan air yang lebih baik membantu tanaman mengurangi stres akibat kekeringan maupun suhu tinggi.
4. Meningkatkan Produktivitas Lahan: Selain menekan erosi dan kehilangan unsur hara, sistem terasering menciptakan kondisi lingkungan yang lebih sesuai untuk pertumbuhan tanaman sehingga produktivitas lahan dapat dipertahankan dalam jangka panjang.

15.4.5 Tantangan Pengelolaan Iklim Mikro pada Lahan Miring

Meskipun memiliki banyak manfaat, pengelolaan iklim mikro pada lahan miring menghadapi tantangan seperti tingginya biaya pembangunan dan pemeliharaan teras, risiko kerusakan akibat hujan ekstrem, serta dampak perubahan iklim. Karena itu, terasering perlu dipadukan dengan teknik

konservasi lain, seperti mulsa, tanaman penutup tanah, agroforestri, dan pengelolaan air yang efisien. Terasering tidak hanya berfungsi sebagai konservasi tanah dan air, tetapi juga memperbaiki iklim mikro melalui peningkatan infiltrasi, pengurangan limpasan, peningkatan kelembapan tanah, dan stabilisasi suhu. Jika dikombinasikan dengan vegetasi konservasi, terasering dapat menciptakan lingkungan tumbuh yang lebih baik, meningkatkan efisiensi penggunaan air, dan menjaga produktivitas lahan secara berkelanjutan.

15.5 Pengukuran dan Pemantauan Iklim Mikro di Lahan Pertanian

Iklim mikro merupakan kondisi atmosfer pada ruang yang terbatas di sekitar tanaman dan permukaan tanah yang secara langsung memengaruhi pertumbuhan, perkembangan, dan produktivitas tanaman. Unsur-unsur iklim mikro meliputi suhu udara, kelembapan udara, radiasi matahari, kecepatan angin, curah hujan, suhu tanah, dan kelembapan tanah. Berbeda dengan data iklim dari stasiun meteorologi regional, data iklim mikro menggambarkan kondisi lingkungan aktual yang dialami tanaman di lapangan. Oleh karena itu, pengukuran dan pemantauan iklim mikro menjadi komponen penting dalam pertanian presisi, manajemen irigasi, pengendalian penyakit tanaman, dan adaptasi terhadap perubahan iklim.

15.5.1 Pentingnya Pengukuran Iklim Mikro di Lahan Pertanian

Kondisi iklim mikro memengaruhi hampir seluruh proses fisiologi tanaman, antara lain fotosintesis, respirasi, transpirasi, penyerapan unsur hara, pertumbuhan akar, dan pembungaan dan pembentukan buah. Data iklim mikro dinilai sangat penting digunakan untuk, menentukan kebutuhan irigasi, memprediksi serangan hama dan penyakit, mengoptimalkan pemupukan, mengevaluasi efektivitas teknik konservasi tanah dan air, dan mendukung sistem pertanian presisi berbasis sensor dan *Internet of Things* (IoT).

15.5.2 Parameter Iklim Mikro yang Diukur

1. Suhu Udara

Suhu udara merupakan parameter utama yang memengaruhi aktivitas metabolisme tanaman. Pengukuran suhu udara biasanya dilakukan pada

ketinggian 1,5–2 meter dari permukaan tanah menggunakan termometer digital atau sensor suhu otomatis. Informasi suhu digunakan untuk menentukan derajat hari tumbuh (*growing degree days*), memantau stres panas tanaman, memprediksi perkembangan organisme pengganggu tanaman.

2. Kelembapan Udara

Kelembapan udara menunjukkan jumlah uap air yang terkandung dalam atmosfer. Instrumen yang digunakan untuk pengukuran kelembapan udara antara lain hygrometer dan Sensor kelembapan relatif (RH sensor). Kelembapan udara berpengaruh terhadap, transpirasi tanaman, pembentukan embun, dan perkembangan penyakit jamur dan bakteri.

3. Radiasi Matahari

Radiasi matahari merupakan sumber energi utama bagi proses fotosintesis. Pengukuran dilakukan menggunakan pyranometer dan quantum sensor (PAR sensor). Data radiasi digunakan untuk menghitung efisiensi fotosintesis, menentukan kebutuhan naungan, dan mengevaluasi sistem agroforestri dan rumah kaca

4. Kecepatan dan Arah Angin

Pengukuran dilakukan menggunakan anemometer dan wind vane. Data angin penting untuk menghitung evapotranspirasi, menentukan resiko rebah tanaman, dan mengatur aplikasi pestisida serta pupuk semprot.

5. Curah Hujan

Curah hujan diukur menggunakan ombrometer atau *tipping bucket rain gauge*. Informasi ini diperlukan untuk perencanaan irigasi, neraca air tanaman, dan prediksi kekeringan dan banjir.

6. Suhu Tanah

Suhu tanah memengaruhi pertumbuhan akar, aktivitas mikroorganisme tanah, dan ketersediaan unsur hara. Pengukuran dilakukan menggunakan sensor suhu tanah yang dipasang pada kedalaman tertentu sesuai kebutuhan pengamatan atau budidaya.

7. Kelembapan Tanah

Kelembapan tanah merupakan indikator utama ketersediaan air bagi tanaman. Metode pengukurannya meliputi metode gravimetric, tensiometer, sensor resistif, sensor kapasitif, dan sensor berbasis IoT. Pemantauan kelembapan tanah secara kontinu sangat membantu dalam pengelolaan irigasi yang efisien.

15.5.3 Instrumen Pengukuran Iklim Mikro

1. Pengukuran Konvensional

Metode konvensional menggunakan alat yang dibaca secara manual, seperti termometer maksimum-minimum, hygrometer, penakar hujan manual, dan anemometer mekanik. Keunggulan metode ini adalah biaya yang relatif murah, tetapi memerlukan tenaga kerja dan frekuensi pengamatan yang tinggi.

2. Stasiun Cuaca Otomatis (*Automatic Weather Station*)

Perkembangan teknologi memungkinkan penggunaan stasiun cuaca otomatis yang mampu mengukur berbagai parameter secara simultan dan terus-menerus. Komponen yang umumnya tersedia meliputi sensor suhu dan kelembapan udara, sensor radiasi matahari, sensor curah hujan, sensor angin, sensor kelembapan tanah, dan sistem penyimpanan data (*data logger*). Data dapat dikirim secara real time melalui jaringan seluler atau internet sehingga memudahkan pemantauan jarak jauh.

15.5.4 Sistem Pemantauan Iklim Mikro Berbasis IoT

Perkembangan teknologi digital telah mendorong penggunaan sistem pemantauan berbasis Internet of Things (IoT). Karakteristik sistem ini meliputi pengumpulan data otomatis, transmisi data secara nirkabel, penyimpanan berbasis cloud, visualisasi data secara *real time*, dan sistem peringatan dini (*early warning system*). Keuntungan utama sistem IoT adalah kemampuan memperoleh data secara kontinu tanpa harus melakukan pengamatan langsung di lapangan.

15.5.5 Metodologi Pengukuran Iklim Mikro

1. Penentuan Lokasi Pengamatan

Lokasi pengukuran harus mewakili kondisi lingkungan yang ingin diamati. Beberapa pertimbangan meliputi topografi lahan, jenis tanaman, kerapatan tajuk, sistem budidaya, dan kondisi drainase.

2. Penempatan Sensor

Sensor harus ditempatkan sesuai standar pengukuran. Contoh suhu dan kelembapan udara pada ketinggian 1,5–2 meter, sensor tanah pada zona perakaran aktif, dan sensor radiasi ditempatkan tanpa halangan.

3. Frekuensi Pengamatan

Pengamatan dapat dilakukan Setiap jam, 30 menit, 10 menit atau secara kontinu melalui data logger. Semakin tinggi frekuensi pengamatan, semakin baik kemampuan mendeteksi perubahan iklim mikro.

15.5.6 Aplikasi Pemantauan Iklim Mikro dalam Pertanian

1. Manajemen Irigasi Presisi

Data kelembapan tanah memungkinkan pemberian air dilakukan sesuai kebutuhan tanaman sehingga mengurangi pemborosan air. Berbagai laporan membuktikan bahwa pemantauan kelembapan tanah secara kontinu dapat meningkatkan efisiensi penggunaan air dan mengoptimalkan hasil tanaman.

2. Pengendalian Penyakit Tanaman

Kombinasi data suhu, kelembapan udara, dan kelembapan daun dapat digunakan untuk memprediksi perkembangan penyakit tanaman sehingga tindakan pengendalian dapat dilakukan lebih dini.

3. Pertanian Presisi

Data iklim mikro digunakan untuk membuat peta variabilitas lahan dan mendukung pengambilan keputusan berbasis data (*data-driven farming*).

4. Adaptasi terhadap Perubahan Iklim

Pemantauan jangka panjang memungkinkan identifikasi tren perubahan lingkungan yang dapat digunakan dalam penyusunan strategi adaptasi pertanian terhadap perubahan iklim.

15.5.7 Tantangan dalam Pemantauan Iklim Mikro

Beberapa kendala yang sering ditemui meliputi biaya investasi alat yang relatif tinggi, kebutuhan kalibrasi sensor secara berkala, kerusakan alat akibat kondisi lapangan yang ekstrem, keterbatasan jaringan komunikasi di daerah terpencil, dan pengelolaan serta pemrosesan data yang semakin kompleks.

Meskipun demikian, perkembangan teknologi sensor dan IoT terus menurunkan biaya pemantauan sehingga semakin banyak diterapkan dalam sistem pertanian modern.

BAB 16

PENGELOLAAN KESUBURAN TANAH SECARA AGROEKOLOGIS

16.1 Konsep Kesuburan Tanah dari Perspektif Agroekologis

Kesuburan tanah menjadi salah satu faktor penentu pertumbuhan tanaman. Tanaman yang tumbuh pada media tanam yang subur akan memberikan pertumbuhan dan hasil yang lebih baik dibandingkan dengan tanaman yang tumbuh pada media tanam yang miskin hara. Dari perspektif agroekologis, kesuburan tanah tidak hanya ditentukan oleh kandungan unsur hara dalam tanah, tetapi juga oleh kondisi tanah (pH, lengas tanah) yang memengaruhi ketersediaan unsur hara. Tanah yang sehat mampu mendukung fungsi-fungsi ekologis dalam agroekosistem untuk memastikan produktivitas yang stabil dan berkelanjutan. Agroekologi menekankan pentingnya integrasi prinsip-prinsip ekologi dalam pengelolaan tanah untuk mengembalikan dan menjaga kesuburan tanah secara alami. Dalam hal ini, kesuburan tanah dari sudut pandang agroekologis berbasis pada proses biologis dan ekosistem yang kompleks, seperti peningkatan keberagaman hayati tanah, siklus unsur hara yang optimal, serta pelestarian dan pemanfaatan bahan organik tanah.

Kesuburan tanah dari perspektif agroekologis merupakan pertanian alami tanpa biaya (*Zero Budget Natural Farming, ZBNF*) yang mengutamakan pendekatan agroekologi inovatif untuk mendorong pertanian berkelanjutan dengan meminimalkan penggunaan bahan kimia, sehingga mengurangi biaya usaha tani. Pengelolaan kesuburan tanah dilakukan dengan memanfaatkan sumber daya alam yang ada di sekitar, seperti kotoran hewan ternak, pupuk hayati, limbah pertanian, dan lain sebagainya. Sistem pertanian ZBNF bertujuan untuk menjaga kesuburan tanah, meningkatkan keanekaragaman hayati, memperbaiki retensi air, dan menjaga keseimbangan ekologi dalam

sistem pertanian. Sistem ini akan mengurangi ketergantungan terhadap input eksternal yang relatif mahal dan memberatkan bagi petani kecil.

Menurut pendekatan agroekologi, tanah yang subur adalah suatu sistem harmonis yang kompleks dengan struktur yang baik, fungsi optimal, dan kapasitas penyangga yang efisien untuk menjaga keseimbangan dinamis semua faktor produktivitas tanaman. Hal ini mencakup hubungan antara bahan organik tanah (soil organic matter, SOM), ketersediaan karbon, dan nutrisi tanaman utama seperti nitrogen, fosfor, dan kalium, yang secara bersama-sama membangun fungsi agronomis dan lingkungan yang positif (Corato, Ugo De, Egidio Viola and Minkina, 2024).



Gambar 16.1: Model ekonomi sirkular dalam daur ulang nutrisi

(Bhunia *et al.*, 2021)

Agroekologi mengedepankan diversifikasi tanaman dan integrasi sistem tanaman-ternak untuk menciptakan sinergi yang memungkinkan daur ulang bahan organik dan nutrisi yang optimal. Pengelolaan yang demikian memutuskan pola monokultur yang monoton dan reduktif dengan mengadopsi rotasi tanaman, tanam sela, dan sistem agroforestri yang memperkaya biodiversitas tanah. Dengan demikian, tanah mampu mempertahankan proses sirkulasi nutrisi organik dan menjaga keseimbangan biologis yang memengaruhi kesuburan tanah jangka panjang.

Agroekologi menekankan pengelolaan tanah yang berorientasi pada proses ekologis alami seperti siklus nutrisi tertutup, peningkatan biodiversitas

fungsional, dan pengendalian hayati. Prinsip ini membantu dalam membangun ketahanan terhadap gangguan lingkungan dan perubahan iklim dengan cara:

- Mengaktifkan biodekomposisi dan mineralisasi organik sehingga tanah dapat menyediakan nutrisi secara berkelanjutan.
- Menjaga siklus energi dan nutrisi yang tertutup, sehingga ketergantungan pada input eksternal dapat diminimalkan.
- Meningkatkan keragaman organisme tanah, termasuk mikroba, fauna tanah, dan akar tanaman, yang bersama-sama memperkuat fungsi tanah dan mencegah degradasi (Altieri, 2019).

Dari perspektif agroekologis, kesuburan tanah adalah kondisi biologis dan ekologis yang dinamis dan terjaga melalui pengelolaan yang berbasis pada prinsip diversifikasi, penggunaan bahan organik alami, dan pemeliharaan fungsi biologis tanah. Konsep ini melampaui pemupukan konvensional dan menempatkan tanah sebagai sistem agroekosistem berkelanjutan yang mampu mandiri dalam menyediakan nutrisi, menjaga struktur dan biodiversitas tanah, serta mendukung ketahanan produksi pertanian dalam jangka panjang.

16.2 Penggunaan Pupuk Organik: Kompos, Pupuk Hijau, dan Biochar

Peran penting bahan organik tanah dalam agroekologi tidak hanya sebagai sumber nutrisi, tetapi juga sebagai pelindung kesehatan tanah dengan memperbaiki struktur tanah dan mendukung komunitas mikroorganisme yang berfungsi mengaktifkan proses dekomposisi dan mineralisasi. Praktik agroekologi mengutamakan penambahan bahan organik melalui kompos, mulsa, dan pupuk organik alami untuk meningkatkan jumlah serta aktivitas mikroba tanah yang mendukung kesuburan alami tanpa ketergantungan pada input kimia sintetis. Pupuk organik berupa kompos, pupuk hijau, dan biochar banyak dimanfaatkan oleh petani untuk meningkatkan kesuburan tanah.

Saat ini petani mempunyai ketergantungan yang tinggi terhadap penggunaan pupuk kimia dan pestisida kimia. Ketergantungan tersebut menyebabkan kerusakan sumber daya lingkungan, peningkatan salinitas tanah, dan pencemaran logam berat pada lahan pertanian. Oleh karena itu, diperlukan terobosan dalam pengelolaan kesuburan tanah dengan mengurangi

ketergantungan pada penggunaan bahan kimia. Biochar merupakan bahan organik yang banyak mengandung karbon yang dihasilkan melalui proses pirolisis. Biochar telah banyak dilaporkan dapat meningkatkan kesuburan tanah, memperbaiki kesehatan tanah, dan pada akhirnya dapat meningkatkan pertumbuhan dan hasil tanaman. Biochar memiliki peran penting dalam meningkatkan kesuburan tanah secara agroekologis melalui berbagai mekanisme yang mendukung kualitas dan produktivitas tanah secara berkelanjutan. Secara agroekologis, biochar berfungsi sebagai bahan tambahan tanah yang bersifat karbonasi dan berpori, yang mampu memperbaiki karakteristik fisik, kimia, dan biologis tanah sekaligus mendukung peningkatan hasil tanaman. Biochar berkontribusi pada peningkatan pH tanah, terutama pada tanah masam. Penambahan biochar dapat mengurangi keasaman tanah yang menghambat pertumbuhan tanaman dan ketersediaan unsur hara bagi pertumbuhan tanaman. Penambahan biochar sekam padi dapat meningkatkan pH tanah dari 5,2 menjadi 6,5 sehingga meningkatkan ketersediaan unsur hara dan aktivitas mikroba tanah (Mahmud, Muniza and Ahmed, 2025). Di samping itu, biochar mampu meningkatkan kandungan bahan organik tanah secara signifikan. Bahan organik ini sangat penting untuk meningkatkan kesuburan tanah karena berperan dalam menyimpan dan melepaskan nutrisi secara bertahap serta meningkatkan aktivitas mikroorganisme tanah yang berkontribusi pada penguraian bahan organik dan siklus nutrisi. Penambahan biochar secara konsisten dapat meningkatkan bahan organik tanah hingga dua kali lipat, sehingga mendukung kesehatan tanah dan produktivitas tanaman dalam jangka panjang.

Biochar juga mampu meningkatkan retensi air tanah, yang sangat penting dalam konteks agroekologi, terutama di daerah yang mengalami kekeringan atau curah hujan tidak menentu. Struktur berpori dari biochar meningkatkan kemampuan tanah untuk menyimpan air sehingga menyediakan pasokan air yang lebih stabil bagi tanaman, mengurangi stres air, dan meningkatkan efisiensi penggunaan air dalam pertanian (Shahbaz Khan, Sohail Irshad, Kashf Mehmood, Zuhair Hasnain, Muhammad Nawaz, Afroz Rais, Safia Gul, Muhammad Ashfaq Wahid and Ibrar, 2024). Biochar juga mampu meningkatkan kapasitas tukar kation (*cation exchange capacity*/CEC) tanah, yang merupakan indikator penting dalam kemampuan tanah untuk menahan

dan menyediakan nutrisi bagi tanaman. Dengan CEC yang lebih tinggi, tanah mampu menahan lebih banyak ion nutrisi esensial sehingga tanaman dapat menyerap nutrisi secara lebih efektif, berkontribusi pada peningkatan hasil tanaman secara langsung (Premalatha, R. P., Poorna Bindu, J., Nivetha, E., Malarvizhi, P., Manorama, K., Parameswari, E., & Davamani, 2023). Biochar memberikan kontribusi terhadap keberlangsungan mikrobiota tanah. Mikroorganisme tanah memainkan peran kunci dalam siklus nutrisi, penguraian bahan organik, dan pengendalian patogen. Biochar menciptakan habitat mikro yang sesuai bagi mikroba menguntungkan sehingga meningkatkan aktivitas biologis tanah dan kesehatan ekosistem tanah. Selain itu, biochar memiliki efek jangka panjang dalam meningkatkan kesuburan tanah dan mengurangi kebutuhan penggunaan pupuk kimia sintetis yang dapat merusak lingkungan. Dengan meningkatkan efisiensi penggunaan pupuk dan menahan nutrisi di dalam tanah, biochar membantu mengurangi run-off dan pencemaran air tanah, sekaligus mendukung pertanian yang ramah lingkungan dalam kerangka agroekologi.

Secara keseluruhan, peran biochar dalam meningkatkan kesuburan tanah secara agroekologis meliputi:

- Penurunan keasaman tanah dan peningkatan pH sehingga nutrisi lebih tersedia
- Peningkatan kandungan bahan organik tanah dan memperbaiki struktur tanah
- Meningkatkan retensi air tanah dan efisiensi penggunaan air
- Memperbaiki kapasitas tukar kation tanah untuk menahan dan menyediakan nutrisi tanaman
- Meningkatkan aktivitas mikroba dan kesehatan biologis tanah
- Mengurangi ketergantungan pada pupuk kimia dan dampak negatif terhadap lingkungan
- Mendukung peningkatan hasil tanaman secara signifikan pada berbagai skala dan kondisi tanah

Dengan demikian, biochar merupakan amendemen tanah yang strategis dalam praktik agroekologi untuk mendukung pertanian yang lebih produktif, ramah lingkungan, dan berkelanjutan.

Sama seperti biochar, kompos juga merupakan pupuk organik yang banyak digunakan oleh petani untuk meningkatkan kesuburan tanah. Kompos berasal dari bahan organik seperti kotoran hewan, limbah tanaman, limbah rumah tangga yang telah mengalami proses dekomposisi sehingga menghasilkan humus yang mengandung unsur hara untuk pertumbuhan tanaman. Kompos dapat memperbaiki kualitas fisik, kimia, dan biologis tanah secara berkelanjutan. Kompos tidak hanya sebagai sumber bahan organik dan nutrisi bagi pertumbuhan tanaman, tetapi juga sebagai stimulan mikroorganisme yang menguntungkan siklus hara dalam tanah. Beberapa jenis kompos yang umum digunakan antara lain:

1. Vermikompos (Vermicompost): dihasilkan melalui pengolahan bahan organik oleh cacing tanah. Terbukti mampu meningkatkan populasi mikroba tanah yang berperan penting dalam mineralisasi unsur hara dan memperbaiki kesuburan tanah (Kumar, N. V., Patil, M. B., Nadagouda, B. T., & Beerge, 2025).
2. Kompos pupuk kandang (Farmyard manure compost): berasal dari kotoran ternak yang mengalami fermentasi, cepat melepaskan mineral dan membantu meningkatkan biomassa mikroba tanah, memperbaiki struktur tanah, serta mengandung hara untuk pertumbuhan tanaman (Askri, A., Alnaqbi, M. M. A., Alketbi, S. A. B., Alkaabi, B. M. T., & Sheteiwy, 2025).
3. Kompos limbah organik dan sisa tanaman (Green-waste compost): berasal dari sisa tanaman hijau dan limbah organik yang telah mengalami fermentasi, berfungsi meningkatkan kandungan karbon organik dan memperpanjang kestabilan agregat tanah serta mendukung keseimbangan biologis di dalam tanah.
4. Inoculated compost: kompos yang diinokulasi dengan mikroorganisme khusus seperti konsorsium jamur atau bakteri yang dapat meningkatkan aktivitas enzim dan mempercepat pelepasan nutrisi. Teknik ini meningkatkan efisiensi pupuk kompos dalam mendukung aktivitas

mikroba dan ketersediaan nutrisi (Lucchetta, M., Zuluaga, M. Y. A., Monterisi, S., Fattorini, R., Gaiotti, F., Cesco, S., & Pii, 2025).

Berdasarkan uraian di atas, dapat disimpulkan peran kompos untuk kesuburan tanah secara agroekologis adalah sebagai berikut:

1. Memperbaiki sifat fisik tanah. Kompos membantu memperbaiki struktur tanah yang stabil dan gembur sehingga meningkatkan kemampuan tanah dalam mengikat air dan aerasi yang baik untuk perakaran serta aktivitas mikroorganisme.
2. Penyediaan nutrisi berkelanjutan. Kompos melepaskan nutrisi secara bertahap sehingga menjaga ketersediaan unsur hara penting bagi pertumbuhan tanaman, tanpa ada risiko pencucian hara.
3. Aktivasi dan keberagaman mikroorganisme tanah. Kompos merupakan media kaya nutrisi bagi mikroorganisme tanah yang berkontribusi dalam siklus hara dan mineralisasi bahan organik.
4. Meningkatkan ketahanan terhadap stres lingkungan. Selain sebagai penyedia hara, kompos membantu menjaga kelembapan tanah, menstabilkan suhu tanah sehingga tanaman lebih tahan terhadap kekeringan dan suhu yang ekstrem.

Selain biochar dan kompos, pupuk hijau juga sering digunakan untuk meningkatkan kesuburan tanah secara ekologis. Penggunaan pupuk hijau dilakukan dengan cara menanam tanaman legum, kemudian membenamkan tanaman tersebut ke dalam tanah sebagai sumber bahan organik dan nitrogen biologis. Penggunaan pupuk hijau dapat menekan pertumbuhan gulma dan erosi, serta meningkatkan siklus nutrisi tanah (Shree, D., Deepasree, A., Jose, J., Nareshbhai, G. K., & Ankireddypalli, 2024). Penggunaan pupuk hijau dalam sistem pertanian berkelanjutan memberikan memberikan manfaat ekologis sebagai berikut:

1. Meningkatkan diversitas dan aktivitas mikroorganisme tanah.
2. Memperbaiki sifat fisik dan kimia tanah sehingga menciptakan kondisi lingkungan yang sesuai untuk pertumbuhan dan aktivitas mikroorganisme. Pupuk hijau secara signifikan dapat menaikkan pH tanah, kandungan bahan organik, dan meningkatkan kesuburan tanah melalui peningkatan nitrogen

organik dan aktivitas enzim tanah (urease, fosfatase)(Wang, H., Zhong, L., Liu, J., Liu, X., Xue, W., Liu, X., Yang, H., Shen, Y., Li, J., & Sun, 2024). Pemberian pupuk hijau akan menciptakan pori tanah yang baik untuk aktivitas mikroorganisme dan siklus hara.

3. Memperkuat simbiosis legum dengan mikroba tanah. Tanaman legum membentuk hubungan simbiotik dengan mikroorganisme seperti rhizobia dan mikoriza yang memperkaya tanah dengan nitrogen biologis dan meningkatkan keseimbangan mikroekologi tanah. Simbiosis ini mendukung penyerapan nutrisi, meningkatkan ketahanan tanaman terhadap stres lingkungan, dan mengurangi ketergantungan pada pupuk kimia.
4. Meningkatkan sifat biologis tanah untuk meningkatkan kesuburan tanah secara alami dan mengurangi ketergantungan pada pupuk kimia. Penggunaan pupuk hijau dapat meningkatkan fungsi mikroba seperti *nitrogen fixation*, *decomposer activity*, dan fungsi heterotrofik aerobik yang menguntungkan kesuburan tanah jangka panjang. Misalnya, intercropping dengan pupuk hijau mengubah komposisi komunitas mikroba dengan meningkatkan bakteri pengikat nitrogen (seperti *Bradyrhizobium*) sekaligus memperkaya keanekaragaman bakteri dan jamur yang mendukung siklus nutrisi (Wang, B., Huang, X., Chen, J., Fu, L., Chen, Y., Gao, W., & Sui, 2024).

16.3 Pemupukan Hayati dan Peran Biofertilizer

Pemupukan hayati dan biofertilizer berperan dalam pengelolaan kesuburan tanah secara agroekologis. Pupuk hayati dan biofertilizer dapat meningkatkan pertumbuhan tanah melalui kemampuannya dalam menyediakan unsur hara untuk pertumbuhan tanaman sehingga mengurangi ketergantungan terhadap penggunaan pupuk kimia. Pemupukan hayati melibatkan peran mikroorganisme (fungi, algae, bakteri) yang mampu memberikan manfaat untuk kesuburan tanah dan pertumbuhan tanaman. Mikroorganisme tersebut bekerja melalui beberapa mekanisme:

1. Fiksasi nitrogen biologis. Simbiosis antara tanaman legum dengan bakteri *Rhizobium*, *Azotobacter* dalam memfiksasi N_2 menjadi bentuk yang dapat diserap oleh akar tanaman, sehingga mengurangi kebutuhan pupuk N.

Kelebihan pemanfaatan biofertilizer, antara lain adalah:

1. Mengurangi ketergantungan terhadap pupuk kimia sehingga dapat menekan biaya produksi dan menjaga kelestarian lingkungan.
2. Meningkatkan kesuburan tanah secara berkelanjutan melalui peningkatan aktivitas mikroba tanah yang meningkatkan siklus unsur hara.
3. Meningkatkan daya tahan tanaman terhadap stres lingkungan dan penyakit.
4. Meningkatkan ketersediaan nitrogen, fosfor, zat pengatur tumbuh, serta memperbaiki kualitas tanah.

Pupuk hayati dan biofertilizer bukan sekadar pengganti pupuk kimia, tetapi bagian dari integrasi pengelolaan kesuburan tanah yang berkelanjutan. Pemupukan hayati dan biofertilizer memiliki peran vital dalam mengoptimalkan siklus nutrisi, memperbaiki kesehatan tanah secara fisik, kimia, dan biologis, serta mendukung ketahanan sistem pertanian yang berkelanjutan secara agroekologis.

16.4 Rotasi Tanaman dan Perannya dalam Pemulihan Kesuburan Tanah

Rotasi tanaman memainkan peran yang sangat penting dalam pemulihan kesuburan tanah dengan mengubah struktur komunitas mikroba tanah, memperbaiki sifat kimia dan biologis tanah, serta meningkatkan produktivitas tanaman secara keseluruhan. Rotasi tanaman efektif dalam merevitalisasi komunitas mikroorganisme di rizosfer tanah yang berperan dalam siklus nutrisi tanaman, peningkatan aktivitas enzim tanah, dan penghambatan patogen tanah. Penerapan pada rotasi *Prunella vulgaris*–*Chrysanthemum morifolium* menunjukkan bahwa sistem rotasi ini dapat meningkatkan kandungan bahan organik, amonium, fosfor tersedia, kalium, dan besi. Selain itu, aktivitas enzim seperti asam fosfatase, sukrase, dan β glukosidase meningkat secara signifikan dibandingkan dengan monokultur, yang turut mendukung kesehatan dan kesuburan tanah. Akibatnya, penyakit tanaman seperti layu menurun drastis akibat penurunan jumlah patogen *Fusarium*, sekaligus meningkatkan hasil dan kualitas tanaman (Chen, Q., Mushtaq, W., Wang, X., Liao, Z., Li, J., Xiao, S., Miao, Y., & Liu, 2025).

Rotasi tanaman juga berdampak positif pada keanekaragaman dan jumlah spesies mikroba tanah. Pengamatan terhadap berbagai sistem rotasi tanaman budidaya jagung dan kedelai menunjukkan bahwa rotasi tanaman meningkatkan karbon organik total serta jumlah nutrisi tanah, yang berkontribusi pada peningkatan hasil tanaman. Rotasi tersebut memicu pergeseran komunitas bakteri dan jamur tanah yang lebih beragam dan sehat jika dibandingkan dengan monokultur. Contohnya, pada sistem rotasi kedelai-jagung-jagung, ditemukan peningkatan signifikan spesies bakteri yang menguntungkan, sedangkan sistem jagung-kedelai-kedelai meningkatkan keanekaragaman jamur tanah. Bakteri dan jamur yang dominan seperti *Acidobacteria*, *Actinobacteria*, dan *Ascomycota* menunjukkan korelasi positif terhadap komunitas mikroba lain yang berperan dalam perbaikan kesuburan tanah (Sun, L., Wang, S., Narsing Rao, M. P., Shi, Y., Lian, Z.-H., Jin, P.-J., Wang, W., Li, Y.-M., Wang, K.-K., Banerjee, A., Cui, X.-Y., & Wei, 2023). Penggabungan rotasi dengan pengolahan tanah minimum dan intercropping mampu memutus siklus hidup patogen tanah sehingga mengurangi serangan penyakit pada tanaman berikutnya. Kompos dan residu tanaman hasil rotasi juga memiliki peran dalam pengendalian patogen secara tidak langsung melalui persaingan mikroba dan peningkatan resistensi tanaman inang. Dengan demikian, rotasi tanaman menjadi strategi efektif untuk menjaga kesehatan tanaman secara ekologis dan ekonomis.

Rotasi tanaman mempunyai peranan strategis dalam pengelolaan kesuburan tanah, yaitu:

1. Meningkatkan kandungan bahan organik dan unsur hara esensial.
2. Mengubah dan meningkatkan mikroba tanah yang menguntungkan dan mengurangi patogen.
3. Meningkatkan aktivitas enzim tanah yang penting dalam siklus hara.
4. Memperbaiki sifat fisik dan biologis tanah.
5. Mengoptimalkan mekanisme biologis dalam pengendalian penyakit.

Dengan demikian, rotasi tanaman tidak hanya berperan dalam mengatasi masalah kejenuhan tanah akibat pola tanam monokultur, tetapi juga

meningkatkan kesuburan tanah secara berkelanjutan dan pengendalian hama dan penyakit tanaman.

BAB 17

DEGRADASI LAHAN DAN RESTORASI AGROEKOSISTEM

Agroekologi bukan sekadar metode bercocok tanam tanpa kimia sintetik; ia adalah sebuah disiplin sains yang memandang lahan pertanian sebagai ekosistem hidup yang utuh. Di dalam sistem ini, terdapat sebuah dialog termodinamika yang konstan. Tanah bertindak sebagai penyimpan energi dan nutrisi, tanaman sebagai transformator energi matahari menjadi biomassa, dan iklim sebagai regulator ritme biologis.

Secara naratif, kita harus melihat agroekosistem sebagai sebuah simfoni. Jika salah satu instrumen misalnya tanah mengalami degradasi, maka resonansi yang dihasilkan oleh tanaman akan melemah, dan sistem tersebut akan menjadi sangat rentan terhadap fluktuasi instrumen "konduktor" yaitu iklim. Interaksi ini bersifat non-linear dan timbal balik; tanah yang sehat mampu memitigasi dampak perubahan iklim melalui sekuestrasi karbon, sementara tanaman yang tepat dapat memperbaiki struktur fisik tanah yang rusak.

Dunia saat ini menghadapi paradoks besar: kebutuhan pangan meningkat secara eksponensial seiring pertumbuhan populasi, namun fondasi produksinya— lahan—sedang mengalami penciutan kualitas secara sistematis. Degradasi lahan bukan sekadar masalah lokal petani di pedesaan, melainkan ancaman terhadap keamanan global.

Penyampaian kompleksitas ini melibatkan pemahaman bahwa: Tanah kehilangan integritas strukturalnya akibat eksploitasi intensif, tanaman mengalami cekaman (*stress*) biotik dan abiotik yang melampaui batas adaptasinya dan iklim yang tidak menentu mempercepat laju reaksi kimiawi merugikan di dalam tanah, seperti pencucian nutrisi dan penguapan air yang ekstrem.

Bab ini berangkat dari premis bahwa restorasi agroekosistem bukan sekadar tindakan teknis menyebar pupuk atau menanam pohon. Restorasi adalah

upaya rekayasa ekosistem yang memerlukan pemahaman mendalam tentang siklus biogeokimia. Kita dituntut untuk mampu mengembalikan fungsi layanan ekosistem (*ecosystem services*) yang telah hilang.

Melalui pendekatan sistemik, kita akan membedah bagaimana teknologi restorasi modern harus selaras dengan hukum-hukum ekologi dasar. Kita tidak lagi bertanya "bagaimana cara memaksa tanah menghasilkan lebih banyak?", melainkan "bagaimana cara memulihkan kesehatan tanah agar ia mampu menopang kehidupan secara mandiri?"

17.1 Bentuk-Bentuk Degradasi Lahan Pertanian

Degradasi lahan bukan sekadar fenomena biofisik yang terisolasi; ia merupakan manifestasi dari kegagalan sistemik dalam interaksi antara antroposfer dan biosfer. Dalam konteks sistem agroekologi, lahan dipandang sebagai modal alam (*natural capital*) yang menyediakan jasa ekosistem esensial. Namun, ketika laju ekstraksi nutrisi dan gangguan fisik melampaui kapasitas regenerasi alami tanah, terjadilah apa yang disebut sebagai entropi ekosistem. Secara ilmiah, degradasi lahan pertanian didefinisikan sebagai penurunan kapasitas biologis atau ekonomi lahan untuk menghasilkan komoditas, yang dipicu oleh proses-proses yang berasal dari aktivitas manusia (Lal, 2015).

Transisi dari lahan produktif menjadi lahan kritis melibatkan desintegrasi struktur tanah yang kompleks, di mana porositas makro hilang, aktivitas mikrobial menurun drastis, dan siklus karbon terputus. Bab ini akan membedah secara mendalam bentuk-bentuk degradasi tersebut, bukan sebagai daftar kerusakan, melainkan sebagai penjelasan mekanisme bagaimana interaksi tanah-tanaman-iklim mengalami keruntuhan fungsional.

17.1.1 Ontologi dan Taksonomi Degradasi Lahan

Secara epistemologis, pemahaman mengenai degradasi lahan telah bergeser dari sekadar pandangan mekanistik (kehilangan tanah secara fisik) menuju pandangan holistik-ekosistem. Menurut FAO (2023), degradasi lahan mencakup spektrum yang luas, mulai dari kerusakan kimiawi hingga hilangnya keanekaragaman hayati bawah tanah.

1. Degradasi Fisik: Keruntuhan Arsitektur Tanah

Degradasi fisik sering kali menjadi "pintu masuk" bagi bentuk degradasi lainnya. Hal ini mencakup pemadatan tanah (*soil compaction*), pembentukan kerak permukaan (*surface crusting*), dan penurunan stabilitas agregat.

- Mekanisme Kompaksi: Penggunaan alat mesin pertanian yang berat dan pengolahan tanah yang berlebihan (*excessive tillage*) menyebabkan tekanan pada ruang pori tanah. Secara teknis, hal ini meningkatkan kerapatan lindak (*bulk density*) dan menurunkan konduktivitas hidrolik jenuh (θ). Ketika pori makro hilang, difusi gas oksigen terhambat, yang secara langsung menekan respirasi akar tanaman (Pritchard et al., 2020).
- Interaksi Iklim: Di wilayah tropis seperti Indonesia, intensitas curah hujan yang tinggi mempercepat penghancuran agregat tanah di permukaan lahan yang terbuka. Energi kinetik tetesan hujan memecah ikatan tanah, menyebabkan partikel halus menyumbat pori-pori, yang kemudian membentuk lapisan kedap air (*sealing*).

2. Degradasi Kimiawi: Ketidakseimbangan Stoikiometri Nutrisi

Jika degradasi fisik adalah kerusakan "rumah", maka degradasi kimiawi adalah habisnya "bahan makanan" dan munculnya "racun". Bentuk utama dari degradasi ini adalah pencucian hara (*nutrient leaching*), asidifikasi, dan ketidakseimbangan unsur hara akibat pemupukan monokultur jangka panjang.

- Deplesi Bahan Organik: Bahan organik tanah (SOM) adalah jangkar bagi kapasitas tukar kation (KTK). Degradasi terjadi ketika laju mineralisasi karbon lebih cepat daripada laju input biomassa, sebuah fenomena yang diperparah oleh suhu global yang meningkat (iklim). Tanpa SOM yang memadai, tanah kehilangan kemampuan penyangga (*buffering capacity*) terhadap perubahan pH dan toksisitas logam (Oldeman, 1994; Lehmann and Kleber, 2015).

17.1.2 Perspektif Global dan Dinamika Agroekologi di Indonesia

Indonesia memiliki karakteristik unik dalam hal degradasi lahan karena pengaruh iklim tropis basah dan aktivitas tektonik. Lahan-lahan di Indonesia, khususnya di wilayah perkebunan intensif, menghadapi tantangan berat berupa penurunan cadangan karbon organik secara masif.

Penurunan Kualitas Biologis (Biological Degradation)

Bentuk degradasi yang paling sering terabaikan adalah hilangnya fungsi biota tanah. Mikroorganisme tanah, seperti Fungi Mikoriza Arbuskular (FMA) dan bakteri penambat nitrogen, adalah jembatan dalam interaksi tanah-tanaman.

Ketika tanah terkontaminasi atau mengalami pemadatan, komunitas ini punah, menyebabkan tanaman menjadi "ketergantungan" pada input kimia eksternal (Bardgett and van der Putten, 2014).

17.1.3 Mekanisme Termodinamika dan Biofisika dalam Degradasi Fisik

Degradasi fisik tidak boleh hanya dipandang sebagai perubahan bentuk, melainkan sebagai gangguan pada **entropi sistem**. Dalam agroekosistem yang sehat, tanah memiliki struktur yang memungkinkan aliran energi dan massa secara efisien. Namun, ketika degradasi terjadi, sistem tersebut mengalami peningkatan ketidakteraturan (entropi).

1. Kerusakan Porositas dan Dinamika Fluida

Kehilangan porositas akibat kompaksi (pemadatan) mengubah kurva karakteristik air tanah (*soil water characteristic curve*). Secara teknis, ketika pori makro (θ) hancur, kapasitas infiltrasi menurun drastis, yang memaksa air hujan menjadi aliran permukaan (*run-off*). Menurut hukum Darcy:

Dimana adalah konduktivitas hidrolik. Pada lahan terdegradasi, nilai menurun secara eksponensial karena hilangnya kontinuitas pori. Hal ini menciptakan kondisi anoksik (kurang oksigen) di zona perakaran, yang memicu denitrifikasi dan hilangnya nitrogen ke atmosfer dalam bentuk gas (sebuah gas rumah kaca yang kuat), menunjukkan bagaimana degradasi

tanah langsung berkontribusi pada perubahan iklim (Hillel, 2004; Six et al., 2004).

2. Mikro-morfologi Agregat dan Dispersi Koloid

Pada tingkat mikroskopis, degradasi lahan sering dimulai dengan dispersi koloid tanah. Interaksi antara mineral liat dan bahan organik membentuk agregat yang stabil. Namun, masuknya energi kinetik dari iklim (hujan) dan hilangnya kation penyeimbang seperti akibat pencucian menyebabkan partikel liat terdispersi. Partikel liat yang terdispersi ini kemudian bermigrasi ke bawah dan membentuk lapisan padat yang disebut *clay pan* atau *plow pan*. Fenomena ini tidak hanya menghambat penetrasi akar tanaman secara mekanis, tetapi juga mengisolasi cadangan nutrisi di lapisan subsoil, sehingga tanaman mengalami defisiensi meskipun secara total tanah mungkin masih memiliki mineral (Dexter, 2004; Bronick and Lal, 2005).

17.1.4 Degradasi Kimiawi: Gangguan pada Siklus Biogeokimia dan Stoikiometri

Interaksi tanah-tanaman sangat bergantung pada rasio stoikiometri unsur hara (seperti C:N:P). Degradasi kimiawi menggeser rasio ini ke arah yang tidak menguntungkan bagi pertumbuhan tanaman dan aktivitas mikrobia.

1. Mineralisasi Karbon dan Emisi Gas Rumah Kaca

Di bawah pengaruh iklim tropis yang panas dan lembap, pembukaan lahan pertanian memicu "efek pembakaran dingin" atau oksidasi cepat bahan organik. Ketika struktur tanah hancur, karbon organik yang sebelumnya terlindungi di dalam agregat menjadi terpapar oleh mikroorganisme heterotrof. Proses mineralisasi ini mengubah karbon organik menjadi.

Kehilangan Karbon Organik Tanah (SOC) ini adalah bentuk degradasi paling substantif karena SOC adalah mesin utama dari seluruh fungsi tanah. Tanpa karbon, kompleks jerapan tanah melemah, menyebabkan pupuk yang diberikan petani tidak dapat diikat dan langsung tercuci ke air tanah (Lehmann and Kleber, 2015).

2. Ketidakseimbangan Hara dan Toksisitas Alumunium

Pada lahan-lahan tua di Indonesia (seperti Ultisol), degradasi sering mewujud dalam bentuk asidifikasi yang dipercepat. Penggunaan pupuk nitrogen berbasis amonium tanpa imbalan bahan organik menyebabkan pelepasan ion yang masif. Hal ini memicu kelarutan Alumunium (Al) yang bersifat toksik bagi akar tanaman. Akar yang terkena keracunan Al menjadi kerdil dan tidak mampu menyerap air dari lapisan tanah yang lebih dalam, sehingga tanaman menjadi sangat rentan terhadap kekeringan (iklim) meskipun curah hujan mencukupi (Kochian et al., 2015).

17.1.5 Degradasi Biologis: Matinya Jaringan Syaraf Tanah

Jika tanah adalah sebuah organisme, maka biota tanah adalah jaringan syarafnya. Degradasi biologis ditandai dengan penurunan indeks diversitas fungsional mikrobial.

- Hilangnya Simbiosis Mikoriza: Pada lahan yang sering dibajak dan diberi pestisida, fungi mikoriza arbuskular (FMA) menghilang. Padahal, FMA bertindak sebagai perpanjangan akar tanaman untuk mencari fosfor (P) dan air di pori-pori tanah yang sangat kecil.
- Reduksi Fauna Tanah: Hilangnya cacing tanah dan makrofauna lainnya menghentikan proses *bioturbasi* (pengadukan tanah secara alami). Tanpa bioturbasi, tanah menjadi statis, padat, dan kehilangan kemampuan untuk melakukan "self-repair".

17.1.6 Tipologi Degradasi pada Tanah Suboptimal Indonesia: Gambut dan Tanah Vulkanik

Indonesia memiliki heterogenitas tanah yang ekstrem. Proses degradasi pada tanah mineral vulkanik (Andisol) sangat berbeda dengan tanah organik (Histosol/Gambut), terutama dalam interaksinya dengan komponen iklim.

1. Degradasi Lahan Gambut: Subsiden dan Oksidasi Irreversibel

Lahan gambut di Indonesia merupakan penyimpan karbon raksasa. Namun, degradasi di sini bersifat katastrofik. Ketika drainase dibuat untuk pertanian intensif, terjadi perubahan drastis pada interaksi tanah-iklim.

- Mekanisme Subsiden: Drainase menyebabkan penurunan muka air tanah yang memicu konsolidasi fisik dan oksidasi mikrobial. Laju subsiden di lahan gambut tropis dapat mencapai per tahun (Hooijer et al., 2012).
 - Kekeringan Irreversibel (*Irreversible Drying*): Secara koloid, gambut yang mengering akan kehilangan kemampuan hidrofisiknya untuk menyerap air kembali. Hal ini mengubah sifat gambut dari hidrofilik menjadi hidrofobik, menjadikannya sangat rentan terhadap kebakaran lahan yang masif (Page and Hooijer, 2016).
2. Degradasi Lahan Vulkanik: Penurunan Ketersediaan Hara dan Pencucian Basa

Tanah vulkanik (seperti di Jawa dan Sumatera) memiliki mineralogi alofan yang unik. Degradasi pada tanah ini sering kali melibatkan fiksasi Fosfor (P) yang sangat kuat oleh kompleks Al dan Fe. Akibatnya, meskipun petani memberikan pupuk P dalam jumlah besar, tanaman tidak dapat mengaksesnya karena terikat secara kovalen dalam struktur tanah. Ini adalah bentuk degradasi "kelaparan di tengah kelimpahan".

17.1.7 Krisis Hidrologis: Tanah sebagai Spons yang Rusak

Hubungan tanah-tanaman-iklim paling nyata terlihat pada siklus air. Tanah yang terdegradasi kehilangan fungsinya sebagai "regulator hidrologis".

- Penurunan Kapasitas Lapang (*Field Capacity*): Akibat hilangnya pori makro dan mikro, tanah tidak lagi mampu menahan air melawan gravitasi. Pada musim kemarau, tanaman mengalami titik layu permanen lebih cepat karena cadangan air tanah menipis.
- Fenomena Banjir dan Kekeringan: Sebuah Dualitas Degradasi: Tanah yang terkompaksi meningkatkan *Surface Run-off*. Hal ini menyebabkan debit puncak sungai meningkat tajam saat hujan (banjir), namun cadangan air tanah tidak terisi kembali, sehingga mata air mengering saat kemarau (Hillel, 2004).

17.1.8 Deteksi dan Kuantifikasi Degradasi: Pendekatan Sains Data dan Geospasial

Untuk memberikan bobot ilmiah yang mutakhir, kita harus membahas bagaimana degradasi dikuantifikasi menggunakan algoritma modern.

1. Indeks Vegetasi dan Efisiensi Penggunaan Cahaya

Degradasi lahan dapat dideteksi melalui respons tanaman (interaksi tanamaniklim). Menggunakan data satelit (Sentinel atau Landsat), kita menghitung NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) dan EVI (*Enhanced Vegetation Index*). Penurunan tren produktivitas primer bersih (NPP) dalam jangka panjang merupakan indikator kuat adanya degradasi tanah bawah tanah (*underground degradation*) (Wessels et al., 2012).

2. Pemetaan Digital Properti Tanah (Digital Soil Mapping)

Dengan integrasi *Machine Learning* (Random Forest atau Deep Learning), kita dapat memetakan degradasi secara spasial. Variabel lingkungan seperti curah hujan, kemiringan lereng, dan indeks vegetasi digunakan sebagai prediktor untuk memetakan distribusi stok karbon tanah dan tingkat erosi secara *real-time*.

17.1.9 Penilaian Ekonomi: Biaya Eksternalitas Degradasi

Secara naratif-substantif, degradasi bukan hanya angka kehilangan tanah, tapi kehilangan kesejahteraan.

- Kehilangan Hasil (*Yield Loss*): Penurunan 1 cm lapisan topsoil dapat mengurangi hasil panen jagung hingga (Lal, 2015).
- Biaya Pemulihan vs. Biaya Kerusakan: Sering kali, biaya untuk merestorasi lahan yang sudah hancur total 10 kali lebih mahal dibandingkan biaya konservasi preventif.

17.1.10 Evolusi Historis Degradasi Lahan di Indonesia: Dari Kultuurstelsel ke Revolusi Hijau

Memahami kondisi lahan saat ini mengharuskan kita menilik kembali "luka" masa lalu yang ditinggalkan oleh pola pengelolaan lahan secara historis.

1. Warisan Perkebunan Kolonial dan Ekstraksi Nutrisi masif

Sejak era *Cultuurstelsel* (Sistem Tanam Paksa), agroekosistem Indonesia dipaksa beralih dari sistem subsisten yang terdiversifikasi menjadi monokultur skala besar. Penanaman tebu, kopi, dan nila secara intensif di tanah-tanah Jawa tanpa pengembalian residu organik memicu pengurasan unsur hara (*nutrient mining*) yang masif untuk pertama kalinya dalam sejarah Nusantara.

2. Paradoks Revolusi Hijau: Produktivitas vs. Integritas Tanah

Revolusi Hijau pada tahun 1970-an memperkenalkan varietas unggul yang sangat responsif terhadap pupuk kimia (NPK). Namun, penggunaan pupuk nitrogen dosis tinggi tanpa disertai input organik menyebabkan:

- Penurunan pH Tanah secara Drastis: Transformasi amonium menjadi nitrat melepaskan proton (H^+) yang memasamkan tanah.
- Ketergantungan Ekosistem: Tanah kehilangan kemampuan penyangga biologisnya, memaksa petani meningkatkan dosis pupuk setiap tahun hanya untuk mempertahankan hasil yang sama (Reijntjes et al., 1992).

17.1.11 Mekanisme Molekuler Interaksi Akar-Tanah dalam Kondisi Terdegradasi

Pada level mikro, tanaman tidak tinggal diam saat lahan mengalami degradasi. Terjadi dialog molekuler yang sangat kompleks antara perakaran tanaman dengan lingkungan tanah yang tidak ramah.

1. Respon Cekaman (*Stress*) pada Tanah Masam

Pada tanah yang mengalami acidifikasi (asidifikasi), kelarutan ion meningkat. Ion ini menyerang ujung akar (apeks) dan menghentikan pembelahan sel.

- Eksudasi Asam Organik: Sebagai mekanisme pertahanan, tanaman melepaskan eksudat berupa asam sitrat atau malat melalui transporter protein seperti ALMT1 (*Aluminum-activated Malate Transporter*). Asam-asam ini mengkelat (mengikat) menjadi bentuk yang tidak beracun sebelum masuk ke dalam jaringan tanaman (Kochian et al., 2015).
- Signaling ROS: Kerusakan fisik tanah dan polusi kimiawi memicu produksi *Reactive Oxygen Species* (ROS) di dalam sel tanaman. Jika sistem antioksidan tanaman tidak memadai, ini menyebabkan kematian sel dan kegagalan panen.

2. Arsitektur Akar dan Akuisisi Nutrisi pada Lahan Terkompaksi

Pada tanah yang padat (kompaksi), tanaman merespons melalui perubahan arsitektur akar (*Root System Architecture*). Tanaman akan memproduksi lebih banyak akar lateral pada lapisan atas yang lebih gembur karena ketidakmampuan akar tunggang menembus lapisan subsoil yang keras. Hal ini membuat tanaman menjadi sangat rentan terhadap kekeringan (interaksi tanah-tanaman-iklim) karena akar tidak mencapai cadangan air di lapisan dalam.

17.2 Erosi Tanah: Proses, Faktor Penyebab, dan Dampaknya

Secara termodinamika, erosi adalah manifestasi dari pelepasan energi potensial yang tidak terkendali. Di dalam sistem agroekologi yang stabil, energi kinetik hujan dan aliran air diserap oleh tajuk tanaman dan struktur pori tanah. Namun, ketika keseimbangan tanah–tanaman–iklim terganggu, energi tersebut bertransformasi menjadi kekuatan destruktif yang memicu detasemen partikel. Erosi bukan hanya masalah mekanis; ia adalah pencurian lapisan "paling hidup" dari bumi—*topsoil*—yang mengandung konsentrasi karbon organik dan mikrobia tertinggi. Kehilangan satu milimeter lapisan ini adalah kehilangan sejarah biogeokimia yang terbentuk selama berabad-abad (Lal, 2015; Boardman and Poesen, 2024).

17.2.1 Mekanika dan Kinematika Erosi Tanah

Erosi air (yang paling dominan di Indonesia) bekerja melalui tiga tahap sekuensial yang sangat presisi: detasemen (pelepasan), transportasi (pengangkutan), dan sedimentasi (pengendapan).

1. Energi Kinetik Tetesan Hujan (*Raindrop Splash*)

Secara teoritis, erosi dimulai dari disintegrasi struktural. Tetesan hujan bukan sekadar air yang jatuh, melainkan proyektil energi yang melakukan kerja mekanik pada permukaan tanah. Ketika tetesan hujan menghantam tanah tanpa pelindung (tanaman), energi kinetiknya () didisipasikan untuk memutus ikatan kohesi antar partikel tanah.

Proses ini memicu **dispersi agregat**, di mana partikel liat dan debu terlepas dari ikatan organik dan mineralnya. Partikel yang terlepas ini kemudian tersuspensi dalam air dan menyumbat pori-pori tanah (mikro dan makro). Secara teoritis, fenomena ini dikenal sebagai *surface sealing*, yang menciptakan lapisan tipis nan padat di permukaan. Akibatnya, kapasitas infiltrasi tanah menurun secara drastis meskipun di bawah lapisan tersebut tanah mungkin masih bersifat porus. Inilah titik awal di mana interaksi tanah-iklim berubah menjadi destruktif.

2. Hidrodinamika Aliran Permukaan (*Overland Flow*)

Ketika laju presipitasi melampaui laju infiltrasi (), terjadilah genangan yang kemudian berkembang menjadi aliran permukaan. Narasi teoritis di sini berfokus pada **kekuatan gerus kritis** (*critical shear stress*). Aliran air memiliki energi kinetik yang mampu mengangkut sedimen jika tegangannya melampaui ambang batas resistensi tanah.

Dalam sistem agroekologi, keberadaan residu tanaman di permukaan tanah berfungsi meningkatkan **kekasaran hidrolis** (*hydraulic roughness*). Secara teoritis, peningkatan kekasaran ini menurunkan kecepatan aliran (v), yang menurut hukum energi, secara otomatis menurunkan daya angkut sedimen. Tanpa vegetasi, aliran air menjadi turbulen dan membentuk mikrosaluran yang sangat efisien dalam memindahkan massa tanah dari hulu ke hilir.

17.2.2 Faktor-Faktor Pendorong Erosi dalam Bingkai Agroekologi

1. Erosivitas Hujan (Faktor R): Dimensi Iklim

Erosivitas merupakan parameter kuantitatif dari potensi hujan untuk menyebabkan erosi. Secara teoritis, kita tidak hanya melihat total volume hujan, tetapi pada **intensitas dan distribusi temporal**. Di wilayah tropis, hujan sering kali terjadi dengan intensitas tinggi dalam durasi singkat.

Hal ini menciptakan tekanan hidrolik yang mendadak pada struktur tanah. Dalam perspektif perubahan iklim, pergeseran pola hujan menuju ekstremitas meningkatkan indeks erosivitas () secara signifikan. Hal ini menuntut sistem agroekologi untuk memiliki rancangan penutupan lahan yang jauh lebih rapat guna mengompensasi peningkatan energi kinetik dari atmosfer.

2. Erodibilitas Tanah (Faktor K): Dimensi Tanah

Erodibilitas mencerminkan kerentanan intrinsik tanah terhadap erosi. Secara teoritis, faktor ditentukan oleh interaksi antara tekstur, struktur, dan kandungan bahan organik. Tanah dengan kandungan debu (*silt*) yang tinggi dianggap paling erodibel karena debu memiliki kohesi yang lebih rendah dibandingkan liat, namun cukup ringan untuk diangkut dibandingkan pasir.

Peran **Bahan Organik Tanah (SOM)** di sini sangat krusial sebagai agen sementasi. Secara teoritis, SOM meningkatkan stabilitas agregat melalui pembentukan kompleks organo-mineral. Oleh karena itu, degradasi biologis yang kita bahas di Bab 1 secara langsung meningkatkan nilai erodibilitas tanah di Bab 2 ini.

3. Faktor Topografi (LS) dan Penutupan Tanaman (C)

Faktor LS mewakili pengaruh gravitasi terhadap kinetika air. Semakin panjang lereng, semakin besar akumulasi volume air; semakin curam lereng, semakin tinggi kecepatan alirannya.

Namun, dalam agroekologi, faktor yang paling bisa dimanipulasi adalah **Faktor C (Vegetasi)**. Tanaman bekerja melalui dua mekanisme teoritis: (1) **Intersepsi**, dimana tajuk memecah energi tetesan hujan, dan (2)

Transpirasi, yang mengosongkan ruang pori tanah sehingga meningkatkan kapasitas infiltrasi untuk hujan berikutnya. Interaksi tanah-tanaman-iklim di sini mencapai puncaknya: vegetasi bukan hanya penutup fisik, tapi juga regulator hidrologis sistem.

17.2.3 Tipologi Erosi: Dari Lembar hingga Parit Raksasa

Secara naratif, perkembangan erosi adalah sebuah **kontinum degradasi**. Dimulai dari **Erosi Lembar** yang bersifat subtil dan sering tidak terlihat, namun secara teoritis paling merusak karena menghilangkan lapisan organik terkaya di permukaan.

Jika tidak ditangani, aliran air akan berkonsentrasi pada depresi kecil di permukaan lahan membentuk **Erosi Alur** (*Rill*). Pada tahap ini, erosi masih bisa diperbaiki dengan pengolahan tanah biasa. Namun, ketika alur-alur ini bergabung dan mendalam akibat pemusatan energi aliran yang masif, terbentuklah **Erosi Parit** (*Gully*). Secara teoritis, erosi parit menandakan bahwa agroekosistem telah kehilangan stabilitas topografinya dan memerlukan intervensi teknik sipil yang berat untuk restorasinya.

17.2.4 Dampak Sistemik: On-site dan Off-site

1. Dampak On-site: Kemiskinan di Tingkat Lahan

Secara teoritis, dampak *on-site* adalah penurunan **kapasitas produksi netto**. Erosi menyebabkan hilangnya fraksi tanah yang paling aktif secara kimiawi (koloid liat dan humus). Hal ini mengakibatkan penurunan Kapasitas Tukar Kation (KTK) dan penurunan kemampuan tanah menahan air. Tanaman pada lahan yang tererosi sering mengalami "kekeringan fisiologis" meskipun hujan baru saja turun, karena tanah tidak lagi memiliki pori mikro yang cukup untuk menyimpan air tersedia.

2. Dampak Off-site: Kerusakan Ekosistem Hilir

Dampak *off-site* berkaitan dengan **eksternalitas negatif**. Sedimen yang terangkut membawa serta hara terikat (terutama Fosfor) dan residu kimia pertanian. Secara teoritis, pengendapan sedimen di waduk tidak hanya mengurangi kapasitas tampung air (yang memicu banjir), tetapi juga menyebabkan **eutrofikasi**. Penumpukan sedimen di muara dan pesisir juga

merusak ekosistem terumbu karang dan mangrove, menunjukkan bahwa erosi lahan pertanian memiliki dampak lintas ekosistem yang sangat luas.

17.3 Salinisasi, Acidifikasi, dan Kontaminasi Lahan Pertanian

Tanah pertanian berfungsi sebagai reaktor biogeokimia di mana ketersediaan nutrisi sangat bergantung pada keseimbangan pH, potensi redoks, dan konsentrasi ion. Degradasi kimiawi terjadi ketika keseimbangan ini terganggu oleh faktor iklim (evapotranspirasi tinggi) atau intervensi manusia (penggunaan input kimia berlebih). Secara teoretis, ini adalah gangguan pada **homeostasis tanah**. Tanah yang mengalami salinisasi, acidifikasi, atau kontaminasi kehilangan kapasitas penyangganya (*buffering capacity*), yang mengakibatkan tanaman mengalami cekaman toksisitas atau defisiensi hara yang parah (Sumner, 2000; Sparks, 2003).

17.3.1 Salinisasi: Termodinamika Air dan Dinamika Elektrostatik Koloid

Salinisasi bukan sekadar keberadaan garam, melainkan gangguan pada **potensial termodinamika air** dalam sistem tanah–tanaman.

1. Fraksinasi Osmotik dan Energi Bebas Gibbs

Secara teoretis, kemampuan tanaman menyerap air ditentukan oleh total potensial air (Ψ), yang merupakan penjumlahan dari potensial matrik (Ψ_m) dan potensial osmotik (Ψ_o). Pada lahan salin, konsentrasi solut yang tinggi menurunkan secara drastis. Tanaman harus melakukan **penyesuaian osmotik** (*osmotic adjustment*) dengan mengakumulasi solut kompatibel (seperti prolina dan betain) di dalam sitoplasma untuk menurunkan potensial air internalnya agar lebih rendah dari larutan tanah. Jika laju akumulasi garam di zona perakaran melampaui kemampuan adaptasi molekuler tanaman, terjadi plasmolisis sel yang berujung pada kematian jaringan (Munns dan Tester, 2008).

2. Sodisitas dan Teori Lapisan Ganda Listrik (*Diffuse Double Layer*)

Pada kasus lahan sodik (dominasi), keruntuhan struktur tanah dijelaskan melalui teori **Lapisan Ganda Listrik**. Ion natrium memiliki jari-jari

hidrasi yang besar dan valensi rendah (+1), yang menyebabkan lapisan ganda listrik di sekitar partikel liat meluas. Hal ini meningkatkan gaya tolak-menolak (repulsif) antar partikel, yang memicu **dispersi koloid**. Secara naratif, tanah kehilangan integritas strukturalnya, pori-pori tersumbat, dan tanah menjadi masif serta kedap udara (anoksik), yang melumpuhkan respirasi akar (Rengasamy, 2010).

17.3.2 Acidifikasi: Kinetika Pelepasan Proton dan Toksisitas Spesiasi Alumunium

Acidifikasi adalah proses de-basifikasi kompleks pertukaran yang didorong oleh kinetika pelepasan proton ().

1. Kapasitas Penyangga (*Buffering Capacity*) dan Amfoterisme Mineral

Tanah memiliki mekanisme pertahanan terhadap perubahan pH melalui sistem penyangga karbonat, silikat, dan pertukaran kation. Namun, pada penggunaan input yang kronis, kapasitas ini terlampaui. Secara teoretis, ketika pH turun di bawah 5.0, terjadi pelarutan mineral silikat. Di sini, kita harus membahas **Spesiasi Alumunium**. Tidak semua bentuk Al beracun; bentuk adalah yang paling sitotoksik. Ion ini berinteraksi dengan pektin di dinding sel akar dan mengganggu homeostasis kalsium (), yang secara permanen menghentikan pembelahan sel di meristem apikal akar (Kochian et al., 2015).

2. Antagonisme Hara pada Kondisi Asam

Secara kimiawi, acidifikasi memicu fenomena antagonisme hara. Konsentrasi yang tinggi secara kompetitif menghambat penyerapan kation makro seperti, dan. Selain itu, pada pH rendah, Fosfor (P) akan terikat kuat oleh oksida besi dan alumunium membentuk senyawa yang tidak larut (atau), sebuah proses yang dikenal sebagai **fiksasi fosfat**. Hal ini menjelaskan mengapa pada lahan asam, pemupukan P seringkali tidak efektif secara agronomis (Sparks, 2003).

17.3.3 Kontaminasi: Isoterm Adsorpsi dan Bioavailabilitas Organometalik

Kontaminasi lahan pertanian melibatkan interaksi kompleks antara polutan dengan permukaan fungsional koloid tanah.

1. Kinetika Adsorpsi-Desorpsi Logam Berat

Untuk memahami kontaminasi, kita harus menerapkan model **Isoterm Langmuir dan Freundlich**. Logam berat seperti Kadmium () berkompetisi dengan nutrisi untuk menempati situs pertukaran. Bioavailabilitas polutan ditentukan oleh kekuatan ikatannya. Secara teoretis, polutan yang berada dalam fasa cair tanah (*soil solution*) adalah yang paling berbahaya. Faktor-faktor seperti kandungan bahan organik (humus) sangat krusial karena asam humat dan fulvat mampu membentuk **senyawa khelat** (*chelate*) yang stabil dengan logam berat, sehingga mengurangi toksisitasnya terhadap tanaman (Alloway, 2013).

2. Persistensi Senyawa Xenobiotik dan Ekotoksikologi Biota

Kontaminasi oleh pestisida organik (xenobiotik) melibatkan proses **hidrofobisitas**. Senyawa ini cenderung teradsorpsi kuat pada bahan organik tanah, menjadikannya persisten selama puluhan tahun. Secara molekuler, polutan ini dapat mengganggu komunikasi kimiawi (*quorum sensing*) antar bakteri tanah yang bermanfaat, sehingga meskipun tanah secara fisik terlihat utuh, siklus fungsional biologisnya telah lumpuh.

17.3.4 Integrasi Interaksi: Sinergi Degradasi Kimiawi

Dalam sistem agroekologi nyata, ketiga proses ini sering terjadi secara simultan. Misalnya, acidifikasi dapat meningkatkan bioavailabilitas logam berat karena pH rendah melepaskan logam yang sebelumnya terikat pada mineral. Narasi ini memberikan gambaran kompleksitas yang harus dihadapi dalam restorasi: kita tidak bisa hanya memperbaiki satu parameter tanpa mempertimbangkan pergeseran kesetimbangan kimia secara keseluruhan.

17.4 Prinsip dan Teknologi Restorasi Agroekosistem Terdegradasi

Restorasi agroekosistem bukanlah sekadar upaya mekanistik untuk mengembalikan tanah ke kondisi asalnya, melainkan sebuah proses **rekayasa suksesi** untuk memulihkan fungsi layanan ekosistem (*ecosystem services*). Secara teoretis, restorasi beroperasi pada spektrum fungsional: dari perbaikan struktur fisik hingga pemulihan integritas biogeokimia. Pendekatan agroekologi menekankan pada **solusi berbasis alam** (*Nature-based Solutions*), di mana teknologi digunakan bukan untuk mendominasi alam, melainkan sebagai katalisator bagi proses regenerasi mandiri tanah (Lal, 2015; Gann et al., 2019).

17.4.1 Prinsip Dasar Restorasi: Resiliensi dan Fungsionalitas

1. Pemulihan Konektivitas Hidrologis dan Termodinamika

Secara teoretis, restorasi dimulai dengan memperbaiki **efisiensi termodinamika** lahan. Lahan terdegradasi dicirikan oleh tingginya energi yang terdisipatif (seperti panas permukaan dan aliran turbulen). Restorasi harus mampu menggeser sistem dari kondisi entropi tinggi ke arah organisasi struktural.

Hal ini dicapai melalui pemulihan **jejaring pori kontinu**. Secara biofisika, penggunaan bahan organik dengan rasio C/N tinggi memicu aktivitas fauna tanah (seperti cacing tanah dan rayap) yang menciptakan makropori biogenik. Makropori ini menurunkan resistensi hidrolik, memungkinkan infiltrasi air masuk ke dalam profil tanah secara gravitasi, sekaligus memfasilitasi pertukaran gas (aerasi) yang krusial bagi metabolisme akar tanaman (Hillel, 2004).

2. Rekonstruksi Stok Karbon: Dinamika Organo-Mineral

Karbon bukan sekadar hara, melainkan **arsitek struktur**. Secara molekuler, restorasi karbon melibatkan pembentukan kompleks organo-mineral yang stabil. Bahan organik yang ditambahkan (serasah atau kompos) didekomposisi oleh mikroba menjadi senyawa humat yang bermuatan negatif. Senyawa ini berinteraksi dengan permukaan mineral liat (yang bermuatan positif atau melalui jembatan kation) membentuk

agregat mikro (μ). Agregat ini melindungi karbon dari oksidasi lebih lanjut, menciptakan penyimpanan karbon jangka panjang (*carbon sequestration*) yang sekaligus meningkatkan kapasitas tukar kation (KTK) tanah secara eksponensial (Lehmann dan Kleber, 2015).

17.4.2 Teknologi Restorasi Fisik dan Mekanis

1. Konservasi Tanah dan Air Presisi: Hidrodinamika Lereng

Secara teoretis, teknologi mekanis seperti teras bangku atau guludan bekerja dengan memanipulasi **Hukum Bernoulli** dalam aliran air. Dengan memperpendek panjang lereng, kita mencegah air mencapai "kecepatan kritis" yang mampu memulai detasemen partikel. Selain itu, pembuatan rorak (lubang jebakan air) berfungsi sebagai sistem *recharge* air tanah buatan. Secara hidrolis, rorak menciptakan gradien tekanan yang memaksa air permukaan untuk masuk secara vertikal ke dalam zona perakaran, mengubah risiko banjir menjadi cadangan air tersedia (Arsyad, 2010).

2. Teknik Olah Tanah Konservasi (*Conservation Tillage*): Kinetika Oksidasi Karbon

Olah tanah konvensional memicu lonjakan aktivitas mikroba yang terlalu cepat

(*priming effect*), yang menyebabkan pembakaran cadangan karbon tanah menjadi. Secara teoretis, *No-Tillage* mempertahankan stratifikasi nutrisi dan kelembapan. Pada sistem ini, residu tanaman dibiarkan di permukaan sebagai mulsa. Mulsa ini bertindak sebagai **isolator termal** yang menurunkan suhu permukaan tanah (interaksi tanah–iklim), menekan laju evaporasi, dan melindungi integritas biologis lapisan *topsoil* dari radiasi ultraviolet (Six et al., 2004).

17.4.3 Restorasi Kimiawi dan Amandemen Tanah Mutakhir

1. Biochar: Kinetika Adsorpsi dan Reduksi Toksisitas

Biochar memiliki struktur aromatik yang sangat stabil (grafitik). Secara molekuler, luas permukaan spesifik biochar yang dapat mencapai menyediakan situs aktif yang masif untuk adsorpsi.

- Mekanisme pada Tanah Asam: Gugus fungsi karboksil (COOH) dan hidroksil (OH) pada permukaan biochar mampu mengikat ion dan secara kovalen, mengubahnya menjadi bentuk organometalik yang tidak tersedia bagi tanaman.
- Reduksi Emisi: Biochar juga menghambat proses denitrifikasi, sehingga mengurangi emisi gas, yang membuktikan peran teknologi ini dalam memitigasi dampak buruk iklim terhadap agroekosistem (Lehmann dan Joseph, 2015).

2. Fitoremediasi: Translokasi Molekuler dan Kelas Intraseluler

Secara biologis, fitoremediasi menggunakan tanaman sebagai pompa pembersih. Proses ini melibatkan:

1. Fitoekstraksi: Akar melepaskan eksudat berupa asam organik untuk melarutkan logam berat.
2. Translokasi: Logam diangkut melalui xilem menuju tajuk menggunakan protein pengangkut (*transporter*).
3. Detoksifikasi: Di dalam sel, logam diikat oleh peptida khusus seperti fitokelatin dan disimpan di vakuola agar tidak mengganggu aktivitas enzimatik di sitoplasma (Alloway, 2013).

17.4.4 Restorasi Biologis: Arsitektur Simbiosis dan Ekologi Bentang Alam

1. Agroforestri: Strategi *Safety-Net* Nutrisi

Secara ekofisiologis, agroforestri menerapkan prinsip komplementaritas ruang dan waktu. Pohon berakar dalam (seperti tanaman legum pohon) bertindak sebagai "jaring pengaman" nutrisi yang menangkap hara yang tercuci ke lapisan bawah dan mengembalikannya ke permukaan melalui siklus serasah. Selain itu, tajuk pohon menyediakan naungan yang mengoptimalkan laju fotosintesis tanaman sela dengan mengurangi stres fotoinhibisi akibat intensitas cahaya matahari yang berlebih (iklim mikro).

2. Inokulasi Mikrobial: *Quorum Sensing* dan Sinyal Molekuler

Restorasi biologis mutakhir melibatkan penggunaan inokulan mikroba terarah. Fungi Mikoriza Arbuskular (FMA) membentuk jaringan hifa

eksternal yang menembus pori tanah yang tidak terjangkau oleh bulu akar tanaman. Secara molekuler, terjadi pertukaran sinyal (seperti hormon strigolakton) antara tanaman dan fungi yang memicu transfer Fosfor (P) secara aktif. Penggunaan konsorsium mikroba (bakteri dan fungi) menciptakan **sinergi fungsional** yang mempercepat pemulihan kesehatan tanah secara holistik (Bardgett dan van der Putten, 2014).

17.5 Resiliensi Nusantara: Contoh Kasus Rehabilitasi Lahan Kritis di Indonesia

Indonesia secara geografis berada pada titik temu lempeng tektonik dan sabuk vulkanik yang menghasilkan keragaman tanah (Pedodiversity) yang luar biasa, mulai dari Histosol yang kaya karbon hingga Ultisol yang mengalami pelapukan lanjut. Namun, posisi ini juga menempatkan Indonesia pada risiko degradasi yang ekstrem akibat intensitas iklim tropis. Rehabilitasi lahan kritis di Indonesia bukan sekadar upaya penghijauan, melainkan **restorasi kedaulatan ekosistem**. Secara teoretis, keberhasilan di Indonesia bergantung pada kemampuan kita mengintegrasikan kearifan lokal (*Indigenous Knowledge*) dengan teknologi restorasi presisi (Lal, 2015; Mulyani et al., 2021).

17.5.1 Restorasi Lahan Gambut: Dialektika Antara Karbon dan Air

1. Rekonstruksi Hidrologis: Memulihkan Integritas Termodinamika Histosol

Lahan gambut bukan sekadar tumpukan biomassa, melainkan entitas hidrologis yang berfungsi sebagai "jantung" penyimpan air. Secara teoretis, proses drainase masif di masa lalu telah menciptakan kondisi oksidasi ireversibel. Restorasi melalui *rewetting* harus dipahami sebagai upaya mengembalikan keseimbangan energi.

Ketika kanal disekat, gradien hidrolik berubah, memaksa air kembali mengisi pori-pori gambut yang kolaps. Secara biogeokimia, ini adalah perlombaan melawan waktu untuk menghentikan emisi. Tantangan kompleksnya terletak pada fenomena peat subsidence penurunan permukaan tanah yang permanen. Contoh kasus di Kalimantan Tengah menunjukkan bahwa restorasi yang berhasil memerlukan integrasi antara

sekat kanal mekanis dengan revegetasi tanaman asli yang memiliki indeks transpirasi rendah guna menjaga kelembapan mikro tetap stabil di atas permukaan gambut (Page dan Hooijer, 2016).

17.5.2 Paradigma Baru DAS Citarum: Transformasi dari Grey ke Green Infrastructure

1. Sinergi Agroekologi: Menjinakkan Energi Kinetik di Hulu

DAS Citarum sering dijuluki laboratorium restorasi paling kompleks di dunia. Di wilayah hulu (Kertasari), kita menghadapi dilema antara ekonomi pertanian sayuran dan degradasi fisik lahan. Penajaman narasi di sini berfokus pada Sistem Pertanian Konservasi Berlapis.

Secara mekanika fluida, penggunaan terasering yang dikombinasikan dengan sabuk hijau (*green belts*) dari tanaman berakar tunggang dalam (seperti kopi dan macadamia) menciptakan hambatan gesek yang luar biasa bagi aliran permukaan. Secara teoretis, sistem ini meningkatkan "waktu konsentrasi" air hujan untuk meresap ke dalam tanah, sehingga menurunkan debit puncak di hilir yang sering memicu banjir bandang di Bandung dan Karawang. Inilah wujud nyata restorasi interaksi tanah–tanaman–iklim: mengubah ancaman hidrometeorologi menjadi cadangan air tanah (Mulyani et al., 2021).

17.5.3 Technosols di Lahan Pasca-Tambang: Menciptakan Kehidupan dari Sterilitas

Antarmuka Biologis: Rekayasa Sukses Mikroba di Bangka-Belitung

Di lahan pasca-tambang timah, kita tidak sedang memperbaiki tanah, kita sedang menciptakan tanah. Penajaman sub-bab ini masuk ke dalam konsep Technosols. Tailing pasir yang steril secara fisik dan kimiawi direkayasa melalui penambahan *soil conditioner* berbasis biochar dan mikrobia ekstremofil.

Mekanisme molekulernya melibatkan penggunaan inokulan Fungi Mikoriza Arbuskular (FMA) yang mampu bertahan pada suhu tanah ekstrem (mencapai 45°C di siang hari). FMA ini bertindak sebagai "jangkar nutrisi" yang menarik hara mikro dari kedalaman pasir kuarsa yang miskin. Secara naratif, ini adalah

proses alkimia modern: mengubah limbah industri (tailing) kembali menjadi ekosistem produktif melalui intervensi biologis yang presisi (Alloway, 2013).

17.5.4 Masa Depan Restorasi: Kecerdasan Buatan dan Diplomasi Karbon Digital Twin Agroekosistem: Visualisasi Prediktif Degradasi

Sebagai penutup yang visioner, kita membahas penggunaan Digital Twin dalam restorasi. Dengan mengintegrasikan data satelit Sentinel-2, sensor tanah IoT (*Internet of Things*), dan data iklim *real-time*, kita dapat menciptakan replika digital dari sebuah DAS atau hamparan gambut.

Secara teoretis, sistem AI dapat mensimulasikan dampak dari sebuah kebijakan restorasi sebelum diimplementasikan di lapangan. Misalnya, jika kita menanam 1 juta pohon di hulu, berapa persen penurunan sedimentasi di waduk Jatiluhur sepuluh tahun ke depan? Teknologi ini memungkinkan restorasi di Indonesia bertransformasi dari sekadar "proyek penanaman" menjadi "manajemen aset ekosistem" yang terukur secara saintifik dan ekonomi melalui mekanisme bursa karbon global.

Bab ini ditutup dengan sebuah refleksi mendalam: bahwa tanah, tanaman, dan iklim adalah satu kesatuan yang tidak terpisahkan. Restorasi bukan sekadar memperbaiki kerusakan masa lalu, melainkan membangun resiliensi untuk masa depan. Di tengah ancaman perubahan iklim global, Indonesia memiliki modal alam dan modal saintifik untuk menjadi pemimpin dalam gerakan restorasi dunia.

Agroekologi mengajarkan kita bahwa bumi memiliki kapasitas untuk pulih, selama manusia mau memahami dan menghormati hukum-hukum fisik, kimia, dan biologi yang mengatur dialog antara tanah dan langit.

BAB 18

CEKAMAN ABIOTIK DAN RESPON TANAMAN

Tanaman merupakan makhluk hidup yang senantiasa berinteraksi dengan lingkungan tempat tumbuhnya. Dalam proses hidupnya, tanaman tidak selalu hidup pada kondisi yang selalu sama, melainkan berada dalam lingkungan yang terus mengalami perubahan. Perubahan tersebut dapat terjadi secara alami maupun akibat dari aktivitas manusia. Faktor-faktor lingkungan seperti iklim, ketersediaan air, kondisi tanah, intensitas cahaya, suhu udara, kelembapan, serta ketersediaan unsur hara sangat menentukan keberhasilan tanaman dalam menjalankan berbagai proses fisiologisnya. Tanaman sering menghadapi lingkungan yang kurang menguntungkan, seperti kekurangan air, suhu terlalu tinggi, suhu terlalu rendah, kadar garam tanah meningkat, atau tanah mengalami genangan. Keadaan inilah yang dikenal sebagai cekaman abiotik.

Cekaman abiotik dapat diartikan sebagai tekanan lingkungan yang berasal dari faktor non-hayati, baik berupa faktor fisik maupun kimia, yang mampu mengganggu pertumbuhan, perkembangan, dan produktivitas tanaman. Cekaman ini berbeda dengan cekaman biotik. Cekaman biotik disebabkan oleh organisme hidup, seperti hama, patogen, gulma, nematoda, atau mikroorganisme pengganggu lainnya. Sementara itu, cekaman abiotik bersumber dari kondisi lingkungan, misalnya kekeringan, suhu ekstrem, salinitas, genangan air, kekurangan unsur hara, keracunan logam berat, keasaman tanah, dan pencemaran lingkungan. Pengaruh cekaman abiotik pada tanaman dapat terlihat pada berbagai level, mulai dari perubahan fisiologis, anatomi, biokimia, hingga pertumbuhan dan hasil tanaman secara keseluruhan. Pada tingkat sel, cekaman dapat mengganggu keseimbangan air, stabilitas membran, aktivitas enzim, dan proses pembentukan energi. Pada tingkat jaringan, cekaman dapat menyebabkan kerusakan jaringan daun, akar, batang, atau organ reproduktif. Pada organ tanaman, cekaman dapat

menurunkan luas daun, menghambat pertumbuhan akar, mengurangi jumlah bunga, serta mengganggu pembentukan buah dan biji. Pada akhirnya, gangguan tersebut dapat menurunkan produktivitas tanaman secara keseluruhan, baik dari segi kuantitas maupun kualitas hasil.

Dengan demikian, pembahasan mengenai cekaman abiotik dan respons tanaman menjadi bagian penting dalam ilmu pertanian. Kemampuan tanaman dalam merespons cekaman menjadi dasar penting dalam memahami ketahanan tanaman, produktivitas lahan, dan keberlanjutan pertanian. Oleh karena itu, pembahasan pada bab ini diarahkan untuk menguraikan berbagai bentuk cekaman abiotik, khususnya cekaman kekeringan, suhu ekstrem, salinitas, dan genangan air, serta menjelaskan strategi pemuliaan dan manajemen budidaya yang dapat diterapkan untuk menghadapi kondisi lingkungan yang semakin dinamis.

18.1 Cekaman Kekeringan dan Mekanisme Toleransi Tanaman

Cekaman kekeringan merupakan salah satu bentuk cekaman abiotik yang paling sering ditemukan dalam sistem budidaya tanaman. Kondisi ini banyak dijumpai pada wilayah dengan curah hujan rendah, musim kemarau yang panjang, ketersediaan air irigasi yang terbatas, maupun pada lahan tadah hujan yang sangat bergantung pada air hujan. Kekeringan dapat terjadi ketika air yang tersedia di dalam tanah tidak cukup untuk memenuhi kebutuhan tanaman dalam menjalankan proses pertumbuhan dan perkembangannya. Air mempunyai peranan yang sangat penting bagi kehidupan tanaman. Hampir seluruh proses fisiologis tanaman membutuhkan air, baik secara langsung maupun tidak langsung. Air digunakan sebagai bahan dalam proses fotosintesis, pelarut unsur hara, media pengangkutan zat makanan, penjaga tekanan turgor sel, serta pengatur suhu tanaman melalui transpirasi. Oleh karena itu, ketika ketersediaan air terganggu, tanaman tidak hanya mengalami penghambatan pada pertumbuhan, tetapi juga mengalami gangguan pada proses metabolisme di dalam tubuhnya. Pada kondisi normal, akar tanaman menyerap air dari dalam tanah. Air tersebut kemudian dialirkan melalui jaringan pembuluh menuju batang, daun, bunga, dan buah. Sebagian air digunakan untuk mendukung proses metabolisme, sedangkan sebagian besar

lainnya dilepaskan ke udara melalui transpirasi. Proses transpirasi memiliki peran penting bagi tanaman karena dapat membantu mengatur suhu daun, memperlancar pergerakan air dari akar menuju bagian tajuk, serta mendukung distribusi unsur hara ke seluruh jaringan tanaman. Namun, ketika tanah mulai kering, jumlah air yang dapat diserap akar menjadi berkurang, sementara kehilangan air melalui transpirasi tetap berlangsung. Keadaan inilah yang menyebabkan tanaman mengalami defisit air (Grishin et al., 2021; Faralli et al., 2023; Grunwald, Yaaran and Moshelion, 2024).

Setiap jenis tanaman mempunyai tingkat ketahanan yang berbeda terhadap kondisi kekeringan. Perbedaan ini dipengaruhi oleh sifat genetik, jenis tanaman, umur tanaman, fase pertumbuhan, kondisi tanah, serta lamanya cekaman terjadi. Tanaman yang terbiasa tumbuh di lahan kering umumnya memiliki mekanisme adaptasi yang lebih baik, misalnya akar yang lebih dalam, daun yang lebih kecil, lapisan kutikula lebih tebal, atau kemampuan mengatur penggunaan air secara lebih efisien. Secara umum, respons tanaman dalam menghadapi kekeringan dapat dikelompokkan menjadi tiga bentuk, yaitu penghindaran terhadap kekeringan, toleransi terhadap kekeringan, serta kemampuan tanaman untuk pulih setelah mengalami cekaman kekeringan (Hou et al., 2021; Seleiman et al., 2021; Haghpanah et al., 2024). Penghindaran terhadap kekeringan merupakan kemampuan tanaman untuk mengurangi dampak kekurangan air sebelum kerusakan yang lebih berat terjadi. Toleransi kekeringan merupakan kemampuan tanaman untuk tetap menjalankan fungsi fisiologis meskipun kandungan air dalam jaringan menurun. Salah satu mekanisme penting dalam toleransi kekeringan adalah penyesuaian osmotik. Mekanisme toleransi pada tanaman merupakan serangkaian respons yang dilakukan tanaman untuk mengurangi dampak negatif cekaman lingkungan. Respons tersebut tidak terjadi dengan sendirinya, tetapi melibatkan perubahan yang saling berkaitan, mulai dari perubahan bentuk tubuh, pengaturan proses fisiologis, aktivitas biokimia, keseimbangan hormon, hingga kemampuan memperbaiki jaringan setelah cekaman berakhir. Dengan adanya mekanisme toleransi, tanaman berusaha mempertahankan fungsi hidupnya meskipun berada pada kondisi lingkungan yang tidak ideal.

Secara umum, mekanisme toleransi tanaman dapat dijelaskan melalui beberapa aspek utama, yaitu Respon Fisiologi, Respon morfologi, dan biokimia tanaman. pengaturan stomata, penyesuaian osmotik, aktivasi sistem antioksidan, pengaturan hormon, perubahan anatomi, stabilitas membran sel, pengaturan pertumbuhan, serta kemampuan pemulihan setelah cekaman.

Respon Fisiologi Tanaman terhadap kekeringan

Pada fase awal kekeringan, tanaman umumnya menunjukkan respons fisiologis berupa penutupan stomata. Stomata adalah organ tumbuhan yang berbentuk lubang-lubang kecil di sel epidermis daun yang membantu fotosintesis dan transpirasi. Ketika ketersediaan air mulai menurun, tanaman akan menutup stomata sebagai upaya untuk mengurangi kehilangan air melalui proses transpirasi. Menutupnya stomata berguna untuk mempertahankan keseimbangan air di dalam jaringan tanaman, terutama pada kondisi tanah yang mulai mengering (Graci and Barone, 2023). Namun, penutupan stomata juga memiliki konsekuensi terhadap proses fotosintesis. Ketika stomata menutup, masuknya karbon dioksida ke dalam daun menjadi terbatas. Karbon dioksida merupakan bahan utama dalam proses fotosintesis, sehingga keterbatasannya dapat menyebabkan laju fotosintesis menurun. Penurunan fotosintesis berdampak pada berkurangnya produksi asimilat atau hasil fotosintesis yang diperlukan untuk pertumbuhan dan pembentukan organ tanaman. Akibatnya, pertumbuhan tanaman menjadi lebih lambat, pembentukan jaringan baru terhambat, dan kemampuan tanaman dalam menghasilkan biomassa menurun.

Apabila kekeringan berlangsung dalam waktu yang lama, dampaknya akan terlihat lebih jelas pada pertumbuhan dan hasil tanaman. Tanaman dapat mengalami penurunan tinggi, berkurangnya jumlah daun, mengecilnya luas daun, serta menurunnya bobot segar dan bobot kering tanaman. Pada fase generatif, kekeringan dapat mengganggu pembungaan, penyerbukan, pembentukan buah, dan pengisian biji. Kondisi ini pada akhirnya dapat menyebabkan penurunan hasil panen, baik dari segi jumlah maupun kualitas hasil yang diperoleh (Sehgal *et al.*, 2018; Yu, Jiang and Guo, 2019; Brunet *et al.*, 2025). Selain menghambat fotosintesis, kekeringan juga memengaruhi penyerapan unsur hara oleh tanaman. Air memiliki peran penting sebagai pelarut dan media transportasi unsur hara dari tanah menuju akar. Ketika

kandungan air tanah terbatas, pergerakan unsur hara di dalam tanah juga menjadi lebih lambat. Unsur hara seperti nitrogen, fosfor, dan kalium tidak dapat diserap secara optimal karena mobilitasnya sangat dipengaruhi oleh ketersediaan air. Dengan demikian, tanaman yang mengalami kekeringan tidak hanya menghadapi kekurangan air, tetapi juga berpotensi mengalami kekurangan hara.

Respon Morfologi Tanaman terhadap kekeringan

Respons morfologi tanaman merupakan perubahan yang terjadi pada bentuk, struktur, dan pola pertumbuhan tanaman sebagai upaya penyesuaian terhadap kondisi lingkungan yang kurang baik. Ketika tanaman berada dalam kondisi kurang baik, seperti kekeringan, tanaman tidak hanya mengalami hambatan pertumbuhan, tetapi juga berusaha mengatur kembali pola pertumbuhannya agar penggunaan air, energi, dan hasil fotosintesis menjadi lebih efisien. Pada kondisi kekeringan, bagian tanaman yang paling cepat menunjukkan respons adalah daun. Tanaman yang terkena cekaman kekeringan akan mengurangi luas daun, menggulung daun, menggugurkan daun tua, atau mempertebal lapisan kutikula. Pengurangan luas daun merupakan cara tanaman untuk menekan kehilangan air melalui transpirasi. Semakin luas permukaan daun, semakin besar pula peluang air hilang ke atmosfer. Oleh karena itu, dengan mengurangi luas daun, tanaman berupaya mengurangi beban penguapan air dari permukaan tajuk.

Selain itu, penggulungan daun menjadi salah satu bentuk respons morfologi yang ada pada tanaman. Daun menggulung ketika ketersediaan air menurun. Respon ini membantu mengurangi permukaan daun yang terkena cahaya matahari secara langsung, sehingga suhu daun dan kehilangan air dapat ditekan. Daun yang menggulung juga dapat menciptakan ruang mikro yang lebih lembap di sekitar permukaan daun, sehingga laju transpirasi tidak berlangsung terlalu tinggi. Selain menggulungkan daun, tanaman juga menggugurkan daun tua ketika mengalami kekeringan. Daun tua umumnya memiliki aktivitas fisiologis yang mulai menurun, tetapi tetap membutuhkan air untuk mempertahankan jaringannya. Dengan menggugurkan daun tua, tanaman dapat mengurangi kebutuhan air total dan mengalihkan sumber daya yang terbatas untuk mempertahankan jaringan yang lebih muda dan lebih

aktif. Strategi ini menunjukkan bahwa tanaman mampu melakukan pengaturan prioritas pertumbuhan ketika berada dalam kondisi cekaman.

Respon morfologi tanaman ketika terjadi kekeringan tidak hanya terjadi pada daun, tetapi juga pada sistem perakaran. Ketika tanaman sulit mendapat air, tanaman memperpanjang akar, meningkatkan jumlah cabang akar dan memperluas daerah jelajah perakaran. Akar yang lebih panjang memungkinkan tanaman menjangkau air pada lapisan tanah yang lebih dalam (Kou, Han and Kang, 2022). Sementara itu, akar yang lebih bercabang dapat memperluas bidang serapan sehingga peluang memperoleh air dan unsur hara menjadi lebih besar (Duque and Villordon, 2019). Hal ini menunjukkan bahwa tanaman mampu mengalihkan sebagian energi pertumbuhannya dari bagian tajuk ke bagian akar untuk mempertahankan kelangsungan hidup. Perubahan pertumbuhan akar juga menunjukkan adanya pengalihan alokasi energi dari tajuk ke akar. Pada saat air terbatas, tanaman cenderung mengurangi pertumbuhan bagian atas, seperti daun dan batang, lalu mempertahankan atau meningkatkan pertumbuhan akar. Strategi ini penting karena akar merupakan organ utama yang bertanggung jawab dalam penyerapan air dan unsur hara. Dengan memperkuat sistem perakaran, tanaman memiliki peluang lebih besar untuk memperoleh air. Melalui pengurangan luas daun, penggulungan daun, pengguguran daun tua, penebalan kutikula, serta pengembangan sistem perakaran yang lebih kuat, tanaman berusaha mengurangi kehilangan air dan meningkatkan kemampuan memperoleh air dari lingkungan. Mekanisme ini menunjukkan bahwa tanaman memiliki kemampuan adaptif yang kompleks untuk mempertahankan fungsi hidupnya pada kondisi lingkungan yang tidak ideal.

Respon Biokimia Tanaman terhadap cekaman kekeringan

Respon biokimia tanaman adalah perubahan terukur pada molekul dan jalur metabolik yang menunjukkan bagaimana sistem biologis tanaman bereaksi terhadap kondisi normal, gangguan, atau intervensi, tanaman yang toleran terhadap kekeringan memiliki kemampuan untuk menyesuaikan kondisi internal sel agar tetap dapat bertahan meskipun ketersediaan air terbatas. Salah satu bentuk penyesuaian tersebut adalah akumulasi senyawa osmotik. Senyawa ini meliputi prolin, gula larut, glisin betain, serta beberapa jenis asam amino tertentu. Keberadaan senyawa-senyawa tersebut berperan

penting dalam menjaga keseimbangan osmotik sel, sehingga air tetap dapat dipertahankan di dalam jaringan tanaman.

Akumulasi osmotik membantu tanaman mempertahankan tekanan turgor sel. Tekanan turgor sangat penting karena berhubungan dengan pembesaran sel, pertumbuhan jaringan, dan kemampuan tanaman untuk tetap tegak. Selain itu, osmoprotektan berperan dalam melindungi membran sel, menjaga kestabilan protein, serta mempertahankan aktivitas enzim selama tanaman berada dalam kondisi kekeringan (Blum, 2017). Dengan adanya mekanisme ini, proses metabolisme tanaman masih dapat berlangsung meskipun tidak seoptimal pada kondisi normal. Selain memengaruhi keseimbangan osmotik, cekaman kekeringan juga dapat mengganggu kestabilan metabolisme sel dan memicu terbentuknya *reactive oxygen species* atau ROS. ROS merupakan molekul reaktif yang dapat terbentuk ketika tanaman mengalami tekanan lingkungan (Nadarajah, 2020). Dalam jumlah rendah, ROS dapat berfungsi sebagai sinyal untuk mengaktifkan respons pertahanan. Namun, apabila jumlahnya berlebihan, ROS dapat menyebabkan kerusakan oksidatif pada membran sel, protein, enzim, klorofil, dan materi genetik tanaman.

Untuk mengurangi dampak kerusakan tersebut, tanaman mengaktifkan sistem antioksidan. Sistem antioksidan bekerja dengan cara menetralkan ROS agar tidak menumpuk secara berlebihan di dalam jaringan. Antioksidan tanaman dapat berupa enzimatis maupun non-enzimatis. Antioksidan enzimatis meliputi superoksida dismutase, katalase, dan peroksidase, sedangkan antioksidan non-enzimatis antara lain askorbat dan glutathion. Tanaman yang memiliki sistem antioksidan lebih kuat umumnya lebih mampu mempertahankan fungsi sel, menjaga kestabilan klorofil, dan bertahan lebih baik saat menghadapi cekaman kekeringan. Dengan demikian, cekaman kekeringan tidak hanya berkaitan dengan kurangnya air di dalam tanah. Kekeringan juga berdampak pada fotosintesis, penyerapan unsur hara, keseimbangan hormon, metabolisme sel, pertumbuhan organ, dan pembentukan hasil. Tanaman yang mampu bertahan pada kondisi kekeringan umumnya memiliki kemampuan menyesuaikan diri melalui perubahan morfologi, fisiologi, dan biokimia. Pemahaman mengenai mekanisme ini penting sebagai dasar dalam pengembangan teknologi budidaya, pemuliaan

varietas toleran kekeringan, serta pengelolaan lahan kering yang lebih produktif dan berkelanjutan.

18.2 Cekaman Suhu Tinggi dan Rendah pada Pertumbuhan Tanaman

Salah satu faktor lingkungan yang mempengaruhi pertumbuhan dan perkembangan tanaman adalah suhu. Setiap tanaman memiliki rentang suhu optimum yang berbeda untuk mendukung berlangsungnya proses fisiologis. Pada suhu yang sesuai, berbagai proses penting seperti perkecambahan, pembelahan sel, fotosintesis, respirasi, penyerapan air dan unsur hara, serta pembentukan bunga dan buah dapat berjalan dengan baik. Akan tetapi, apabila suhu lingkungan melebihi atau berada di bawah batas toleransi tanaman, proses pertumbuhan akan terganggu. Kondisi tersebut dikenal sebagai cekaman suhu, yang dapat terjadi dalam bentuk suhu tinggi maupun suhu rendah. Kedua jenis cekaman ini sama-sama berpotensi menghambat perkembangan tanaman dan menurunkan produktivitas hasil.

18.2.1 Cekaman Suhu Tinggi pada Pertumbuhan Tanaman

Cekaman suhu tinggi terjadi ketika suhu lingkungan berada di atas batas kemampuan tanaman untuk beradaptasi. Kondisi ini sering dijumpai pada musim kemarau, lahan terbuka yang tidak memiliki naungan, wilayah dataran rendah dengan suhu udara tinggi, maupun saat terjadi gelombang panas. Cekaman suhu tinggi dapat menurunkan kinerja tanaman secara menyeluruh, baik pada aspek pertumbuhan maupun kualitas hasil panen. Suhu yang melebihi batas toleransi tanaman dapat mengganggu berbagai proses fisiologis penting, seperti fotosintesis, respirasi, penyerapan unsur hara, serta keseimbangan air di dalam jaringan (Firmansyah and Argosubekti, 2020). Pada fase vegetatif, gejala awal umumnya terjadi pada bagian daun dan tajuk. Tanaman yang terpapar suhu tinggi menunjukkan daun menggulung, layu, menguning, serta mengering pada bagian ujung atau tepi daun. Daun menggulung merupakan salah satu bentuk penyesuaian tanaman untuk mengurangi luas permukaan yang terkena cahaya matahari secara langsung, sehingga kehilangan air melalui transpirasi dapat ditekan. Namun, apabila suhu tinggi berlangsung dalam waktu lama, jaringan daun dapat mengalami kerusakan yang lebih serius, seperti klorosis, nekrosis, dan penurunan luas

daun aktif untuk fotosintesis (Winter, Garcia and Virgo, 2025). Selain pada daun, cekaman suhu tinggi pada fase vegetatif juga dapat menghambat pertumbuhan batang, cabang, dan akar. Tanaman cenderung tumbuh lebih pendek, diameter batang lebih kecil, serta pembentukan cabang menjadi kurang optimal. Pertumbuhan akar juga dapat terganggu, terutama apabila suhu tinggi disertai kekurangan air di sekitar perakaran. Kondisi tersebut menyebabkan kemampuan tanaman dalam menyerap air dan unsur hara menjadi menurun. Akibatnya, pertumbuhan vegetatif berjalan tidak maksimal dan pembentukan biomassa tanaman berkurang.

Ketika tanaman memasuki fase generatif, suhu tinggi menjadi lebih kritis karena berhubungan langsung dengan pembentukan hasil. Pada fase ini, suhu yang terlalu tinggi dapat mengganggu pembentukan bunga, menyebabkan bunga mudah rontok, serta menurunkan keberhasilan proses penyerbukan dan pembuahan (Kumar *et al.*, 2025; Liu *et al.*, 2026). Pada beberapa tanaman, suhu tinggi dapat menurunkan viabilitas serbuk sari, sehingga serbuk sari tidak mampu berkecambah dengan baik atau gagal membuahi bakal biji. Selain itu, perkembangan bakal buah juga dapat terhambat sehingga jumlah buah yang terbentuk menjadi lebih sedikit. Gangguan morfologi pada fase generatif akhirnya berdampak langsung terhadap produktivitas tanaman. Buah yang terbentuk dapat berukuran lebih kecil, jumlah biji berkurang, kualitas hasil menurun, bahkan pada kondisi cekaman berat dapat terjadi kegagalan pembentukan buah. Dengan demikian, cekaman suhu tinggi tidak hanya menghambat pertumbuhan vegetatif, tetapi juga dapat menurunkan keberhasilan reproduksi tanaman. Oleh karena itu, fase pembungaan, penyerbukan, dan pembentukan buah menjadi periode yang sangat sensitif terhadap suhu tinggi.

Gangguan tersebut kemudian berdampak pada terhambatnya pertumbuhan vegetatif, perubahan fase perkembangan tanaman, percepatan atau keterlambatan waktu berbunga, serta terganggunya proses pembentukan dan pengisian biji. Selain menurunkan kuantitas hasil, stres panas juga dapat memengaruhi mutu hasil panen, termasuk kandungan gizi, senyawa fitokimia, dan metabolit penting yang menentukan kualitas tanaman. Dengan demikian, cekaman suhu tinggi tidak hanya berdampak pada penurunan hasil, tetapi juga dapat memengaruhi nilai fisiologis, agronomis, dan kualitas produk tanaman

secara keseluruhan (Ergo et al., 2018; Guy, 1999; Ullah et al., 2022; Vu et al., 2020).

18.2.2 Cekaman Suhu Rendah pada Pertumbuhan Tanaman

Cekaman suhu rendah merupakan kondisi ketika tanaman mengalami penurunan suhu di bawah kisaran optimum yang dibutuhkan untuk pertumbuhan dan perkembangan normal. Setiap tanaman memiliki batas toleransi yang berbeda terhadap suhu rendah. Tanaman yang berasal dari daerah tropis umumnya lebih peka terhadap suhu rendah dibandingkan tanaman subtropis atau tanaman dataran tinggi. Apabila suhu rendah berlangsung dalam waktu yang cukup lama, berbagai proses metabolisme tanaman dapat melambat, sehingga pertumbuhan menjadi terhambat dan produktivitas menurun. Cekaman suhu rendah dapat dibedakan menjadi dua bentuk, yaitu *chilling stress* dan *freezing stress*. *Chilling stress* terjadi ketika tanaman mengalami suhu rendah di atas titik beku, biasanya berkisar antara 0–15°C, Sementara itu, *freezing stress* terjadi ketika suhu turun hingga di bawah 0°C, sehingga air di dalam atau di sekitar sel tanaman dapat membeku (Aslam et al., 2022; Satyakam et al., 2022)

Pada fase perkecambahan, suhu rendah dapat memperlambat proses imbibisi atau penyerapan air oleh benih. Padahal, penyerapan air merupakan tahap awal yang sangat penting untuk mengaktifkan enzim dan memulai pertumbuhan embrio. Ketika suhu terlalu rendah, aktivitas enzim menjadi lambat sehingga proses pemecahan cadangan makanan dalam benih tidak berjalan optimal. Akibatnya, benih membutuhkan waktu lebih lama untuk berkecambah, persentase kecambah menurun, dan pertumbuhan awal bibit menjadi tidak seragam. Pada kondisi yang lebih berat, benih dapat gagal berkecambah karena proses metabolisme awal tidak mampu berlangsung dengan baik (Luo et al., 2022)

Memasuki fase vegetatif, cekaman suhu rendah dapat menghambat pertumbuhan akar, batang, dan daun. Pertumbuhan akar biasanya menjadi lebih lambat karena pembelahan dan pemanjangan sel di daerah ujung akar terganggu. Akar yang berkembang tidak optimal akan menurunkan kemampuan tanaman dalam menyerap air dan unsur hara. Kondisi ini menyebabkan tanaman tampak kerdil, pertumbuhan tajuk lambat, dan

pembentukan biomassa berkurang. Selain itu, suhu rendah juga dapat menghambat penyerapan unsur hara tertentu, terutama fosfor, sehingga tanaman dapat menunjukkan gejala pertumbuhan lemah meskipun unsur hara tersedia di dalam tanah. Daun merupakan organ yang sangat mudah menunjukkan gejala akibat suhu rendah. Secara morfologi, tanaman yang mengalami cekaman suhu rendah dapat memperlihatkan daun menguning, daun layu, pertumbuhan daun kecil, perubahan warna daun menjadi keunguan, bercak nekrotik, hingga kematian jaringan pada kondisi yang berat. Warna keunguan pada daun sering berkaitan dengan akumulasi antosianin dan terganggunya metabolisme fosfor. Pada beberapa tanaman, suhu rendah juga dapat menyebabkan daun menjadi kaku, mudah patah, atau mengalami kerusakan pada bagian tepi daun. Gejala tersebut menunjukkan bahwa jaringan tanaman tidak mampu menjalankan fungsi fisiologis secara normal.

Dari sisi fisiologis, suhu rendah sangat memengaruhi proses fotosintesis. Pada kondisi dingin, aktivitas enzim yang terlibat dalam fotosintesis menurun. Kloroplas sebagai tempat berlangsungnya fotosintesis juga dapat mengalami gangguan, terutama pada membran tilakoid yang berperan dalam reaksi terang. Akibatnya, kemampuan tanaman dalam menangkap cahaya, mengubah energi cahaya menjadi energi kimia, dan membentuk karbohidrat menjadi berkurang (Wang *et al.*, 2024; Liu *et al.*, 2026). Penurunan fotosintesis menyebabkan pasokan energi untuk pertumbuhan tanaman menjadi terbatas, sehingga tanaman tumbuh lambat dan hasil akhirnya menurun. Suhu rendah juga memengaruhi keseimbangan air di dalam tanaman. Pada kondisi dingin, kemampuan akar menyerap air dapat menurun karena aktivitas akar melemah. Di sisi lain, daun tetap membutuhkan air untuk mempertahankan tekanan turgor dan menjalankan metabolisme. Ketidakseimbangan antara penyerapan air oleh akar dan kebutuhan air di bagian tajuk dapat menyebabkan tanaman tampak layu, meskipun tanah masih mengandung air. Fenomena ini menunjukkan bahwa suhu rendah tidak hanya menyebabkan hambatan metabolisme, tetapi juga mengganggu hubungan air dalam jaringan tanaman.

Pada fase generatif, suhu rendah dapat memberikan dampak yang besar terhadap pembentukan bunga, penyerbukan, pembuahan, dan pembentukan biji atau buah. Suhu rendah dapat memperlambat pembentukan bunga,

menyebabkan bunga tidak berkembang sempurna, serta meningkatkan risiko kerontokan bunga. Pada beberapa tanaman, suhu rendah dapat menurunkan viabilitas serbuk sari dan menghambat pertumbuhan tabung polen. Jika proses penyerbukan dan pembuahan terganggu, jumlah buah atau biji yang terbentuk akan berkurang (Wagner *et al.*, 2017; Parrotta *et al.*, 2019). Dampak ini sangat merugikan karena fase generatif berkaitan langsung dengan hasil panen.

18.3 Cekaman Salinitas dan Adaptasi Tanaman

Cekaman salinitas merupakan kondisi ketika kadar garam terlarut di dalam tanah atau air irigasi meningkat hingga mengganggu pertumbuhan tanaman. Garam yang paling sering menimbulkan masalah adalah natrium klorida atau NaCl. Pada kondisi salin, tanaman tidak hanya mengalami kesulitan menyerap air, tetapi juga menghadapi gangguan keseimbangan ion di dalam jaringan. Akibatnya, proses pertumbuhan, fotosintesis, penyerapan hara, dan pembentukan hasil dapat menurun. Cekaman salinitas merupakan kondisi ketika kadar garam terlarut di dalam tanah atau air irigasi meningkat hingga mengganggu pertumbuhan tanaman. Garam yang paling sering menimbulkan masalah adalah natrium klorida atau NaCl. Pada kondisi salin, tanaman tidak hanya mengalami kesulitan menyerap air, tetapi juga menghadapi gangguan keseimbangan ion di dalam jaringan. Akibatnya, proses pertumbuhan, fotosintesis, penyerapan hara, dan pembentukan hasil dapat menurun. Salinitas juga berdampak langsung terhadap proses fotosintesis (Isayenkov and Maathuis, 2019; Ma *et al.*, 2021; Atta *et al.*, 2023). Pada kondisi salin, tanaman sering menutup stomata untuk mengurangi kehilangan air. Namun, penutupan stomata menyebabkan masuknya karbon dioksida ke dalam daun menjadi terbatas. Akibatnya, laju fotosintesis menurun dan produksi karbohidrat berkurang. Selain itu, akumulasi garam dapat merusak klorofil dan struktur kloroplas, sehingga kemampuan daun dalam menangkap cahaya menjadi tidak optimal. Penurunan fotosintesis ini akhirnya berdampak pada rendahnya pertumbuhan dan hasil tanaman.

Tanaman juga melakukan adaptasi melalui penyesuaian osmotik. Mekanisme ini dilakukan dengan mengakumulasi senyawa kompatibel seperti prolin, gula larut, glisin betain, dan asam amino tertentu. Senyawa tersebut membantu menjaga tekanan osmotik sel, mempertahankan kandungan air jaringan, melindungi membran, dan menjaga aktivitas enzim (Panda *et al.*, 2024).

Dengan mekanisme ini, tanaman dapat tetap mempertahankan turgor sel meskipun berada pada lingkungan dengan kadar garam tinggi. Adaptasi lain yang penting adalah kemampuan tanaman mengatur distribusi ion. Tanaman toleran salinitas biasanya mampu membatasi masuknya natrium ke dalam akar, mengeluarkan natrium dari sel, atau menyimpan ion berlebih ke dalam vakuola agar tidak merusak sitoplasma. Selain itu, tanaman juga berusaha mempertahankan rasio kalium dan natrium tetap seimbang. Rasio K^+/Na^+ yang tinggi menjadi salah satu indikator penting toleransi tanaman terhadap salinitas karena kalium sangat dibutuhkan dalam proses metabolisme dan pengaturan stomata.

Secara morfologi, beberapa tanaman beradaptasi dengan mengurangi luas daun, mempertebal lapisan kutikula, meningkatkan pertumbuhan akar tertentu, atau mempercepat siklus hidup untuk menghindari periode salinitas tinggi. Pada tanaman tertentu, terdapat pula kemampuan menggugurkan daun tua yang telah mengakumulasi garam dalam jumlah tinggi. Strategi ini membantu mengurangi beban garam dalam jaringan aktif tanaman. Pada fase generatif, cekaman salinitas dapat menyebabkan pembentukan bunga terganggu, bunga mudah rontok, jumlah buah menurun, ukuran buah mengecil, dan pengisian biji tidak sempurna. Hal ini terjadi karena energi tanaman lebih banyak digunakan untuk bertahan dari cekaman, bukan untuk membentuk organ hasil. Oleh karena itu, salinitas tidak hanya menurunkan pertumbuhan vegetatif, tetapi juga berdampak besar terhadap produktivitas dan mutu hasil panen.

18.4 Cekaman Genangan Air dan Respons Anatomi-Fisiologi Tanaman

Cekaman genangan air merupakan kondisi ketika tanah mengalami kelebihan air dalam waktu tertentu sehingga ruang pori tanah terisi oleh air dan ketersediaan oksigen menjadi sangat terbatas. Kondisi ini sering terjadi pada lahan dengan drainase buruk, curah hujan tinggi, sistem irigasi yang tidak terkontrol, atau tanah bertekstur berat seperti liat. Bagi tanaman, genangan air menjadi masalah serius karena akar membutuhkan oksigen untuk respirasi dan aktivitas metabolisme. Ketika oksigen di sekitar akar menurun, fungsi akar dalam menyerap air dan unsur hara menjadi terganggu. Dampak awal dari

genangan air biasanya terjadi pada sistem perakaran. Akar yang berada dalam tanah jenuh air mengalami kekurangan oksigen atau hipoksia. Jika kondisi berlanjut lebih berat, akar dapat mengalami anoksia, yaitu keadaan hampir tanpa oksigen. Akibatnya, respirasi aerobik pada akar menurun dan produksi energi menjadi terbatas. Kekurangan energi ini menyebabkan pertumbuhan akar melambat, akar mudah membusuk, rambut akar berkurang, serta kemampuan tanaman menyerap unsur hara menurun ((Herzog *et al.*, 2016; Armstrong *et al.*, 2019). Tanaman kemudian menunjukkan gejala pertumbuhan terhambat, daun menguning, layu, dan penurunan biomassa.

18.4.1 Respon Anatomi terhadap cekaman genangan air

Salah satu respon anatomi tanaman terhadap genangan air adalah pembentukan jaringan aerenkima. Aerenkima merupakan jaringan berongga yang terbentuk pada akar atau batang dan berfungsi membantu pergerakan oksigen dari bagian tajuk menuju akar. Dengan adanya aerenkima, akar masih dapat memperoleh oksigen meskipun berada pada lingkungan tanah yang tergenang. Tanaman yang toleran terhadap genangan biasanya memiliki kemampuan lebih baik dalam membentuk aerenkima, sehingga dapat bertahan lebih lama pada kondisi kekurangan oksigen. Selain membentuk aerenkima, beberapa tanaman juga membentuk akar adventif. Akar adventif adalah akar tambahan yang muncul dari bagian batang dekat permukaan tanah. Akar ini membantu tanaman memperoleh oksigen dan menyerap air serta hara dari lapisan tanah yang lebih dekat dengan permukaan. Pada kondisi genangan, akar utama sering mengalami kerusakan, sehingga pembentukan akar adventif menjadi strategi penting untuk mempertahankan fungsi perakaran. Respons ini banyak ditemukan pada tanaman yang relatif toleran terhadap lingkungan basah.

18.4.2 Respon Fisiologi terhadap cekaman genangan air

Dari sisi fisiologis, genangan air menyebabkan penurunan aktivitas fotosintesis. Hal ini terjadi karena gangguan akar akan memengaruhi suplai air, hara, dan sinyal hormonal menuju daun. Selain itu, tanaman yang mengalami genangan sering menunjukkan penutupan stomata. Penutupan stomata bertujuan mengurangi kehilangan air dan menjaga keseimbangan fisiologis tanaman, tetapi di sisi lain membatasi masuknya karbon dioksida ke

dalam daun. Akibatnya, laju fotosintesis menurun dan pembentukan karbohidrat sebagai sumber energi pertumbuhan menjadi berkurang. Genangan air juga mengganggu keseimbangan unsur hara di dalam tanah. Pada kondisi tanah tergenang, reaksi kimia tanah berubah karena rendahnya oksigen. Beberapa unsur hara menjadi sulit tersedia, sedangkan unsur tertentu dapat meningkat hingga bersifat toksik bagi tanaman. Misalnya, ketersediaan nitrogen dapat menurun akibat proses denitrifikasi (Zhang *et al.*, 2023; Rupngam and Messiga, 2024), sedangkan unsur seperti besi dan mangan dapat meningkat pada kondisi reduktif. Ketidakseimbangan ini menyebabkan tanaman mengalami defisiensi atau keracunan hara, yang kemudian memperparah penurunan pertumbuhan.

18.5 Strategi Pemuliaan dan Manajemen Budidaya dalam Kondisi Cekaman

Strategi menghadapi cekaman abiotik pada tanaman tidak cukup hanya dilakukan melalui perbaikan teknik budidaya, tetapi juga perlu didukung oleh pemuliaan tanaman yang terarah. Cekaman seperti kekeringan, suhu ekstrem, salinitas, dan genangan air dapat menurunkan pertumbuhan, mengganggu proses fisiologis, serta mengurangi hasil panen. Oleh karena itu, diperlukan pendekatan terpadu antara pemilihan varietas toleran dan pengelolaan lingkungan tumbuh agar tanaman tetap mampu memproduksi secara optimal.

Pemuliaan tanaman berperan penting dalam menghasilkan varietas yang memiliki kemampuan adaptasi lebih baik terhadap kondisi cekaman. Varietas toleran biasanya memiliki karakter tertentu, seperti sistem perakaran yang kuat, efisiensi penggunaan air yang tinggi, kemampuan mempertahankan fotosintesis, kestabilan membran sel, serta aktivitas antioksidan yang lebih baik. Pada cekaman salinitas, misalnya, tanaman toleran umumnya mampu menjaga keseimbangan ion K^+ dan Na^+ . Sementara itu, pada cekaman genangan, tanaman yang adaptif dapat membentuk aerenkima dan akar adventif untuk membantu suplai oksigen ke jaringan akar. Strategi pemuliaan dapat dilakukan melalui seleksi konvensional, persilangan, pemanfaatan plasma nutfah lokal, hingga pendekatan modern seperti seleksi berbantuan marka molekuler. Plasma nutfah lokal menjadi sumber genetik penting karena umumnya telah beradaptasi dengan kondisi lingkungan setempat. Melalui

proses seleksi yang tepat, sifat-sifat unggul seperti toleransi kekeringan, ketahanan terhadap suhu tinggi, atau kemampuan tumbuh pada tanah salin dapat dimanfaatkan untuk menghasilkan varietas baru yang lebih tahan terhadap cekaman lingkungan.

Selain melakukan pemuliaan tanaman, manajemen budidaya manajemen budidaya juga menjadi faktor utama dalam mengurangi dampak cekaman. Pengaturan waktu tanam merupakan langkah sederhana tetapi sangat penting. Penanaman sebaiknya disesuaikan dengan pola musim, ketersediaan air, dan kemungkinan terjadinya suhu ekstrem. Pada daerah rawan kekeringan, penanaman dapat diarahkan pada awal musim hujan atau menggunakan varietas berumur genjah agar tanaman dapat menyelesaikan siklus hidup sebelum cekaman berat terjadi. Pengelolaan air menjadi strategi penting, terutama pada cekaman kekeringan dan genangan. Pada kondisi kekeringan, efisiensi irigasi perlu ditingkatkan melalui penyiraman terjadwal, penggunaan irigasi tetes, mulsa, dan konservasi kelembapan tanah. Sebaliknya, pada lahan yang mudah tergenang, perbaikan drainase, pembuatan bedengan, dan pengaturan saluran pembuangan air menjadi langkah penting untuk menjaga akar tetap memperoleh oksigen. Dengan pengelolaan air yang tepat, tanaman dapat mengurangi tekanan fisiologis akibat kekurangan maupun kelebihan air.

Pemupukan seimbang juga berperan dalam meningkatkan ketahanan tanaman terhadap cekaman. Tanaman yang memperoleh unsur hara cukup akan memiliki pertumbuhan akar lebih baik, jaringan lebih kuat, dan metabolisme lebih stabil. Unsur kalium, misalnya, berperan dalam pengaturan stomata dan keseimbangan air tanaman. Kalsium membantu menjaga kestabilan dinding dan membran sel, sedangkan nitrogen, fosfor, dan magnesium mendukung pertumbuhan serta fotosintesis. Namun, pemberian pupuk harus disesuaikan dengan kebutuhan tanaman karena pemupukan berlebihan dapat memperburuk kondisi tanah, terutama pada lahan salin. Pemberian bahan organik merupakan salah satu strategi budidaya yang efektif dalam memperbaiki ketahanan tanaman terhadap cekaman. Bahan organik dapat memperbaiki struktur tanah, meningkatkan kemampuan tanah menahan air, memperbaiki aerasi, serta meningkatkan aktivitas mikroorganisme tanah. Pada tanah salin, bahan organik membantu memperbaiki sifat fisik dan kimia tanah sehingga dampak negatif garam dapat dikurangi. Pada tanah kering,

bahan organik membantu menjaga kelembapan dan meningkatkan ketersediaan hara bagi tanaman.

BAB 19

JASA EKOSISTEM DALAM PERTANIAN BERKELANJUTAN

Sistem pertanian tidak sekadar berfungsi sebagai ruang produksi komoditas pangan, melainkan juga sebagai agroekosistem yang kompleks, dinamis dan saling berinteraksi. Keberlangsungan sistem ini sangat bergantung pada jasa ekosistem, yaitu manfaat gratis yang disediakan oleh alam melalui interaksi dinamis antara komponen tanah, tanaman, dan iklim. Pemahaman terhadap jasa-jasa ini, mulai dari pembentukan unsur hara, pengaturan air, hingga mitigasi iklim, menjadi kunci untuk menjaga produktivitas tanpa merusak lingkungan.

19.1 Konsep Jasa Ekosistem dan Kerangka Penilaiannya

Sistem pertanian pada hakikatnya bukan sekadar hamparan lahan untuk memproduksi komoditas pangan, serat, atau bahan baku industri. Lebih dari itu, pertanian adalah sebuah agroekosistem, yaitu ekosistem yang dimodifikasi dan dikelola manusia di mana komponen biotik dan abiotik saling berinteraksi secara intensif (Gliessman, 2014). Keberlanjutan dan produktivitasnya sangat bergantung pada Jasa Ekosistem (*Ecosystem Services*), yaitu manfaat dan keuntungan, baik langsung maupun tidak langsung, yang diperoleh manusia dari fungsi-fungsi alami ekosistem tersebut (Millennium Ecosystem Assessment - MEA, 2005).

Selama beberapa dekade terakhir, paradigma pertanian konvensional cenderung memandang lahan pertanian secara reduksionis, yaitu hanya sebagai media fisik yang membutuhkan input eksternal tinggi, seperti pupuk kimia sintetik dan pestisida, untuk meningkatkan hasil panen. Pendekatan yang eksploitatif ini terbukti memicu degradasi lingkungan yang masif, mulai dari penurunan kesuburan tanah, pencemaran sumber air, hilangnya keanekaragaman hayati, hingga kontribusi signifikan terhadap emisi gas rumah kaca yang mempercepat perubahan iklim (Altieri, 1999; Power, 2010).

Kenyataan pahit ini mendorong pergeseran paradigma global menuju pertanian berkelanjutan berbasis agroekologi. Pendekatan agroekologi memandang pertanian sebagai satu kesatuan ekosistem yang harus dijaga keseimbangannya, di mana produktivitas di masa depan dijamin oleh kelestarian fungsi lingkungan saat ini (FAO, 2018).

19.1.1 Konsep Jasa Ekosistem

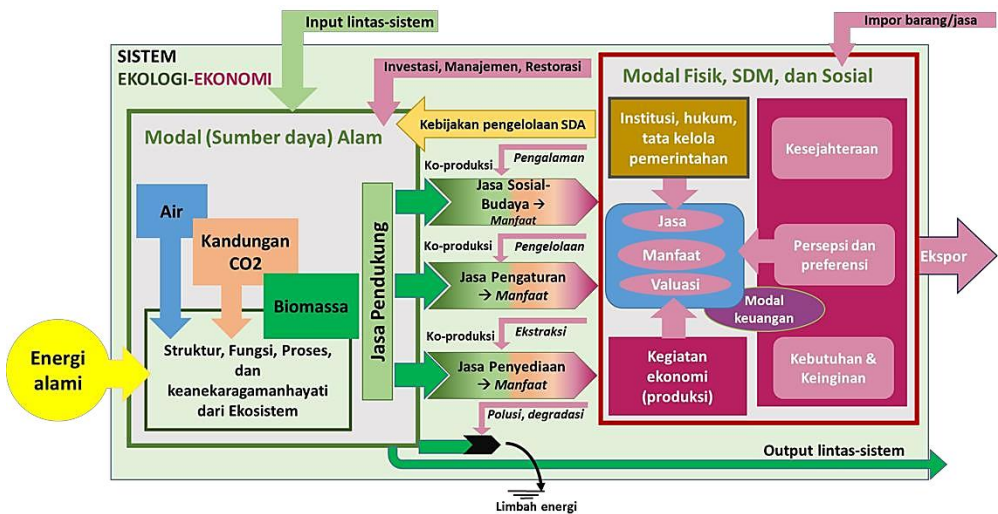
Berdasarkan rumusan *The Economics of Ecosystems and Biodiversity* (TEEB), jasa lingkungan atau jasa ekosistem didefinisikan sebagai sumbangsih ekosistem, baik secara langsung maupun tidak langsung, bagi kesejahteraan manusia. Meskipun konsep ini selaras dengan definisi yang dikeluarkan oleh MEA (2005), TEEB memberikan batasan yang lebih tegas antara aspek layanan dan manfaat. Selain itu, TEEB secara eksplisit menggarisbawahi bahwa layanan ekosistem dapat berkontribusi pada kehidupan manusia melalui beragam mekanisme tidak langsung (Fisher dan Christie, 2009). Sementara itu, dalam kerangka hukum nasional, Peraturan Pemerintah Nomor 46 Tahun 2017 tentang Instrumen Ekonomi Lingkungan Hidup mendefinisikan jasa lingkungan hidup sebagai manfaat dari ekosistem dan lingkungan hidup bagi manusia serta keberlangsungan kehidupan, yang mencakup penyediaan sumber daya alam, pengaturan alam dan lingkungan hidup, penyokong proses alam, serta pelestarian nilai budaya. Meskipun terdapat perbedaan terminologi, keduanya memiliki substansi yang sama, yakni manfaat ekosistem bagi manusia dan keberlangsungan hidupnya.

Konsep Jasa Ekosistem merepresentasikan keterkaitan yang fundamental antara tanah, tanaman, dan iklim. Jasa Ekosistem tidak muncul secara terpisah, melainkan merupakan hasil interaksi dinamis antara ketiga komponen tersebut. Tanah berfungsi sebagai medium pertumbuhan sekaligus penyedia unsur hara dan air; tanaman berperan dalam konversi energi matahari serta modifikasi kondisi biofisik; sedangkan iklim mengendalikan siklus hidrologi dan energi pada skala global. Sinergi yang terbangun melalui pengelolaan berkelanjutan menghasilkan beragam Jasa Ekosistem, termasuk pemeliharaan kesuburan tanah melalui siklus hara, regulasi aliran air tanah, serta pengendalian hama secara biologis (Bommarco, Kleijn, dan Potts, 2013; Hoshide dkk., 2023). Lebih lanjut, tanah yang sehat berkontribusi terhadap

mitigasi perubahan iklim melalui kapasitasnya untuk menyerap dan menyimpan karbon organik (Lal, 2004; Rodrigues, Brito, dan Nunes, 2023).

19.1.2 Kerangka Penilaian Jasa Ekosistem

Untuk mengintegrasikan konsep Jasa Ekosistem ke dalam kebijakan pertanian berkelanjutan, diperlukan pendekatan sistematis yang mampu menghubungkan dinamika alam dengan aktivitas manusia. Hubungan timbal balik ini digambarkan secara komprehensif dalam kerangka penilaian Sistem Ekologi-Ekonomi sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 19.1. Kerangka ini membagi interaksi besar tersebut menjadi dua kompartemen utama yang saling memengaruhi: Sistem Ekologi sebagai penyedia modal alam di sisi kiri dan Sistem Ekonomi-Sosial di sisi kanan.



Gambar 19.1: Alur Penyediaan Jasa Ekosistem pada Sistem Ekologi-Ekonomi

(Amaruzaman, Leimona dan Tanika, 2018)

Hubungan keduanya (antara Sistem Ekologi dan Sistem Ekonomi) yang saling bergantung menghasilkan kesejahteraan bagi manusia. Sistem Ekologi (sisi kiri), fokus utamanya terletak pada Modal (Sumber Daya) Alam. Pada bagian ini, interaksi utama antara tanah, tanaman, dan iklim terjadi secara alami. Input energi alami bertindak sebagai penggerak utama sistem yang kemudian berinteraksi dengan komponen biosfer seperti air, CO₂, dan biomassa

tanaman. Interaksi tersebut membentuk struktur, fungsi, dan proses serta menjaga keanekaragaman hayati pada ekosistem pertanian. Melalui Jasa Pendukung (Supporting Services), modal alam ini mengalirkan tiga kelompok jasa utama ke kehidupan manusia melalui proses ko-produksi (pengalaman, pengelolaan, dan ekstraksi), yaitu: Jasa Sosial Budaya (Cultural Services), Jasa Pengaturan (Regulating Services), dan Jasa Penyediaan (Provisioning Services). Ketika aliran jasa tersebut menyeberang ke sisi kanan kerangka kerja, Jasa Ekosistem bertransformasi menjadi manfaat nyata bagi Modal Fisik, SDM, dan Modal Sosial. Jasa Penyediaan (seperti hasil panen) memicu proses ekonomi produksi, sementara Jasa Pengaturan dan Jasa Sosial Budaya memenuhi kebutuhan, keinginan, serta persepsi kepuasan manusia yang bermuara pada peningkatan kesejahteraan. Di dalam kotak interaksi, terdapat siklus krusial, yaitu Jasa -> Manfaat -> Valuasi. Di tahap ini, manfaat abstrak dari alam (seperti kemampuan tanah menyerap air atau karbon) dihitung nilainya, baik secara kuantitatif biofisik maupun secara moneter (nilai uang).

Keterkaitan antara Penilaian Ekosistem dan Pembayaran Jasa Ekosistem (PJE) atau *Payment for Ecosystem Services* (PES) terlihat jelas pada jalur umpan balik (*feedback loop*) di bagian atas bagan. Setelah manusia melakukan valuasi dan menyadari pentingnya manfaat modal alam bagi roda ekonomi, Sistem Sosial-Ekonomi harus menghasilkan *output* berupa kebijakan pengelolaan SDA, yaitu langkah regulasi formal untuk melindungi ekosistem hulu atau lahan pertanian. Investasi, manajemen, dan restorasi merupakan perwujudan langsung dari skema PJE/PES. Manusia (pelaku ekonomi) di sisi kanan memberikan aliran modal keuangan yang mengalir kembali ke sisi kiri (Sistem Ekologi). Insentif ini digunakan untuk mendanai praktik manajemen lahan yang baik dan restorasi lingkungan oleh para petani. Tanpa adanya investasi dan kebijakan timbal balik ini, Sistem Ekologi akan mengalami eksploitasi berlebih yang digambarkan di bagian bawah bagan sebagai polusi, degradasi serta limbah energi. Degradasi tersebut lambat laun akan merusak struktur dan fungsi modal alam itu sendiri, yang pada akhirnya akan menghentikan aliran Jasa Ekosistem dan meruntuhkan kesejahteraan ekonomi manusia di masa depan.

19.2 Jasa Penyediaan: Pangan, Air, dan Serat

Jasa Penyediaan (*Provisioning Services*) merupakan manifestasi fisik yang paling nyata dan memiliki nilai ekonomi langsung dari sebuah agroekosistem. Jasa tersebut tidak dipandang sebagai hasil eksploitasi sepihak, melainkan sebagai produk akhir dari interaksi yang sehat antara tanah, tanaman, dan iklim. Di antara berbagai jenis jasa penyediaan, komponen pangan, air, dan serat merupakan pilar utama yang menopang peradaban manusia (MEA, 2005).

19.2.1 Pangan

Pangan adalah Jasa Penyediaan utama yang menjadi orientasi bagi sebagian besar lanskap pertanian di dunia. Produk pangan mencakup tanaman pangan pokok (seperti padi, jagung, gandum), hortikultura (sayur dan buah), serta produk peternakan dan perikanan (Malem, Muta'ali, dan Mei, 2020). Pembentukan pangan sangat bergantung pada kemampuan tanaman untuk melakukan fotosintesis dengan memanfaatkan radiasi matahari dan CO₂ (faktor iklim), yang didukung oleh ketersediaan unsur hara serta air dalam hamparan tanah (faktor tanah) (Wiryo, 2013). Dalam konteks berkelanjutan, kuantitas produksi pangan tidak dicapai dengan memacu input kimia secara masif, melainkan dengan menjaga kualitas biologi tanah (misalnya pengayaan mikroba penambat nitrogen) serta varietas tanaman yang adaptif terhadap fluktuasi iklim lokal (Gliessman, 2014). Target utamanya adalah stabilitas hasil jangka panjang (*sustainable yield*).

19.2.2 Air

Meskipun air sering kali dikategorikan sebagai Jasa Pengaturan (regulasi siklus hidrologi), dalam konteks Jasa Penyediaan, air berfungsi sebagai penyedia pasokan air bersih untuk konsumsi domestik maupun irigasi. Tanaman penutup tanah (*cover crops*) dan sistem perakaran pohon dalam agroforestri berfungsi menahan laju air hujan (faktor iklim) agar tidak langsung menjadi aliran permukaan (*surface runoff*). Air ditahan dan diresapkan ke dalam pori-pori tanah (infiltrasi). Tanah bertindak sebagai filter alami yang menyaring sedimen dan polutan (Wiryo, 2013). Dalam konteks berkelanjutan, agroekosistem yang dikelola dengan baik bertindak sebagai spons raksasa yang menyimpan cadangan air tanah (*aquifer*). Jasa penyediaan

air ini menjamin bahwa kawasan hilir tetap mendapatkan pasokan air bersih yang konstan, sekaligus meminimalkan risiko kekeringan pada musim kemarau.

19.2.3 Serat

Serat adalah material non-pangan yang dihasilkan oleh tanaman untuk memenuhi kebutuhan sandang, papan, dan bahan baku industri. Contoh produk serat meliputi kapas, rami, kapuk, kenaf, serta kayu dan bambu yang dihasilkan dari sistem pertanian terpadu atau agroforestri (Muta'ali, 2019). Pertumbuhan serat tanaman sangat sensitif terhadap cekaman iklim (seperti suhu ekstrem atau kekeringan). Tanah yang mengandung bahan organik tinggi mampu menjaga kelembapan yang dibutuhkan tanaman serat untuk membentuk dinding sel tumbuhan yang sehat dan kuat. Dalam konteks berkelanjutan, diversifikasi lahan pertanian dengan menyisipkan tanaman penghasil serat (misalnya menanam tanaman pembatas rami atau agroforestri berbasis kayu) memberikan keuntungan ganda. Selain menghasilkan pendapatan alternatif bagi petani, limbah biomassa tanaman serat yang tidak dipanen dapat dikembalikan ke lahan sebagai mulsa untuk memperbaiki struktur fisika-kimia tanah dan melindungi permukaan tanah dari erosi akibat curah hujan ekstrem (Wiryono, 2013).

Dalam sistem agroekologi, pangan, air, dan serat membentuk satu kesatuan yang saling bergantung. Produksi pangan yang berkelanjutan tidak hanya bergantung pada hasil panen, tetapi juga pada kualitas air dan keberagaman tanaman di lahan. Ketika petani memaksakan monokultur dengan pemakaian pupuk kimia berlebih, residu kimia mencemari air dan mengganggu keseimbangan ekosistem. Air yang tercemar mengurangi daya dukung lingkungan bagi tanaman lain, termasuk tanaman serat yang berfungsi menjaga struktur tanah dan keanekaragaman hayati. Tanpa diversifikasi tanaman, agroekosistem kehilangan kemampuan alami untuk memulihkan diri, menyeimbangkan siklus air, dan menjaga ketersediaan unsur hara (Gliessman, 2014). Oleh karena itu, agroekologi menekankan harmoni antara ketiga pilar tersebut. Diversifikasi tanaman bukan hanya strategi ekonomi, tetapi juga untuk menjaga keberlanjutan agroekosistem: pangan tetap tersedia, air tetap bersih, dan serat tetap lestari. Keseimbangan inilah yang menjadi fondasi bagi pertanian yang tangguh dan berkelanjutan (Power, 2010).

19.3 Jasa Pengaturan: Pengendalian Hama, Iklim, dan Erosi

Jika Jasa Penyediaan mewakili produk fisik yang dipanen, maka Jasa Pengaturan merupakan mekanisme pengendali alami yang menjaga stabilitas dan resiliensi agroekosistem. Jasa ini bertindak sebagai benteng pertahanan agroekosistem terhadap berbagai guncangan lingkungan. Keberhasilan pertanian berkelanjutan sangat tergantung pada pemanfaatan jasa pengaturan alam secara maksimal, yang berperan penting dalam mengurangi penggunaan *input* eksternal buatan (seperti pupuk dan pestisida kimia). Di antara berbagai ragamnya, jasa pengendalian hama, pengaturan iklim, dan pencegahan erosi merupakan tiga pilar stabilitas yang digerakkan langsung oleh interaksi antara tanah, tanaman, dan iklim (MEA, 2005).

19.3.1 Pengendalian Hama secara Hayati

Dalam agroekosistem konvensional, ledakan populasi hama umumnya diredam secara artifisial melalui penggunaan pestisida kimia. Sebaliknya, pertanian berbasis agroekologi memanfaatkan Jasa Pengaturan berupa pengendalian hayati yang bersumber dari keanekaragaman hayati alami dalam ekosistem. Struktur lanskap pertanian yang heterogen, seperti penanaman polikultur, penanaman tanaman reflektor, atau integrasi pohon, menyediakan habitat, sumber pakan (nektar), dan ruang bersarang bagi musuh alami hama (predator seperti laba-laba, burung, dan kumbang kubah, serta tawon parasitoid). Kehadiran tanaman yang beragam ini menyeimbangkan rantai makanan, sehingga populasi hama dapat ditekan secara mandiri di bawah ambang batas ekonomi tanpa merusak kualitas tanaman (Altieri, 1999; Wiryono, 2013). Dalam konteks berkelanjutan, pemanfaatan jasa pengendalian alami ini secara drastis menurunkan biaya produksi sekaligus melindungi organisme nontarget di dalam tanah, seperti cacing tanah dan mikroba fungsional yang peka terhadap residu kimia

19.3.2 Pengaturan Iklim Mikro dan Makro

Pertanian tidak hanya menjadi sektor yang rentan terhadap perubahan iklim, tetapi juga memiliki kapasitas besar sebagai penyedia jasa regulasi iklim, baik pada skala mikro (lahan) maupun skala makro (global). Pada skala mikro (fokus tanaman-iklim), kanopi tanaman, terutama dalam sistem agroforestri atau tumpang sari yang rimbun, berfungsi memodifikasi iklim mikro (*local*

climate) di permukaan lahan (Kosmus, Renner, dan Ullrich, 2019). Kanopi ini memayungi permukaan tanah, menahan laju penguapan (evapotranspirasi), serta menurunkan suhu ekstrem di sekitar zona perakaran tanaman. Sedangkan pada skala makro (fokus tanah-iklim), tanah yang dikelola secara berkelanjutan melalui penambahan bahan organik, penggunaan tanaman penutup tanah (*cover crops*), dan pembatasan olah tanah (*no-till*) bertindak sebagai penyerap karbon global (*carbon sink*) (Muta'ali, 2019). Tanaman menangkap CO₂ dari atmosfer melalui fotosintesis dan mentransfernya ke dalam tanah dalam bentuk karbon organik tanah (SOC) (Lal, 2004). Jasa penyerapan karbon ini sangat krusial dalam memitigasi dampak gas rumah kaca (GRK) yang memicu pemanasan global.

19.3.3 Pencegahan Erosi Tanah

Degradasi lahan akibat terkikisnya lapisan atas tanah (*topsoil*) yang subur oleh air hujan merupakan ancaman terbesar bagi ketahanan pangan. Ekosistem pertanian yang sehat menyediakan jasa pengaturan mekanis untuk mencegah hilangnya tanah subur yang sangat berharga. Ketika hujan lebat turun, tajuk tanaman dan serasah di atas lahan bertindak sebagai peredam terhadap hantaman energi kinetik butiran air hujan agar tidak langsung menghancurkan agregat tanah (Muta'ali, 2019). Selanjutnya, perakaran tanaman mencengkeram butiran tanah di bawah permukaan tanah dengan kokoh. Di saat yang sama, tanah yang kaya akan bahan organik memiliki porositas yang dapat meningkatkan laju infiltrasi air dan meminimalkan volume aliran permukaan (*surface runoff*) yang berpotensi menghanyutkan tanah (Wiryono, 2013). Dalam konteks berkelanjutan, jasa regulasi erosi ini memastikan lapisan tanah yang kaya akan hara tetap bertahan di tempatnya, sehingga kesuburan bawaan (*inherent fertility*) lahan pertanian dapat terjaga lintas generasi tanpa perlu terus-menerus menambah pupuk kimia secara berlebihan (Bommarco, Kleijn, dan Potts, 2013; Hoshide dkk., 2023).

Dalam konteks agroekosistem, jasa pengaturan seperti pengendalian hama, regulasi iklim, dan perlindungan dari erosi tanah menunjukkan keterkaitan yang erat. Tanah yang terlindungi dari erosi mampu mempertahankan kandungan karbon yang tinggi, sehingga berkontribusi pada fungsi regulasi iklim. Kondisi iklim yang stabil selanjutnya menciptakan lingkungan yang mendukung pertumbuhan vegetasi, sekaligus menyediakan habitat bagi

musuh alami dalam mekanisme pengendalian hama. Interaksi ini membentuk suatu jaringan fungsional yang saling menopang, di mana setiap jasa ekosistem memperkuat keberlangsungan jasa ekosistem lainnya.

19.4 Jasa Budaya dan Spiritual dalam Agroekosistem Tradisional

Berbeda dengan tiga Jasa Ekosistem sebelumnya yang berfokus pada dimensi biofisik dan materi, Jasa Budaya dan Spiritual memberikan manfaat nonmaterial yang memperkaya jiwa, identitas, dan kualitas hidup manusia (MEA, 2005). Dalam lanskap pertanian tradisional, seperti sistem Subak di Bali, simfoni pekarangan di Jawa, atau perladangan berpindah masyarakat adat di berbagai belahan Nusantara, agroekosistem bukan sekadar tempat mencari nafkah, melainkan ruang suci di mana kebudayaan, spiritualitas, dan alam melebur menjadi satu kesatuan yang tidak terpisahkan (Ardana dkk., 2024; Goretti, Eviliyanto, dan Bayuardi, 2023; Mulyanto, 2011).

19.4.1 Nilai Spiritual dan Keagamaan

Bagi masyarakat agraris tradisional, tanah, tanaman, dan iklim dipandang sebagai titipan atau manifestasi kekuatan spiritual. Aktivitas bertani selalu diiringi oleh ritual yang menghormati siklus alam. Upacara adat penanaman padi (seperti penghormatan kepada Dewi Sri atau upacara Seren Taun di Jawa Barat) merupakan bentuk komunikasi spiritual manusia dengan alam (Bayupratama, 2023; Padilah, 2023). Petani membaca tanda-tanda iklim (*pranata mangsa*) bukan hanya sebagai sains praktis, melainkan sebagai bentuk kepatuhan terhadap harmoni semesta. Dalam konteks berkelanjutan, dimensi spiritual ini secara tidak langsung berfungsi sebagai instrumen konservasi purba. Karena lahan dan varietas tanaman tertentu dianggap sakral, masyarakat adat akan menjaga kelestarian tanah dan air secara ketat untuk menghindari "kemurkaan alam". Keberadaan hutan larangan atau larangan mencemari mata air adalah contoh nyata bagaimana nilai spiritual menjaga fungsi ekologis tetap utuh.

9.4.2 Warisan Budaya dan Pengetahuan Lokal

Agroekosistem tradisional adalah laboratorium hidup tempat pengetahuan lokal (*indigenous knowledge*) diwariskan lintas generasi (Gliessman, 2014). Danau dan sungai (sumber air), sistem terasering, dan varietas padi lokal merupakan bagian dari warisan budaya yang masih hidup dalam masyarakat agraris tradisional. Penataan lanskap seperti terasering berundak bukan sekadar taktik mekanis untuk mencegah erosi tanah, melainkan sebuah karya seni lanskap budaya bernilai estetika tinggi yang mencerminkan gotong royong masyarakat. Pengetahuan tentang penanggalan tanam tradisional menyelaraskan fase pertumbuhan tanaman dengan fluktuasi iklim musiman secara presisi. Dalam konteks berkelanjutan di era modern, warisan budaya ini bermutasi menjadi modal ekonomi baru melalui sektor agrowisata dan ekowisata. Lanskap pertanian tradisional yang estetis dan menarik perhatian global, jika dikelola berbasis agroekologi, dapat memberikan pendapatan tambahan bagi petani tanpa harus mengonversi lahan pertanian mereka menjadi kawasan industri (Janiawati, 2014).

9.4.3 Rasa Memiliki dan Identitas Sosial

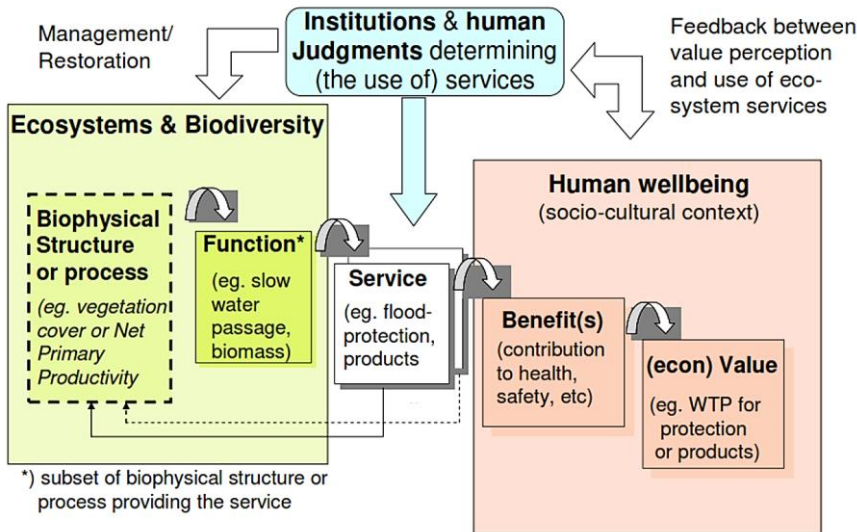
Pertanian tradisional memupuk hubungan sosial yang erat dan membangun identitas kolektif suatu masyarakat. Sistem irigasi bersama seperti Subak di Bali mengatur pembagian air berdasarkan asas keadilan dan filosofi *Tri Hita Karana* (keharmonisan antara manusia dengan Tuhan, manusia dengan sesama, dan manusia dengan alam). Proses pengerjaan lahan, pemeliharaan saluran irigasi, hingga panen dilakukan secara bersama-sama secara komunal (Ardana dkk., 2024; Janiawati, 2014). Dalam konteks berkelanjutan, ikatan sosial tersebut melahirkan ketahanan pangan yang tangguh di tingkat komunitas. Adanya lumbung padi desa (*community seed bank*) memastikan bahwa jika terjadi gagal panen akibat anomali iklim, tidak ada anggota masyarakat yang kelaparan. Rasa memiliki terhadap bentang alam ini membuat komunitas lokal menjadi garda terdepan yang paling gigih dalam mempertahankan lahan pertanian mereka dari ancaman alih fungsi lahan.

Jasa Budaya dalam pertanian berkelanjutan merupakan fondasi penggerak. Ketika petani kehilangan ikatan budaya dan spiritual dengan tanahnya (misalnya karena pertanian dipaksa menjadi industri murni), mereka

cenderung memperlakukan tanah secara eksploitatif. Memulihkan kearifan lokal dalam pertanian tradisional merupakan langkah awal untuk mengembalikan semua fungsi jasa ekosistem lainnya (Harini dkk., 2020).

Implementasi Jasa Budaya di tingkat lanskap juga menunjukkan bahwa keanekaragaman hayati tidak dapat dipisahkan dari identitas masyarakat agraris. Keanekaragaman hayati dalam agroekosistem tradisional terbukti berkaitan langsung dengan penyediaan obat-obatan tradisional serta pengembangan pariwisata berbasis alam (agrowisata) yang menjadi sumber pendapatan alternatif bagi masyarakat lokal (Christie dkk., 2008).

Lebih dari sekadar nilai ekonomi, masyarakat lintas budaya pada dasarnya melihat keanekaragaman hayati memiliki nilai intrinsik non-finansial yang berakar pada pertimbangan spiritual, etika, dan estetika. Oleh karena itu, penilaian jasa ekosistem budaya sebaiknya menggunakan pendekatan yang berpusat pada manusia (*human-centered approach*). Melalui pendekatan ini, dapat diukur dan disadari bahwa menjaga kelestarian tradisi, budaya, dan spiritualitas dalam bertani merupakan cara paling efektif untuk menjamin kesejahteraan manusia (*human well-being*) sekaligus mengamankan kondisi dasar yang diperlukan bagi keberlanjutan pasokan pangan dan air bersih di masa depan (Braat dan de Groot, 2012), sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 19.2.



Gambar 19.2: Jalur dari Struktur dan Proses Ekosistem Menuju Kesejahteraan Manusia (*Human Well-Being*)

(Braat dan de Groot, 2012)

19.5 Penilaian Ekonomi Jasa Ekosistem di Lahan Pertanian

Valuasi Ekonomi Jasa Ekosistem merupakan proses kuantifikasi manfaat, baik sebagian maupun keseluruhan, yang dihasilkan oleh sumber daya alam dan lingkungan dalam satuan moneter sesuai dengan tujuan serta konteks pemanfaatannya (Suparmoko, Subandar, dan Khan, 2007). Pendekatan ini menegaskan bahwa penilaian ekonomi tidak dapat dipisahkan dari pemahaman terhadap proses fisik dan biologis yang mendasari terbentuknya jasa ekosistem. Faktor-faktor biofisik tersebut secara langsung menentukan kuantitas maupun kualitas manfaat yang dihasilkan oleh alam (Freeman, Herriges, dan Kling, 2014). Lebih lanjut, sistem valuasi ekonomi ini dikembangkan berdasarkan konsep pertukaran nilai antara barang dan jasa ekosistem dengan preferensi masyarakat, yang tercermin melalui kesediaan mereka untuk membayar (*willingness to pay*) atas manfaat yang diterima (Costanza dkk., 1997).

Pendekatan tersebut memberikan pemahaman yang komprehensif mengenai cara nilai-nilai ekologis dikonversi ke dalam satuan ekonomi agar dapat dipertimbangkan dalam proses pengambilan keputusan. Secara garis besar,

pembahasan valuasi ekonomi dalam subbab ini berfokus pada dua aspek utama, yaitu:

1. Pengukuran Nilai Ekonomi Total (*Total Economic Value* — TEV) lahan pertanian yang mencakup nilai guna langsung (seperti hasil produksi pertanian) dan nilai guna tidak langsung (seperti fungsi pengendalian erosi, penyediaan air, dan penyerapan karbon).
2. Penjelasan mengenai mekanisme Pembayaran Jasa Ekosistem (PJE) sebagai instrumen kebijakan berbasis insentif untuk mendorong penerapan praktik pertanian berkelanjutan.

Melalui kerangka integratif ini, hubungan antara TEV dan PJE tidak hanya berfungsi sebagai alat penilaian ekonomi, tetapi juga sebagai pendekatan konseptual yang menyatukan aspek ekologi dan ekonomi dalam satu kesatuan tindakan sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 19.3.

9.5.1 Nilai Ekonomi Total

Nilai Ekonomi Total (*Total Economic Value* - TEV) menurut Nurfatriani (2006) dan Suparmoko dkk. (2007) merupakan akumulasi Nilai Guna (*Use Values*) dan Nilai Bukan Guna (*Non-Use Values*) suatu sumber daya. Secara matematis, formulasi TEV diturunkan sebagai berikut:

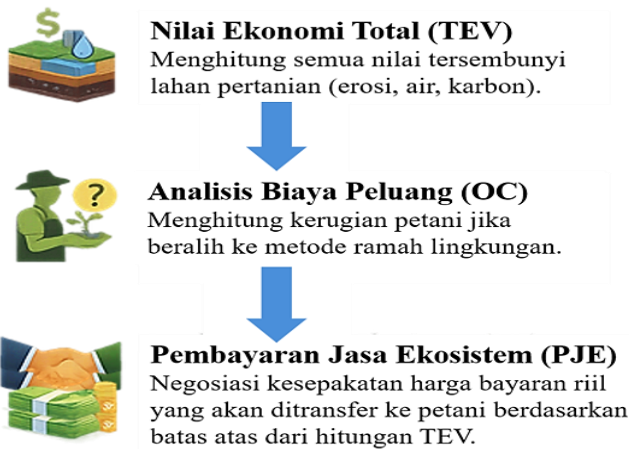
$$TEV = UV + NUV$$

$$TEV = (DUV + IUV + OV) + (BV + EV).$$

- DUV (*Direct Use Value*), yaitu nilai guna langsung yang mencakup hasil nyata dari ekosistem yang memiliki nilai pasar dan dapat dimanfaatkan secara langsung, seperti produksi pangan (padi, jagung), serat, kayu bakar, dan sumber daya genetik.
- IUV (*Indirect Use Value*), yaitu nilai guna tidak langsung yang mencakup jasa pengaturan (*regulating services*) lingkungan yang mendukung proses produksi, seperti penyerbukan (polinasi), pencegahan erosi, tata air, dan pengendalian hama secara alami.
- OV (*Option Value*), yaitu nilai atas potensi pemanfaatan jasa ekosistem di masa depan yang saat ini belum dieksplotasi, seperti menjaga

keanekaragaman mikroba tanah untuk keperluan medis atau pengembangan varietas unggul.

- BV (*Bequest Value*), yaitu nilai warisan yang dialokasikan untuk pelestarian lanskap pertanian agar manfaatnya dapat diwariskan dan dinikmati oleh generasi mendatang.
- EV (*Existence Value*), yaitu nilai keberadaan yang diberikan oleh masyarakat atas keberadaan suatu ekosistem karena alasan etika, spiritual, atau kelestarian budaya (misalnya eksistensi sistem Subak di Bali).



Gambar 19.3: Alur Hubungan TEV–PJE di Lahan Pertanian

(Agussaini, 2023)

Untuk memberikan gambaran aplikatif, berikut adalah simulasi perhitungan TEV pada 1 (satu) hektar lahan pertanian per tahun:

1. Menghitung DUV berdasarkan volume produk fisik pertanian yang dipanen dikalikan dengan harga pasar yang berlaku.
 - Hasil padi: 9 ton/tahun x Rp8.000.000/ton = Rp72.000.000
 - Hasil timun: 14 ton/tahun x Rp2.000.000/ton = Rp28.000.000
 - Total DUV = Rp100.000.000/tahun.
2. Menghitung IUV mencakup nilai ekonomi dari fungsi ekologis penunjang:
 - Pencegahan erosi (*erosion control*): Rp5.000.000.

- Penyerapan karbon (*carbon absorption*): Rp3.000.000.
 - Total IUV = Rp8.000.000/tahun.
3. Menghitung OV dari potensi keanekaragaman hayati masa depan (misalnya mikroba tanah untuk biopestisida) diestimasi menggunakan metode transfer manfaat (*Benefit Transfer Method* - BTM):
- Estimasi OV = Rp1.000.000/tahun.
4. Menghitung NUV yang mencakup aspek estetika dan warisan budaya diukur melalui pendekatan survei berbasis metodologi penilaian kontingensi (*Contingent Valuation Method* - CVM) kepada masyarakat luas:
- Nilai warisan (*bequest value*): Rp2.000.000
 - Nilai keberadaan (*existence value*): Rp1.500.000
 - Total non-use value (NUV) = Rp3.500.000/tahun.
4. Sintesis perhitungan TEV akhir melalui penggabungan seluruh komponen di atas, diperoleh total nilai ekonomi riil lahan pertanian:
- $$\text{TEV} = \text{Rp}100.000.000 + \text{Rp}8.000.000 + \text{Rp}1.000.000 + \text{Rp}3.500.000$$
- $$\text{TEV} = \text{Rp}112.500.000/\text{hektar}/\text{tahun}.$$

Pendekatan TEV membuktikan bahwa nilai riil 1 (satu) hektar lahan pertanian mencapai Rp112.500.000/tahun. Angka ini jauh lebih tinggi daripada penilaian ekonomi konvensional pasar yang hanya menghitung komoditas fisik (padi dan timun) sebesar Rp100.000.000/tahun. Selisih sebesar Rp12.500.000/tahun inilah yang merepresentasikan nilai jasa ekosistem tersembunyi yang disumbangkan oleh petani kepada bumi dan masyarakat, sekaligus menjadi dasar argumentasi dalam menentukan besaran subsidi pertanian hijau (*green agriculture*) yang sesuai.

9.5.2 Biaya Peluang

Pendekatan Biaya Peluang (*Opportunity Cost* - OC) merupakan acuan logis dalam merumuskan nilai PJE di sektor pertanian dengan menetapkan rentang harga transaksi yang ideal. Batas bawah insentif ditentukan oleh kompensasi minimum atas hilangnya pendapatan petani akibat bermigrasi dari metode konvensional ke

metode yang lebih ramah lingkungan. Sebaliknya, batas atas ditentukan oleh nilai manfaat ekonomi maksimum yang dapat dihemat atau diterima oleh pembeli jasa ekosistem, seperti pemerintah daerah atau sektor industri (Amaruzaman, Leimona, dan Tanika, 2018; Porras dkk., 2013). Kesepakatan nilai kompensasi PJE harus berada dalam rentang tersebut agar kedua belah pihak mendapatkan keuntungan serta mencegah pembeli jasa mencari alternatif teknologi mandiri yang padat modal. Melalui skema ini, dapat diciptakan insentif yang berkelanjutan bagi petani tanpa mengorbankan efisiensi ekonomi pengguna jasa.

Pada umumnya (contoh kasus kontekstual), praktik pertanian konvensional yang mengandalkan pupuk kimia sintetis secara berlebihan serta pembukaan lahan tanpa konservasi berpotensi memicu erosi yang besar. Dampak buruk ini dirasakan langsung oleh Perusahaan Daerah Air Minum (PDAM) di wilayah hilir yang harus mengalokasikan biaya operasional yang besar untuk sedimentasi dan purifikasi zat kimia. Untuk menanggulangnya, PDAM berkepentingan agar petani di hulu beralih ke pertanian organik berkelanjutan (seperti pembuatan terasering dan penggunaan input organik).

Berikut adalah formulasi kalkulasi OC untuk 1 (satu) hektar lahan pertanian per tahun berdasarkan contoh kasus di atas:

1. Menghitung batas bawah (biaya peluang petani), dengan menghitung penurunan pendapatan bersih petani akibat beralih ke metode pertanian organik:
 - Keuntungan metode konvensional (lama): Rp100.000.000/tahun.
 - Keuntungan metode organik (baru): Rp85.000.000/tahun (penurunan akibat fase transisi kesuburan tanah maupun tenaga kerja untuk terasering).
 - OC petani: $\text{Rp}100.000.000 - \text{Rp}85.000.000 = \text{Rp}15.000.000/\text{tahun}$.
2. Implikasi batas bawah mewajibkan PDAM memberikan dana kompensasi minimal sebesar Rp15.000.000/tahun. Jika insentif berada di bawah nominal, petani secara rasional akan menolak skema kerja sama dan kembali ke metode konvensional untuk menjaga stabilitas ekonominya.

3. Menghitung batas atas (manfaat bagi PDAM), dengan menghitung potensi penghematan biaya operasional pengolahan air bersih jika hulu sungai terbebas dari sedimentasi dan pencemaran:
 - o Biaya penjernihan air saat kondisi sungai tercemar: Rp50.000.000/tahun.
 - o Biaya penjernihan air saat kondisi sungai bersih (estimasi): Rp20.000.000/tahun.
 - o Potensi penghematan maksimum PDAM: $\text{Rp50.000.000} - \text{Rp20.000.000} = \text{Rp30.000.000/tahun}$.

9.5.3 Pembayaran Jasa Ekosistem (PJE)

Berdasarkan penilaian OC yang telah dihitung pada subbab sebelumnya, diperoleh rentang harga negosiasi PJE yang logis, yaitu Rp15.000.000 (batas bawah) < Nilai PJE < Rp30.000.000 (batas atas). Melalui proses negosiasi multipihak, disepakati kebijakan untuk menetapkan nilai tengah yang adil bagi kedua belah pihak, yaitu sebesar Rp22.500.000/tahun. Nilai kesepakatan ini memberikan dampak yang saling menguntungkan (*win-win solution*) bagi kedua belah pihak:

1. Bagi petani (sisi hulu), metode pertanian berkelanjutan ini sangat menguntungkan. Pendapatan total mereka melonjak menjadi Rp107.500.000/hektar/tahun (akumulasi dari hasil panen organik sebesar Rp85.000.000/hektar/tahun ditambah insentif transfer PJE sebesar Rp22.500.000/tahun). Nilai ini lebih tinggi dibandingkan dengan besarnya pendapatan konvensional mereka yang semula hanya Rp100.000.000/hektar/tahun.
2. Bagi PDAM (sisi hilir), penghematan biaya operasional berhasil dicapai. Dengan potensi penghematan pembersihan air sebesar Rp30.000.000/tahun, PDAM hanya perlu mentransfer dana kompensasi PJE ke hulu sebesar Rp22.500.000/tahun, sehingga tetap mengantongi surplus efisiensi bersih sebesar Rp7.500.000/tahun.

Pada sistem pertanian modern, skema internalisasi PJE tidak terbatas pada aspek tata air makro. Perhitungannya secara fleksibel dapat diintegrasikan dengan komponen jasa ekosistem esensial lainnya, seperti nilai karbon atau

nilai keindahan lanskap (NUV) yang telah diidentifikasi, sebagaimana pada contoh dalam pemodelan simulasi TEV sebelumnya sebesar Rp112.500.000 per tahun. Dengan demikian, keberlanjutan fungsi ekosistem pertanian dapat terus terjaga seiring dengan peningkatan kesejahteraan ekonomi para petani.

BAB 20

PENDEKATAN SISTEM DAN PEMODELAN DALAM AGROEKOLOGI

Agroekologi dipandang sebagai pendekatan sistemik dan holistik yang melihat agrosistem melalui lensa ekologis dan sosio ekonomi. Pendekatan ini menekankan fungsi yang didorong oleh keanekaragaman hayati dan ketahanan di bawah tekanan perubahan iklim (Elouattassi *et al.*, 2023; Shroff & Cortés, 2020). Dalam interaksi tanah-tanaman-iklim, pendekatan sistem memusatkan perhatian pada rizosfer sebagai antar muka kunci di mana pengelolaan, sifat tanaman, dan mikroorganisme secara bersama-sama mengatur siklus nutrisi dan kinerja tanaman (Cadre *et al.*, 2025; Cui, 2020). Bukti lapangan menunjukkan bahwa diversifikasi rotasi tanaman dan pengurangan pengolahan tanah dapat memperkuat aktivitas enzim rizosfer yang terkait dengan siklus C, N, dan P. Sedangkan pengolahan tanah konvensional dapat menekan manfaat diversifikasi—mengilustrasikan interaksi pengelolaan-oleh-proses yang kuat yang harus diwakili oleh model (Cadre *et al.*, 2025). Komponen berbasis sifat juga sensitif terhadap iklim dan tanah: eksudasi lendir jagung bervariasi dengan genotipe meningkat di bawah rezim iklim yang lebih hangat dan tanah tertentu. Hal ini menyiratkan bahwa sifat eksudasi akar memediasi respons kekeringan dan dukungan mikrobioma di berbagai zona agroekologi (Nazari *et al.*, 2020, 2022). Struktur dan fungsi mikrobioma juga berbeda di antara agroekologi dan habitat akar, memperkuat kebutuhan akan representasi spasial eksplisit dari keanekaragaman hayati di bawah tanah (Kaushal *et al.*, 2021; Shroff & Cortés, 2020). Oleh karena itu, pemodelan agroekologi semakin integratif, menggabungkan simulasi cuaca-tanah-pengelolaan untuk desain hasil dan efisiensi (misalnya, ISSM menggunakan model tanaman dan cuaca jangka panjang) dengan prediksi risiko yang menggabungkan sifat-sifat tanah bersamaan dengan pendorong iklim (misalnya, peramalan mikotoksin) (Cui, 2020; Muñoz *et al.*, 2025). Sementara pengelolaan nutrisi ekologis menekankan bahwa keanekaragaman

tanaman temporal dan spasial yang strategis merupakan prasyarat untuk mempertahankan layanan biogeokimia (Drinkwater & Snapp, 2022).

20.1 Sistem Berpikir dalam Agroekologi: Konsep dan Metodologi

Agroekologi berkembang sebagai paradigma yang melihat sistem pangan pertanian secara menyeluruh, dari petak hingga lanskap dan rantai pangan, dengan tujuan keberlanjutan ekologi, ekonomi, dan sosial. Pendekatan sistem berpikir menekankan interaksi, umpan balik, dan dinamika lintas skala; pemodelan tanaman dalam agroekologi berfungsi sebagai alat untuk merepresentasikan kompleksitas ini dan memetakan skenario inovatif pengelolaan.

1) Konsep Kunci Sistem Berpikir dalam Agroekologi

Agroekologi dipahami sebagai pendekatan holistik dan sistemik yang mengintegrasikan dimensi lingkungan, sosial, ekonomi, dan politik dalam sistem pangan, bukan sekadar teknik budidaya di petak tunggal (Dumont *et al.*, 2021; Gliessman, 2020; Terán-Samaniego *et al.*, 2025). Berbagai penulis menegaskan agroekologi sebagai ilmu, praktik, dan gerakan sosial yang berbasis konsep ekologi dan keanekaragaman fungsional untuk mengatur agroekosistem (Gliessman, 2020; Belmin *et al.*, 2022).

Pendekatan sistem juga menuntut keterlibatan berbagai aktor (peneliti, petani, lembaga) dan pengakuan peran pengetahuan lokal dalam ko-desain solusi (Belmin *et al.*, 2022; Gliessman, 2020). Dengan demikian, agroekologi beroperasi sebagai sistem sosio-ekologis multiskala, di mana interaksi biotik, abiotik, dan kelembagaan harus dipahami secara terintegrasi.

2) Sistem Berpikir dan Kerangka Analitis untuk Desain Agroekosistem

Literatur mutakhir menekankan bahwa desain inovasi agroekologis harus menyeberangi skala dari teknik budidaya ke sistem tanam, ke sistem usaha tani, hingga lanskap dan sistem pangan (Belmin *et al.*, 2022; Gascuel Odoux *et al.*, 2022). Sebuah kerangka baru memodelkan proses desain agroekologis sebagai proses non linier dan tak terduga di mana konsorsium

ilmiah, aktor lapangan, situasi masalah, dan “objek desain” saling berinteraksi dan berevolusi (Belmin et al., 2022).

Konsep ESSU (Ecosystem Services functional Spatial Unit) menawarkan unit spasial fungsional terkecil yang memuat semua komponen (tanaman, pohon, vegetasi spontan, habitat semi-alami) yang bersama-sama menyediakan satu set jasa ekosistem; unit ini kemudian diulang untuk merepresentasikan agroekosistem terdiversifikasi dan menjadi dasar desain, pemodelan, dan audit jasa ekosistem (Rafflegeau *et al.*, 2023). Pendekatan arketipe untuk pengendalian hama alami juga menggunakan generalisasi kontekstual untuk menghubungkan karakteristik organisme dengan respons terhadap gradien penggunaan lahan pada berbagai agroekosistem (Alexandridis *et al.*, 2022).

3) Metodologi Pemodelan Tanaman dalam Kerangka Agroekologi

Model tanaman dan agroekosistem dipandang sebagai alat inti penilaian sistem untuk menangkap kompleksitas agroekosistem dan merancang sistem yang lebih berkelanjutan (Lopez Ridaura, 2022; Hernández Ochoa et al., 2022). Beragam pendekatan, dari model proses berbasis mekanistik hingga model individu 3D dan jaringan "virtual farm field", digunakan untuk mensimulasikan interaksi tanaman gulma, diversifikasi tanaman, dan dinamika jasa ekosistem (Pointurier et al., 2021; Colbach et al., 2021; Gaudio et al., 2021).

Tinjauan atas model gandum menunjukkan bahwa banyak model proses masih berorientasi pada prediksi hasil dan sering mengabaikan stres biotik dan abiotik, khususnya *trade-off* (pertukaran peran) pertumbuhan–pertahanan; sebuah model konseptual baru diajukan untuk secara eksplisit memasukkan *trade-off* fisiologis dan jaringan sinyal hormonal guna memperkuat integrasi prinsip agroekologi (Dusfour-Castan *et al.*, 2026; Bondad *et al.*, 2023).

Pemodelan juga berkembang ke arah integrasi faktor sosial dan partisipasi petani. Suatu kerangka partisipatif untuk kontekstualisasi model tanaman mengusulkan tiga fase: menjangkau dunia petani (merumuskan pertanyaan agronomis dalam konteks mereka), bekerja dalam "dunia akademisi" (parametrisasi model dan penerjemahan output ke indikator yang diusulkan

petani), lalu kembali ke petani untuk memetakan opsi pengelolaan terkontekstualisasi (Cheriere et al., 2025). Pendekatan ini memungkinkan simulasi banyak skenario berbasis deskripsi petani mengenai lingkungan dan praktik mereka, sehingga menjembatani pengetahuan ilmiah generik dan pengetahuan kontekstual (Cheriere et al., 2025).

Selain itu, kerangka kerja agroekologi Eropa menyoroti tantangan pemodelan yang meliputi pendekatan terhadap kompleksitas, dimensi ruang waktu, serta representasi rangkaian praktik budidaya hingga jasa ekosistem (Gascuel Odoux et al., 2022). Model sistem tanaman terintegrasi yang mencakup dinamika hama, penyakit, dan intervensi pengelolaan seperti rotasi, tumpangsari, waktu tanam, pemupukan dipandang krusial untuk meningkatkan pengambilan keputusan di tingkat usahatani dalam kondisi perubahan iklim (Bondad et al., 2023; Hernández Ochoa et al., 2022).

Sebagai ringkasan, sistem berpikir dalam agroekologi menuntut kerangka konseptual yang mampu mengaitkan proses biofisik, dinamika sosial, dan tata kelola lintas skala. Pemodelan tanaman berkembang dari sekadar alat prediksi hasil menjadi sarana eksploratif untuk desain agroekosistem terdiversifikasi, integrasi jasa ekosistem, dan ko-inovasi dengan petani. Tantangan ke depan adalah terus mengintegrasikan stres biotik–abiotik, interaksi multispecies, serta dimensi sosial dan kebijakan dalam model, disamping menjaga keterkaitan erat dengan konteks lokal melalui pendekatan partisipatif dan unit fungsional seperti ESSU.

20.2 Model Simulasi Pertumbuhan Tanaman (Crop Modeling)

Model simulasi pertumbuhan tanaman merepresentasikan proses biologis tanaman dengan persamaan matematis untuk meniru dinamika daun, batang, akar, dan hasil panen dalam berbagai kondisi cuaca, tanah, dan pengelolaan (Sangale *et al.*, 2022).

1) Konsep dan Jenis Model Pertumbuhan Tanaman

Model proses-basis (process-based crop models) mensimulasikan perkembangan fenologi, fotosintesis, penyerapan air dan hara, serta alokasi biomassa untuk memprediksi pertumbuhan dan hasil (Sangale *et al.*, 2022).

Model seperti DSSAT, APSIM, CERES-Maize, dan CropSyst telah luas digunakan untuk mengevaluasi produktivitas, skenario irigasi, dan pemupukan (Hajirad *et al.*, 2025). Pendekatan lain menggunakan fungsi pertumbuhan non-linear (Logistic, Gompertz, Sigmoid) terhadap akumulasi suhu (growing degree days) untuk memodelkan dinamika biomassa dan produktivitas air, misalnya pada jagung silase di wilayah kering (Hajirad *et al.*, 2025).

2) Aplikasi Model: dari Lahan ke Genetik

Model pertumbuhan tanaman dapat mensimulasikan banyak musim, lokasi, dan perlakuan dalam waktu singkat, sehingga sangat berguna untuk agronomi, pengelolaan hama/penyakit, pemuliaan, dan penilaian dampak perubahan iklim (Sangale *et al.*, 2022). Dalam pemuliaan, pemodelan *in silico* digunakan untuk mengevaluasi sifat hipotetik (fenologi, arsitektur, proses fisiologis) dan interaksi genotipe $\times$ lingkungan $\times$ manajemen, sehingga hasil, biomassa, dan indeks panen muncul sebagai hasil gabungan banyak proses, bukan sifat tunggal (Boote *et al.*, 2021). Model juga mendukung “speed breeding” dengan menjalankan eksperimen virtual untuk mencari kombinasi lingkungan yang mempercepat pertumbuhan dan perkembangan tanaman (Yu *et al.*, 2023).

3) Integrasi Teknologi Baru dan Tantangan

Perkembangan terbaru mencakup model modular (misalnya BioCro II) yang merepresentasikan proses sebagai kumpulan persamaan terpisah sehingga mudah dikombinasi dan diskalakan (Lochocki *et al.*, 2022). Integrasi machine learning dengan model proses-basis (knowledge- and data-driven modelling) meningkatkan ketelitian prediksi sekaligus mempertahankan interpretabilitas fisiologis (Droutsas *et al.*, 2022). Di sisi lain, evaluasi multi-model pada kedelai menunjukkan masih adanya kelemahan dalam mensimulasikan dinamika pertumbuhan daun, fenologi reproduktif, dan partisi ke organ generatif, menandai area penting untuk pengembangan model lebih lanjut (Kothari *et al.*, 2024).

Sebagai kesimpulan, model simulasi pertumbuhan tanaman adalah representasi matematis proses fisiologis yang memungkinkan prediksi kuantitatif pertumbuhan dan hasil di bawah berbagai kombinasi genotipe,

lingkungan, dan manajemen. Model proses-basis, fungsi pertumbuhan empiris, dan pendekatan hibrida dengan machine learning semuanya memperluas kemampuan crop modelling, dari skala organ hingga lahan dan iklim masa depan. Meskipun demikian, peningkatan representasi proses kunci (daun, reproduksi, akar) dan keterkaitan dengan data lapang beresolusi tinggi tetap menjadi agenda utama untuk menjadikan crop modelling fondasi kuat dalam pertanian presisi, pemuliaan, dan adaptasi terhadap perubahan iklim.

20.3 Pemodelan Siklus Hara dan Karbon dalam Agroekosistem

Pemodelan siklus hara dan karbon (C) dalam agroekosistem menjadi kunci untuk mempertahankan produktivitas lahan sekaligus meningkatkan penyerapan C dan mengurangi kehilangan hara. Berbagai pendekatan model terkini semakin menekankan peran eksplisit mikroba, interaksi tanaman–mikroorganisme, dan keterkaitan siklus C–N–P dalam merespons perubahan iklim dan praktik pengelolaan.

Model biogeokimia modern berupaya merepresentasikan siklus C, nitrogen (N), dan fosfor (P) yang saling terhubung di lahan alami maupun pertanian, termasuk transisi penggunaan lahan dan manajemen pupuk, selama skala waktu puluhan hingga ratusan tahun (Janes-Bassett *et al.*, 2020). Pendekatan ini memungkinkan replikasi stok hara tanah dan respon hasil panen terhadap penambahan hara di berbagai percobaan jangka panjang, sehingga relevan untuk evaluasi keamanan pangan dan simpanan C (Janes-Bassett *et al.*, 2020). Sejalan dengan itu, model MOMOS mengaitkan fotosintesis sebagai sumber C organik tanah, pertukaran N mikroba-tanaman, fiksasi N, dan pertumbuhan tanaman dengan inti dekomposisi berbasis komunitas mikroba (Ibrahim *et al.*, 2021). Dalam simulasi pada sistem gandum durum–kacang faba di tanah kapur tanpa pupuk, model ini menunjukkan bahwa C yang tersimpan awalnya terakumulasi dalam metabolit mikroba yang labil selama sekitar satu tahun, kemudian secara signifikan ditransfer ke fraksi humus stabil selama enam tahun tumpangsari (Ibrahim *et al.*, 2021). Hasil ini menegaskan bahwa mikroorganisme adalah penghubung utama antara input C tanaman dan penyimpanan C jangka panjang.

Model mikroba-eksplisit lainnya, seperti MIMICS-CN, menggabungkan siklus C dan N melalui pool serasah, mikroba, dan bahan organik tanah, serta divalidasi terhadap data dekomposisi serasah lintas lokasi di Amerika Utara (Kyker-Snowman *et al.*, 2020). Model ini mensimulasikan kehilangan C dan N dari kantong serasah dengan akurasi yang sebanding dengan model tradisional yang tidak mengekspresikan mikroba secara eksplisit; namun, sekaligus memberikan estimasi stok C dan N tanah, biomassa mikroba, serta laju respirasi dan mineralisasi N yang sejalan dengan pengamatan di berbagai gradien iklim (Kyker-Snowman *et al.*, 2020). Jena Soil Model (JSM) melangkah lebih jauh dengan menjadi model C organik tanah yang mikroba-eksplisit, tersusun vertikal, dan terintegrasi dengan siklus N dan P, sehingga menangkap variasi profil tanah dan strategi alokasi enzim mikroba terhadap substrat yang berbeda (Yu *et al.*, 2020). Penerapan pada hutan beech menunjukkan kemampuan mereproduksi stok SOM dan biomassa mikroba serta pola vertikalnya, dan pemeriksaan sensitivitas menyoroti pentingnya stoikiometri dan proses mikroba dalam menentukan respon C dan hara terhadap perubahan lingkungan (Yu *et al.*, 2020). Dalam konteks agroekosistem bioenergi, model interaksi tanaman–mikroba seperti FUN-BioCROP mensimulasikan pengambilan hara tanaman yang terkopel dengan dekomposisi bahan organik tanah untuk memproyeksikan dinamika C dan N antara tanaman tahunan dan semusim (Juice *et al.*, 2025). Simulasi dasar menunjukkan bahwa kemampuan *Miscanthus* meretranslokasi N menghasilkan serapan N yang lebih tinggi dengan biaya C yang lebih rendah dibandingkan sistem sorgum/kedelai, serta meningkatkan pool C dan N tanah di bawah tanaman tahunan dan menurunkannya di bawah budidaya semusim (Juice *et al.*, 2025). Namun, ketidaksesuaian awal antara respons mikroba termodel dan observasi lapang terhadap eksudat akar memaksa penyesuaian parameter komunitas mikroba, menekankan pentingnya kalibrasi proses mikroba yang realistis (Juice *et al.*, 2025). Model lain menyoroti peran faktor fisik seperti kelembaban tanah, yang dimasukkan dalam model MEND C–N terkopel dengan fleksibilitas stoikiometri unsur (Wang *et al.*, 2020). Pemilihan fungsi respons kelembaban tanah untuk proses mikroba dan enzimatik menghasilkan perbedaan besar dalam simulasi; dan representasi dormansi serta resusitasi mikroba terbukti esensial karena perubahan fisiologi mikroba di bawah kondisi kering atau basah kuat mengendalikan dinamika C dan N

tanah (Wang *et al.*, 2020). Penggunaan data pendorong dinamis seperti input serasah, deposisi N, suhu, dan kelembaban tanah disarankan untuk mendekati kondisi iklim nyata dan meningkatkan realisme simulasi siklus C dan hara (Wang *et al.*, 2020). Secara keseluruhan, pemodelan siklus C dan hara dalam agroekosistem berevolusi dari skema dekomposisi orde pertama sederhana menuju kerangka kerja mikroba-eksplisit dan terkopel multi-unsur yang mengintegrasikan fisiologi mikroba, sifat mineral tanah, strategi akuisisi hara tanaman, dan faktor iklim. Pendekatan terpadu ini meningkatkan kemampuan memprediksi respon agroekosistem terhadap pengelolaan dan perubahan iklim, sekaligus menyediakan dasar kuantitatif bagi desain praktik budidaya yang mampu meningkatkan produktivitas, menyimpan lebih banyak C di tanah, dan mengurangi kehilangan hara ke lingkungan.

20.4 Penggunaan GIS dan Penginderaan Jauh dalam Pemetaan Agroekosistem

Pemetaan agroekosistem menuntut informasi ruang waktu tentang tanah, vegetasi, air, dan penggunaan lahan. Sistem informasi geografis (GIS) dan penginderaan jauh (remote sensing, RS) menyediakan data dan alat pemrosesan untuk menggambarkan struktur, fungsi, dan dinamika agroekosistem pada berbagai skala, dari petak sawah hingga lanskap nasional. Integrasi keduanya memungkinkan pengambilan keputusan spasial yang lebih objektif dan efisien dalam perencanaan pertanian berkelanjutan.

1) Peran GIS dalam Pemetaan Agroekosistem

GIS berfungsi sebagai kerangka integrasi berbagai lapisan informasi biofisik dan sosial-ekonomi. Dalam pengelolaan berkelanjutan lahan pertanian, lapisan wajib dalam bank data GIS meliputi peta lanskap, tanah, kemiringan, erosi, satuan lahan, dan profil geomorfologi pada skala rinci 1:10.000–1:25.000, yang kemudian digunakan untuk memodelkan skenario pengelolaan dan menilai keseimbangan ekologis–ekonomis penggunaan lahan (Tatarintsev *et al.*, 2023).

Pada skala regional dan peri urban, GIS yang dipadukan dengan Multi Criteria Decision Analysis (MCDA) dan fuzzy logic digunakan untuk pemetaan kesesuaian lahan berdasarkan atribut fisik, penggunaan lahan, sumber daya alam, aksesibilitas, geologi, dan sifat tanah; zona prioritas

pertanian dihasilkan melalui pembobotan hierarkis (AHP) dan perankingan TOPSIS (Ustaoglu et al., 2021).

GIS juga mendukung pertanian presisi dengan perhitungan jarak, interpolasi (IDW), dan kepadatan kernel untuk memetakan kondisi agro ekologis (tanah, iklim, air tanah) dan infrastruktur, sehingga membantu rekomendasi input dan pengaturan tata air (Reimov et al., 2023).

2) Peran Penginderaan Jauh: Sumber Data Utama Agroekosistem

Data satelit dan wahana udara menyediakan cakupan spasial luas dan berulang secara berkala untuk memantau vegetasi, tanah, dan air. RS dan GIS diakui sebagai alat modern untuk menilai agroekosistem pada berbagai skala; citra satelit memberi data spasial presisi secara cepat dan hemat biaya. Sementara GIS menyimpan dan menampilkan data georeferensi untuk zonasi sumberdaya (Abuzaid *et al.*, 2022).

Citra multispektral (misalnya Landsat, Sentinel-2) memungkinkan ekstraksi indeks vegetasi seperti NDVI dan EVI untuk memetakan dan memonitor pola tanam, fenologi, dan kondisi tanaman (Erdanaev *et al.*, 2022; Feyisa *et al.*, 2020). Indeks vegetasi ini secara luas digunakan untuk klasifikasi lahan pertanian, penilaian kesehatan tanaman dan prediksi hasil, meski banyaknya indeks dan kemiripan spektral antar tanaman menimbulkan tantangan pemilihan indeks yang optimal (Vidican *et al.*, 2023).

Di lahan kering dan oasis, deret waktu Landsat–NDVI/NDWI digunakan untuk memonitor perubahan tutupan lahan dan degradasi (misalnya peningkatan lahan terdegradasi dan penurunan area budidaya dalam tiga dekade) yang terkait dengan ketersediaan air bendungan dan eksploitasi airtanah (Karmaoui *et al.*, 2023). Pada skala nasional, kombinasi peta penutup lahan, data tanah dan iklim, serta citra resolusi tinggi (SPOT 6/7) digunakan untuk mengidentifikasi lahan terlantar lintas agroekosistem dan menilai kesesuaiannya bagi perluasan pertanian (Pez-Baeza *et al.*, 2022).

3) Integrasi GIS–RS dan Metode Canggih untuk Pemetaan Agroekosistem

Penggabungan GIS dan RS semakin diperkuat oleh teknik statistik dan kecerdasan buatan. Pendekatan multi indikator mengintegrasikan citra

satelit, survei lapang, dan pemeriksaan tanah ke dalam GIS, kemudian menggunakan PCA, fuzzy membership, dan AHP untuk membangun indeks kualitas lahan dan memetakan zona agroekosistem kering menurut potensi dan pembatasnya (Abuzaid *et al.*, 2022).

Untuk klasifikasi tanaman dan agro-ekologi, citra Sentinel dan berbagai indeks vegetasi dikombinasikan dalam model machine learning (Random Forest, SVM, K-nearest neighbours) yang diimplementasikan di lingkungan GIS; akurasi sangat tinggi (mencapai ~98% dan kappa ~0,97) menunjukkan potensi besar pendekatan ini untuk pengelompokan agro-ekologis otomatis (Pavlova, 2023).

Di wilayah dengan kepemilikan kecil dan lanskap kompleks, integrasi deret waktu MODIS-NDVI/EVI dengan algoritma pembelajaran mesin (RF, SVM, C5.0) dan prosedur pemetaan partisipatif iteratif meningkatkan akurasi pemetaan pola tanam hingga 95%, memperkaya legenda peta agroekosistem (Feyisa *et al.*, 2020). Pendekatan serupa yang menggabungkan pemodelan spasio-temporal berbasis aturan ahli dengan klasifikasi citra (RF, OBIA) membantu memperbaiki kesalahan klasifikasi di sistem small holder yang sangat heterogen, menghasilkan peta pola tanam yang lebih konsisten secara agronomis (Crespin-Boucaud *et al.*, 2020).

Di sisi teknologi mutakhir, tinjauan mendalam menunjukkan bahwa deep learning—terutama convolutional neural networks—telah menjadi pusat dalam pemetaan lahan, klasifikasi tanaman, pemantauan stres, dan prediksi hasil di berbagai skala (lahan, kanopi, daun), memanfaatkan volume besar citra multi-platform dan multi-sensor (Wang *et al.*, 2022).

4) Tantangan dan Implikasi bagi Pengelolaan Agroekosistem

Walaupun akurasi tinggi sering dicapai, pemetaan agroekosistem masih menghadapi tantangan: tutupan awan yang membatasi citra optik, variabilitas tinggi dalam sistem kecil, dan keterbatasan data lapangan. Penerapan di sistem pertanian kopi yang sangat beragam menunjukkan bahwa klasifikasi berbasis drone pada resolusi sangat halus hanya mencapai akurasi sedang (~54%), dan petani memandang peta sulit langsung diintegrasikan ke pengelolaan, menekankan perlunya ko desain

produk pemetaan agar relevan bagi pengguna lokal (Klenke et al., 2024). Di sisi lain, keterbatasan resolusi spasial dan kesenjangan data lokal dapat menurunkan ketepatan peta LULC, meskipun NDVI deret waktu dan klasifikasi tak terawasi sudah memberi dasar penting bagi perencanaan mekanisasi dan manajemen sumber daya (Md Tahir et al., 2024).

Keseluruhan bukti menunjukkan bahwa integrasi kuat antara GIS, penginderaan jauh, dan metode analitik lanjutan merupakan fondasi pemetaan agroekosistem kontemporer untuk mendukung ketahanan pangan dan pengelolaan lahan berkelanjutan.

20.5 Agroekologi Digital: Peran Teknologi dalam Pengelolaan Sistem Pertanian

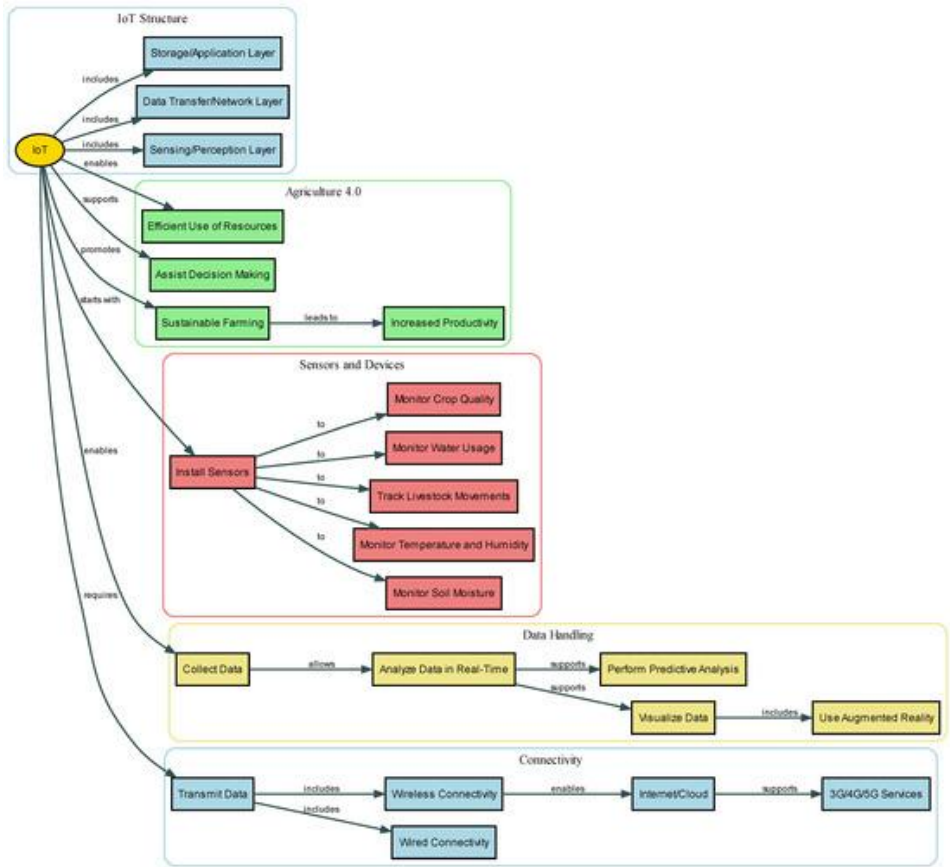
Agroekologi digital muncul dari pertemuan antara agroekologi sebagai pendekatan ekologis-sosial, dan gelombang baru teknologi digital pertanian. Keduanya sama-sama dikaitkan dengan janji keberlanjutan, namun juga menimbulkan pertanyaan tentang keadilan, pengetahuan, dan kekuasaan dalam sistem pangan. Tulisan ini membahas bagaimana teknologi digital mengubah pengelolaan sistem usahatani, sekaligus peluang dan ketegangannya dengan prinsip agroekologi.

1) Digitalisasi, agroekologi, dan pengelolaan sistem usahatani

Agroekologi menekankan keberagaman, daur ulang, efisiensi, resiliensi, nilai sosial dan manusia, ekonomi sirkular, serta tata kelola yang bertanggung jawab (Bellon-Maurel *et al.*, 2022). Praktik agroekologi kompleks dan beragam sehingga sulit terdokumentasi dan dinilai dengan pendekatan agronomi tradisional yang sempit pada hasil dan pendapatan (Wittman *et al.*, 2020). Di sisi lain, pertanian digital mengandalkan data besar, sensor, kecerdasan buatan, dan konektivitas untuk mentransformasi sistem produksi menjadi lebih “data-driven” (Ingram *et al.*, 2022). Pertanian digital diposisikan sebagai cara merancang sistem pertanian berkelanjutan dengan menyeimbangkan dimensi ekonomi, lingkungan, dan sosial (Basso & Antle, 2020). Digital agroekologi berupaya menjembatani kedua dunia ini dengan memanfaatkan teknologi digital untuk mengoperasionalkan prinsip agroekologi disamping menghormati konteks lokal dan kedaulatan petani (Viera-Arroyo *et al.*, 2025; Hackfort, 2021).

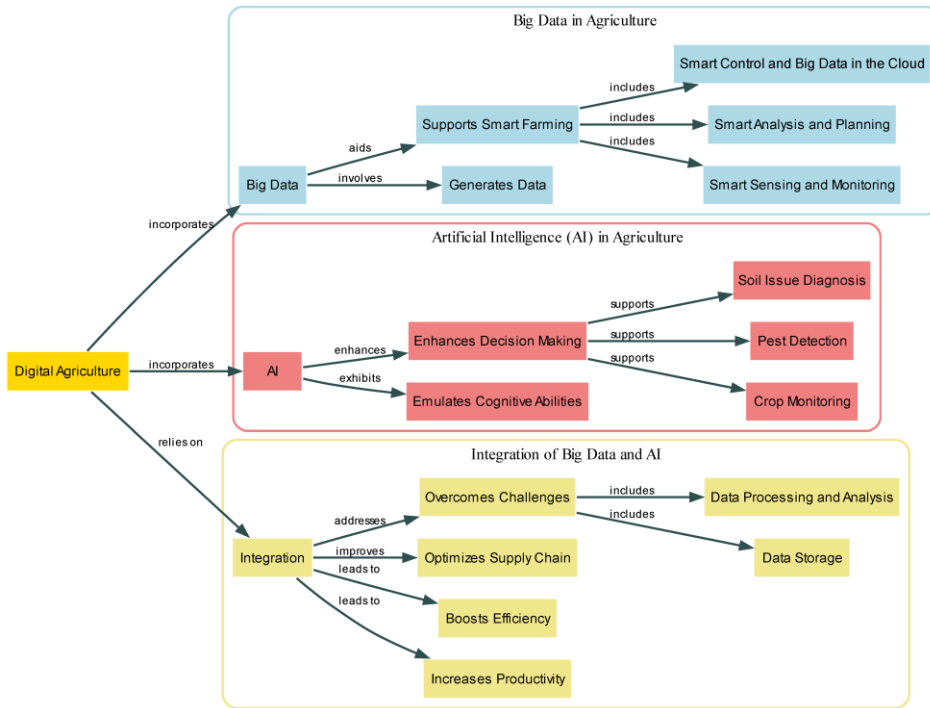
2) Teknologi kunci dan fungsinya dalam manajemen usahatani

Teknologi digital—mencakup sensor lapang, IoT, penginderaan jauh, UAV, robotika, analitik big data, dan kecerdasan buatan—di mana fungsinya dalam pertanian diilustrasikan dalam Gambar 20.1 (Fuentes-Peñailillo *et al.*, 2024; Mohamed *et al.*, 2021). Jaringan sensor dan IoT memungkinkan pemantauan real-time kondisi tanah, air, hama, dan iklim untuk mengoptimalkan irigasi, pemupukan, dan pengendalian hama (Gambar 20.2) (Fuentes-Peñailillo *et al.*, 2024). Teknologi resolusi tinggi, seperti penginderaan jauh dan sensor in situ, mendukung pemantauan sistem agroekologi yang dinamis dan memasok data ke kerangka pemantauan dan sistem pendukung keputusan (Viera-Arroyo *et al.*, 2025). Konsep digital twin atau kembar digital di tingkat lahan memungkinkan pemisahan aliran fisik dari perencanaan dan kontrol, sehingga manajemen operasi dapat dilakukan dari jarak jauh berdasarkan data mendekati real-time (Cesco *et al.*, 2023; Verdouw *et al.*, 2021). Sistem pendukung keputusan (decision support systems, DSS) dan platform digital dapat meningkatkan efisiensi, sirkulasi hara, dan pengelolaan tanah air dalam sistem agroekologi, sekaligus membantu petani mengambil keputusan yang lebih tepat berbasis data (Viera-Arroyo *et al.*, 2025; Petraki *et al.*, 2025). Digitalisasi juga dapat mengurangi isolasi petani kecil melalui platform dan aplikasi seluler yang menghubungkan ke pasar, layanan penyuluhan, dan dukungan keuangan, serta mendorong koordinasi dan pengelolaan sumber daya kolektif (Gómez & Byttebier, 2025).



Gambar 20.1: Overview ekosistem Internet of Things (IoT) di bidang pertanian

(Fuentes-Peñailillo *et al.*, 2024)



Gambar 20.2: Peran teknologi digital dalam pertanian

(Fuentes-Peñailillo *et al.*, 2024)

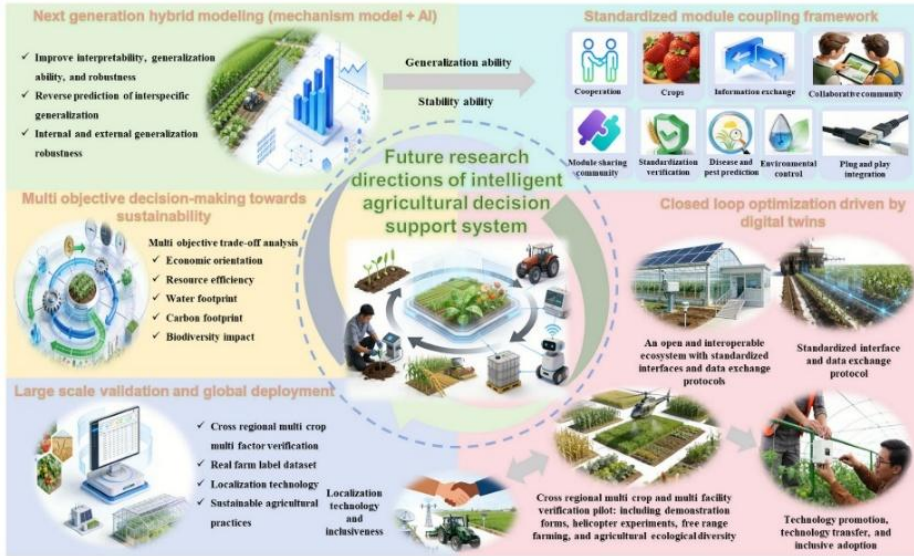
3) Peluang transisi agroekologis dan risiko ketimpangan

Digitalisasi dapat mempercepat transisi agroekologi bila mengadopsi pendekatan berbeda dari pertanian konvensional: tidak “one-size-fits-all”, menghargai keberagaman, konteks lokal, interoperabilitas, dan melihat petani sebagai ko-pencipta pengetahuan (Viera-Arroyo *et al.*, 2025). Model “agroekologi digital” yang digerakkan petani berupaya mengembangkan alat digital terbuka untuk pemantauan dan sertifikasi partisipatif, sehingga petani dan organisasinya dapat menangkap manfaat revolusi digital tanpa kehilangan kedaulatan data (Wittman *et al.*, 2020). Namun, literatur juga menyoroti pola ketimpangan dalam pengembangan dan adopsi teknologi digital: dalam siapa yang mengembangkan teknologi, distribusi manfaat, kedaulatan atas data dan infrastruktur, literasi digital, serta kapasitas mendefinisikan masalah dan solusi (Hackfort, 2021). Banyak pandangan sosial kritis berargumen bahwa teknologi digital berisiko mengurangi

otonomi petani, menstandarkan sistem pangan, memperkuat pertanian berkapital besar, dan mereproduksi relasi kuasa korporasi, sehingga berpotensi menghambat agroekologi (Bellon Maurel et al., 2022; Hackfort, 2021). Hambatan lain dalam sistem usahatani termasuk rendahnya literasi digital, infrastruktur lemah, keterbatasan finansial, dan keraguan atas efektivitas alat digital dalam kondisi nyata, yang secara khusus menghambat petani kecil dan negara berkembang (Viera-Arroyo *et al.*, 2025; Petraki *et al.*, 2025).

4) Tata kelola pengetahuan dan agenda pengembangan

Digitalisasi mengubah kebutuhan pengetahuan dan keterampilan di tingkat petani, usaha tani, pekerja, dan sistem inovasi. Dampaknya tidak seragam: dapat menyebabkan deskilling melalui ketergantungan pada sistem otomatis, atau sebaliknya membuka peluang reskilling melalui akses data dan alat komputasi, bergantung pada desain teknologi, model bisnis, literasi digital, dan konteks kelembagaan (Daum, 2025). Literatur tentang “agroekologi digital” dan “emancipatory smart farming” menekankan pentingnya ko konstruksi pengetahuan dan pembebasan, bukan sekadar substitusi pengetahuan tacit oleh algoritme (Daum, 2025). Agenda masa depan untuk pertanian digital yang bertanggung jawab menyoroti kebutuhan pendekatan interdisipliner dan perspektif responsible innovation agar revolusi digital benar benar melayani transisi agroekologis dan sistem pangan yang adil (Bellon Maurel et al., 2022; Ingram et al., 2022). Sebagai contoh, model manajemen cerdas dan arah pengembangan masa depan sistem produksi tanaman (hortikultura) diilustrasikan dalam Gambar 20.3.



Gambar 20.3: Model manajemen cerdas dan arah pengembangan masa depan sistem produksi tanaman hortikultura

(Lyu et al., 2026)

Sebagai penutup, agroekologi digital menunjukkan bahwa teknologi digital bukan secara inheren pro atau kontra agroekologi; dampaknya ditentukan oleh desain teknis, model kelembagaan, dan siapa yang mengendalikan data, pengetahuan, dan agenda inovasi. Di tingkat pengelolaan sistem usahatani, sensor, IoT, DSS, dan digital twin dapat meningkatkan efisiensi, pemantauan ekologi, dan koordinasi kolektif, sekaligus membuka peluang dokumentasi dimensi sosial-ekologis yang sebelumnya sulit diukur. Namun, tanpa perhatian serius pada ketimpangan, literasi digital, kedaulatan data, dan partisipasi petani, digitalisasi berisiko memperdalam konsentrasi kekuasaan dan menghambat transformasi agroekologis. Integrasi teknologi dan agroekologi karenanya harus berakar pada hak asasi, keadilan, dan co-konstruksi pengetahuan agar benar-benar mendukung sistem pangan yang berkelanjutan dan setara.

BAB 21

AGROEKOLOGI UNTUK KETAHANAN PANGAN DAN KEBERLANJUTAN GLOBAL

21.1 Hubungan Agroekologi dengan Ketahanan Pangan dan Gizi

Ketahanan pangan merupakan cita-cita suatu bangsa untuk mampu memenuhi kebutuhan pangan di negaranya sendiri. Ketahanan pangan merupakan kondisi ketika semua orang, setiap saat, memiliki akses fisik dan ekonomi terhadap pangan yang cukup, aman, dan bergizi untuk memenuhi kebutuhan gizi serta preferensi pangan mereka sehingga dapat menjalani kehidupan yang aktif dan sehat. Konsep ini menekankan empat dimensi utama ketahanan pangan, yaitu ketersediaan pangan (availability), akses pangan (access), pemanfaatan pangan (utilization), dan stabilitas (stability) (FAO, 2019).

Upaya yang dilakukan untuk mencapai ketahanan pangan menghadapi beberapa tantangan global. Tantangan global yang dihadapi seperti perubahan iklim, degradasi sumber daya alam, pertumbuhan penduduk, serta meningkatnya ketimpangan sosial dan ekonomi (FAO, 2017) dapat mempengaruhi produksi maupun akses terhadap pangan. Tekanan yang besar dari tantangan tersebut menyebabkan perlunya mendorong penggunaan teknologi dan inovasi yang tidak hanya meningkatkan produksi namun juga ramah lingkungan dan berkelanjutan.

Teknologi dan inovasi diharapkan mampu menjamin ketahanan pangan sekaligus menjaga keberlanjutan sumber daya alam. Peningkatan jumlah penduduk, alih fungsi lahan pertanian, degradasi tanah, penurunan keanekaragaman hayati, serta dampak perubahan iklim telah menimbulkan tekanan yang signifikan terhadap sektor pertanian. Di sisi lain, sistem pertanian yang selama beberapa dekade bertumpu pada intensifikasi produksi

melalui penggunaan input eksternal yang tinggi mulai menunjukkan berbagai keterbatasan, seperti penurunan kualitas tanah, berkurangnya efisiensi penggunaan pupuk, dan meningkatnya kerentanan terhadap gangguan lingkungan. Kondisi tersebut menunjukkan perlunya pendekatan pertanian yang tidak hanya berorientasi pada peningkatan produksi, tetapi juga mampu menjaga keseimbangan ekologis dan keberlanjutan agroekosistem.

Pada pelaksanaannya untuk mewujudkan ketahanan pangan dan gizi, sistem pertanian secara konvensional belum mampu menjawab tantangan tersebut. Sistem pertanian konvensional menurut Durham and Mizik (2021) adalah pendekatan produksi pertanian yang mengandalkan penggunaan input sintetis dan teknologi modern secara intensif untuk meningkatkan hasil panen, efisiensi usaha tani, dan produktivitas lahan. Namun dalam pelaksanaannya sistem pertanian konvensional menyebabkan penurunan kesuburan tanah dan produktivitas lahan (Nurliani, St. Rahbiah and Serang, 2017).

Sistem pertanian berkelanjutan sebagai sistem pertanian ramah lingkungan yang mengkedepankan keberlanjutan merupakan sistem pertanian yang tepat dalam menghadapi tantangan global dalam mewujudkan ketahanan pangan dan gizi. Dalam perwujudan pertanian berkelanjutan terdapat beberapa pendekatan yang dapat dilakukan sebagai langkah untuk memberikan dampak yang lebih baik lagi lingkungan.

Agroekologi sebagai salah satu pendekatan dalam sistem pertanian berkelanjutan menjadi salah satu solusi untuk menghadapi tantangan ketahanan pangan dan gizi. Agroekologi tidak hanya berorientasi terhadap peningkatan produksi, tetapi juga menjaga keberlanjutan sumber daya alam. Pendekatan ini mengoptimalkan interaksi antara tanaman, tanah, air, mikroorganisme, dan lingkungan sehingga produktivitas pertanian dapat dipertahankan dalam jangka panjang. FAO menyatakan bahwa agroekologi mendukung ketahanan pangan dengan mengoptimalkan pemanfaatan sumber daya lokal dan jasa ekosistem, seperti kesehatan tanah, siklus hara, pengendalian hayati, dan efisiensi penggunaan air, tanpa bergantung secara berlebihan pada input eksternal.

Salah satu kontribusi utama agroekologi terhadap ketahanan pangan adalah perbaikan kesuburan tanah. Menurut Gerke (2022) praktik-praktik dalam

agroekologi mampu meningkatkan kandungan karbon organik tanah, aktivitas mikroorganisme, serta ketersediaan unsur hara yang dibutuhkan tanaman. Peningkatan kualitas biologis, kimia, dan fisik tanah akan menciptakan lingkungan tumbuh yang lebih baik sehingga produktivitas tanaman dapat dipertahankan secara berkelanjutan.

Agroekologi juga mendorong ketahanan pangan dan gizi melalui diversifikasi hasil pertanian. Agroekologi mendorong budidaya berbagai jenis tanaman, ternak, maupun komponen agroekosistem lainnya dalam satu sistem usaha tani sehingga tidak bergantung pada satu komoditas saja. Menurut Bezner Kerr et al. (2021a), Selain meningkatkan ketersediaan pangan, diversifikasi juga mengurangi risiko kegagalan panen akibat serangan hama, penyakit, maupun perubahan iklim karena sumber produksi dan pendapatan petani menjadi lebih beragam. Dengan demikian, sistem pangan menjadi lebih tangguh dan mampu mendukung ketahanan pangan secara berkelanjutan.

21.2 Transisi dari Pertanian Konvensional menuju Sistem Agroekologis

Keberhasilan pertanian konvensional dalam meningkatkan hasil produksi tidak lepas dari penerapan revolusi hijau. Revolusi hijau mencakup penggunaan bibit unggul, pemupukan teratur, pengairan yang cukup, pemberantasan hama secara intensif, dan teknik penanaman yang baik (Nubatonis *et al.*, 2024). Selama periode Revolusi Hijau, produksi sereal dunia meningkat jauh lebih cepat dibandingkan pertumbuhan luas lahan pertanian, sehingga mampu memenuhi kebutuhan pangan populasi yang terus bertambah, Pingali (2012). Di negara-negara produksi tanaman sereal di negara-negara berkembang bahkan meningkat hampir tiga kali lipat dalam kurun waktu sekitar lima dekade, sementara perluasan lahan pertanian hanya meningkat sekitar 30%.

Meskipun demikian, keberhasilan peningkatan produksi pangan melalui intensifikasi pertanian juga diikuti oleh berbagai dampak jangka panjang terhadap lingkungan dan keberlanjutan sistem pertanian. Sistem bertanam secara monokultur yang dilakukan pada sistem pertanian konvensional dapat memacu berkurangnya keanekaragaman hayati. Menurut laporan Widiawati pada tahun 2025, keanekaragaman hayati pada sistem pertanian konvensional

di lahan hortikultura dataran tinggi Dieng menunjukkan hasil yang lebih rendah dibandingkan dengan lahan organik ditunjukkan dengan aktivitas mikroba tanah. Sementara itu, Tilman, Reich, dan Isbell dalam publikasi ilmiah mereka pada tahun 2012 menyampaikan bahwa peningkatan keanekaragaman spesies tanaman memiliki pengaruh yang sama besar bahkan lebih besar terhadap produktivitas ekosistem dibandingkan penambahan pupuk nitrogen, peningkatan ketersediaan air, peningkatan konsentrasi CO₂, maupun pengendalian herbivora. Pengaruh positif biodiversitas terhadap produktivitas juga meningkat seiring waktu, menunjukkan bahwa sistem pertanian yang lebih beragam memiliki potensi lebih besar untuk mempertahankan produktivitas dan ketahanan pangan secara berkelanjutan.

Beberapa dampak negative dari penerapan sistem pertanian secara konvensional juga dirasakan oleh lingkungan dan masyarakat luas. Realita yang dihadapi di lapangan adalah tingginya ketergantungan petani terhadap input eksternal seperti pupuk kimia, pestisida, benih unggul, dan energi fosil. Ketergantungan ini menyebabkan biaya produksi semakin tinggi dan dapat menurunkan efisiensi usaha tani ketika harga sarana produksi meningkat. Penggunaan input internal seperti penggunaan pupuk nitrogen diketahui dapat menimbulkan berbagai dampak lingkungan. Nitrogen yang tidak terserap tanaman dapat hilang melalui berbagai proses, seperti pencucian dan limpasan, sehingga meningkatkan akumulasi nitrat di perairan. Selain berpotensi mencemari lingkungan, penggunaan pupuk nitrogen yang berlebihan juga dapat mempercepat perubahan iklim melalui peningkatan emisi dinitrogen oksida (N₂O). Gas ini banyak dihasilkan dari penggunaan pupuk nitrogen sintetis pada sistem pertanian intensif (Davidson, 2009).

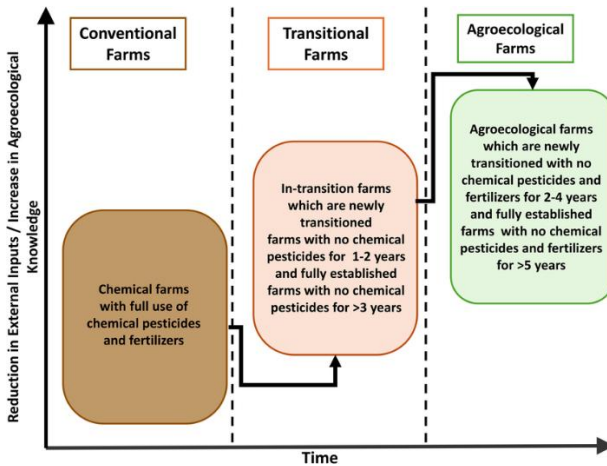
Berbagai dampak negatif yang muncul akibat penerapan pertanian konvensional menunjukkan bahwa peningkatan produksi pangan saja tidak cukup untuk menjamin keberlanjutan sistem pertanian. Kerusakan tanah, pencemaran lingkungan, berkurangnya keanekaragaman hayati, serta meningkatnya emisi gas rumah kaca menjadi tantangan yang perlu mendapat perhatian serius. Kondisi tersebut mendorong perlunya perubahan menuju sistem pertanian yang tidak hanya produktif, tetapi juga mampu menjaga kelestarian sumber daya alam dan mendukung ketahanan pangan dalam jangka panjang (Pingali, 2012).

Sebagai respons terhadap berbagai dampak yang ditimbulkan oleh sistem pertanian konvensional, agroekologi semakin banyak dikembangkan sebagai pendekatan pertanian berkelanjutan. Wezel et al. (2009) menyatakan bahwa pendekatan agroekologi menekankan pada pemanfaatan interaksi alami antara tanah, tanaman, mikroorganisme, dan lingkungan untuk mendukung produksi pangan. Dengan mengedepankan keanekaragaman hayati, daur ulang unsur hara, kesehatan tanah, dan efisiensi penggunaan sumber daya, agroekologi mampu mendukung produktivitas pertanian sekaligus menjaga keseimbangan ekosistem dalam jangka panjang.

Transisi pertanian konvensional menuju sistem pertanian agroekologis adalah langkah yang tepat. Meskipun dalam proses transisinya, terdapat berbagai tantangan yang khususnya dirasakan oleh petani. Salah satu tantangan yang sering dihadapi adalah adanya penurunan hasil panen pada fase awal transisi. Kondisi penurunan hasil panen terjadi karena lahan dan agroekosistem memerlukan waktu untuk memulihkan fungsi biologis dan membangun kembali keseimbangan ekologi setelah sebelumnya bergantung pada input sintetis dalam jangka waktu yang lama (Bezner Kerr *et al.*, 2021b).

Berikut adalah perbaikan paragraf Anda:

Laporan Mayrowani pada tahun 2012 mengenai petani padi organik di Jawa Tengah menunjukkan bahwa masa konversi dari sistem konvensional ke pertanian organik berbasis agroekologis umumnya berlangsung 2 sampai 3 tahun. Pada periode awal transisi, produktivitas padi mengalami penurunan sekitar 10 sampai 30%, namun setelah 3 sampai 5 tahun produktivitas mulai stabil dan mendekati bahkan melampaui sistem konvensional karena perbaikan kualitas tanah dan aktivitas biologi tanah.



Gambar 21.1: Fase Tahapan Transisi Sistem Pertanian Dari Pertanian Konvensional Menuju Pertanian Agroekologis

(Thapa *et al.*, 2026)

Thapa *et al.* (2026) menggambarkan bahwa transisi menuju agroekologi bukanlah perubahan yang terjadi secara instan, melainkan sebuah proses bertahap. Tahap awal transisi ditandai dengan sistem pertanian konvensional, yaitu usaha tani yang masih bergantung penuh pada penggunaan pupuk dan pestisida kimia. Pada fase ini, produktivitas tanaman umumnya sangat ditopang oleh input eksternal yang berasal dari luar sistem pertanian. Seiring meningkatnya kesadaran terhadap dampak lingkungan dan kebutuhan akan sistem pertanian yang lebih berkelanjutan, petani mulai memasuki fase pertanian transisi. Pada tahap ini terjadi pengurangan bertahap penggunaan pestisida dan pupuk kimia serta mulai diterapkannya berbagai praktik agroekologi.

Perubahan dalam masa transisi tersebut tidak hanya mencakup penerapan teknologi budidaya yang berbeda, tetapi juga melibatkan perubahan cara dalam mengelola sumber daya, meningkatkan kapasitas petani dalam menerima perubahan, serta dukungan kelembagaan dan kebijakan. Oleh karena itu, keberhasilan transisi agroekologi memerlukan proses adaptasi yang berkelanjutan agar manfaat ekologis, ekonomi, dan sosial dapat dirasakan secara optimal (Yulianto, 2016).

Tahap akhir adalah pertanian agroekologis, yaitu sistem pertanian yang telah berhasil mengurangi bahkan menghilangkan ketergantungan pada pupuk dan pestisida kimia sintetis. Pada fase ini terdapat dua kategori, yaitu lahan yang baru beralih dan telah bebas dari penggunaan pestisida serta pupuk kimia selama 2–4 tahun, serta lahan yang telah mapan dengan praktik agroekologi lebih dari 5 tahun.

21.3 Kebijakan dan Regulasi Pertanian Berkelanjutan di Tingkat Nasional dan Global

Berikut adalah perbaikan paragraf Anda:

Penerapan pertanian berkelanjutan dalam skala nasional dan global bukan hanya tanggungjawab petani ataupun pemerintah. Perlu adanya kolaborasi antar berbagai pihak dalam mendorong implementasi pertanian berkelanjutan. Pemerintah berperan besar dalam membuat kebijakan dan regulasi. Tanpa dukungan kebijakan, praktik pertanian berkelanjutan umumnya hanya berkembang pada skala lokal dan sulit diadopsi secara luas. FAO pada tahun 2019 menegaskan bahwa transformasi sistem pangan dan pertanian yang berkelanjutan memerlukan kebijakan yang mendorong perubahan struktural, tata kelola, investasi, inovasi, dan pemberdayaan pelaku pertanian.

Sistem pertanian intensif telah meningkatkan produksi pangan, tetapi juga menimbulkan berbagai dampak negative terhadap lingkungan seperti degradasi tanah, kehilangan biodiversitas, kelangkaan air, dan emisi gas rumah kaca dll. Adanya kebijakan yang tepat menjadi langkah mendorong pengurangan ketergantungan terhadap input eksternal dan mempercepat penerapan praktik agroekologis yang lebih ramah lingkungan. Selain itu, kebijakan berfungsi untuk mengintegrasikan tujuan peningkatan produktivitas, konservasi sumber daya alam, adaptasi perubahan iklim, serta ketahanan pangan dalam satu kerangka pembangunan pertanian yang berkelanjutan. Dengan demikian, keberhasilan transisi menuju sistem agroekologis sangat bergantung pada dukungan kebijakan yang mampu mendorong perubahan praktik budidaya sekaligus transformasi sistem pangan secara menyeluruh.

Di Indonesia, transisi menuju sistem pertanian berkelanjutan diwujudkan melalui berbagai kebijakan yang berorientasi pada ketahanan pangan,

perlindungan sumber daya alam, adaptasi perubahan iklim, dan peningkatan kesejahteraan petani. Adanya kebijakan yang dikeluarkan oleh pemerintah menunjukkan paradigma baru yang tidak hanya berorientasi pada peningkatan produksi melainkan juga memperhatikan aspek ekologi yang berlanjut dalam jangka panjang.

Praktik pertanian berkelanjutan di Indonesia tertuang pada salah satu kebijakan dalam Undang-Undang Nomor 41 Tahun 2009 tentang Perlindungan Lahan Pertanian Pangan Berkelanjutan (LP2B). Regulasi ini bertujuan mengendalikan alih fungsi lahan pertanian, menjamin ketersediaan lahan pangan secara berkelanjutan, mewujudkan ketahanan dan kedaulatan pangan, serta mempertahankan keseimbangan ekologis. Kebijakan ini menunjukkan bahwa keberlanjutan pertanian tidak hanya berkaitan dengan peningkatan produksi, tetapi juga dengan perlindungan sumber daya lahan sebagai faktor utama dalam sistem agroekologi.

Pada sistem pertanian berkelanjutan dengan pendekatan agroekologis, perlindungan lahan memiliki peran penting karena kesehatan tanah merupakan fondasi interaksi tanah–tanaman–iklim. Konversi lahan pertanian yang tidak terkendali dapat menurunkan kapasitas produksi pangan sekaligus mengganggu fungsi ekologis lahan dalam penyimpanan karbon, siklus hara, dan pengaturan tata air. Oleh karena itu, kebijakan perlindungan lahan dapat dipandang sebagai instrumen untuk menjaga keberlanjutan agroekosistem.

Pada tingkat global, kebijakan pertanian berkelanjutan berkembang sebagai respons terhadap meningkatnya tantangan ketahanan pangan, perubahan iklim, degradasi sumber daya alam, dan hilangnya keanekaragaman hayati yang terjadi secara global dan massif di berbagai negara. Berbagai organisasi internasional, memiliki orientasi terhadap kebijakan transformasi sistem pangan yang lebih berkelanjutan, tangguh, inklusif, dan ramah lingkungan. Salah satu kerangka kebijakan global yang paling berpengaruh adalah tujuan Pembangunan Berkelanjutan (Sustainable Development Goals/SDGs) yang diadopsi oleh United Nations pada tahun 2015. Beberapa tujuan SDGs memiliki keterkaitan langsung dengan agroekologi, terutama SDG 2 (*Zero Hunger*), SDG 12 (*Responsible Consumption and Production*), SDG 13 (*Climate Action*), dan SDG 15 (*Life on Land*). Kerangka ini menegaskan bahwa sistem pertanian masa depan harus mampu memenuhi kebutuhan

pangan dunia tanpa mengorbankan kapasitas lingkungan untuk mendukung generasi mendatang.

Pada sektor pangan, Lembaga internasional seperti Food and Agriculture Organization (FAO) aktif mendorong arah pertanian menuju sistem pertanian berkelanjutan dalam mewujudkan ketersediaan pangan berlanjut. Melalui buku dan panduan yang dikeluarkan FAO, agroekologi dijadikan sebagai pendekatan dalam meningkatkan efisiensi penggunaan sumber daya, memperkuat keanekaragaman hayati, meningkatkan ketahanan terhadap perubahan iklim, serta memperbaiki kesejahteraan petani

Secara keseluruhan, kebijakan global saat ini menunjukkan kecenderungan yang semakin kuat untuk mengintegrasikan sistem pertanian yang berkelanjutan dalam mewujudkan ketahanan pangan, memiliki mitigasi dan adaptasi perubahan iklim, serta konservasi keanekaragaman hayati. Oleh karena itu, keberhasilan implementasi agroekologi di berbagai negara sangat dipengaruhi oleh konsistensi kebijakan internasional dalam mendukung sistem pangan yang berkelanjutan, resilien, dan berkeadilan.

21.4 Peran Petani, Komunitas Lokal, dan Kearifan Tradisional dalam Agroekologi

Dalam sistem agroekologi, petani menjadi tangan pertama dalam mengelola agroekosistem yang meliputi tanah, tanaman, organisme hidup, dan lingkungan untuk mempertahankan produktivitas sekaligus menjaga keberlanjutan fungsi ekosistem. Menurut Rusdiyana, Nurwahyunani and Marianti (2021), Petani berperan penting dalam konservasi lahan untuk mengembalikan fungsi lahan kritis menjadi lahan potensial Kembali serta menjaga produktivitas lahan pertanian dan mencegah degradasi lahan.

Selain petani, komunitas lokal menjadi lapisan masyarakat yang memiliki orientasi sama dalam perwujudan pertanian berbasis agroekologi. Komunitas lokal berperan sebagai wadah kolektif yang memungkinkan terjadinya pertukaran pengetahuan, kerja sama pengelolaan sumber daya alam, serta pelestarian praktik pertanian yang telah berkembang secara turun-temurun. Pada implementasi pertanian berbasis agroekologi, pengetahuan dan praktik agroekologi yang berkembang di tingkat komunitas terbukti mampu meningkatkan diversifikasi tanaman, memperkuat ketahanan agroekosistem,

dan mendorong pengelolaan sumber daya yang lebih adaptif terhadap perubahan lingkungan (Kpienbaareh *et al.*, 2024).

Komunitas lokal juga berperan sebagai penjaga dan pewaris pengetahuan ekologis yang terbentuk melalui interaksi panjang antara masyarakat dengan lingkungan sekitarnya. Menurut Chaerani and Wulandari (2026), komunitas lokal memiliki peran strategis dalam implementasi agroekologi karena menjadi wadah bagi pengelolaan sumber daya alam, pelestarian pengetahuan tradisional, dan penguatan kelembagaan petani. Oleh karena itu, keberhasilan agroekologi tidak hanya ditentukan oleh kemampuan individu petani, tetapi juga oleh kapasitas komunitas dalam membangun sistem pangan yang berkelanjutan, tangguh, dan berbasis sumber daya lokal.

Implementasi pengembangan sistem pertanian agroekologi tidak terlepas dari kearifan tradisional. Agroekologi tidak hanya dipahami sebagai penerapan prinsip-prinsip ekologi dalam sistem pertanian, tetapi juga sebagai pengakuan terhadap pengetahuan lokal yang telah berkembang melalui hubungan antara masyarakat dengan lingkungannya. Pengetahuan tersebut mencakup teknik budidaya, pengelolaan sumber daya alam, konservasi keanekaragaman hayati, hingga norma sosial dan budaya yang mengatur hubungan manusia dengan alam.

Dalam tulisan Leni Agrariani pada tahun 2026 dinyatakan bahwa, implementasi pengelolaan lingkungan yang berdasarkan pada kearifan lokal menunjukkan hasil positif dalam menjaga kelestarian ekosistem, di mana hutan adat dan wilayah kelola masyarakat cenderung memiliki kondisi ekologis yang lebih terjaga dibandingkan wilayah yang dikelola secara eksploitatif.

Sejatinya, masyarakat adat dan komunitas lokal di berbagai wilayah Indonesia telah lama menerapkan praktik-praktik pertanian yang sejalan dengan prinsip agroekologi. Salah satu contoh penerapan praktik pertanian berbasis agroekologi adalah sistem pertanian subak di Bali. Sistem Subak merupakan organisasi pengelolaan irigasi tradisional masyarakat Bali yang telah berlangsung selama lebih dari seribu tahun. Subak tidak hanya mengatur distribusi air, tetapi juga mengintegrasikan aspek sosial, budaya, dan ekologi

melalui filosofi *Tri Hita Karana* yang menekankan harmoni antara manusia, alam, dan Tuhan.

Praktik pertanian agroforestri juga merupakan implementasi sistem pertanian berbasis agroekologis yang sudah lama diterapkan pada wilayah-wilayah di Indonesia. Menurut Suryani and Dariah (2012) agroforestri berperan dalam menghasilkan beberapa jenis produk yang memiliki daya jual tinggi dan juga sebagai langkah konservasi tanah dan air.

Oleh karena itu praktik-praktik masyarakat adat dan komunitas lokal di Indonesia sesungguhnya menunjukkan bahwa agroekologi bukanlah konsep baru. Banyak prinsip agroekologi telah diterapkan secara turun-temurun. Sistem-sistem tersebut memperlihatkan bagaimana masyarakat lokal mampu mengelola keanekaragaman hayati, menjaga siklus hara, mengoptimalkan sumber daya lokal, serta membangun kelembagaan sosial yang mendukung keberlanjutan pertanian. Oleh karena itu, kearifan tradisional dapat dipandang sebagai sumber pengetahuan penting dalam mempercepat transisi menuju sistem pertanian agroekologis yang berkelanjutan di Indonesia.

21.5 Agenda Pengembangan dan Masa Depan Agroekologi di Indonesia

Pada implementasinya, Indonesia menghadapi berbagai macam tantangan dalam mewujudkan sistem pertanian berbasis agroekologi untuk menjamin ketahanan pangan dan keberlanjutan lingkungan. Agroekologi di Indonesia masih menghadapi berbagai kendala, termasuk keterbatasan data ilmiah mengenai efektivitas praktik agroekologi pada berbagai kondisi agroekosistem tropis, minimnya indikator keberhasilan yang terukur, serta kurangnya model pengelolaan yang sesuai dengan karakteristik wilayah dan sosial ekonomi petani. Oleh karena itu, pengembangan agroekologi memerlukan dukungan pengembangan serta terobosan keilmuan yang kuat untuk menghasilkan bukti ilmiah (*scientific evidence*) yang dapat menjadi dasar pengambilan keputusan, penyusunan kebijakan, dan pengembangan teknologi yang relevan.

Pengelolaan tanah menjadi fondasi penting dalam perwujudan sistem pertanian berbasis agroekologi. Kesehatan tanah tidak hanya menentukan produktivitas tanaman, tetapi juga memengaruhi siklus hara, ketersediaan air,

keanekaragaman hayati tanah, serta kemampuan agroekosistem beradaptasi terhadap perubahan iklim (Kopittke et al., 2019). Berbagai laporan menunjukkan bahwa degradasi tanah akibat penggunaan input kimia berlebihan, pengolahan tanah intensif, dan rendahnya pengembalian bahan organik telah menyebabkan penurunan kualitas tanah di banyak wilayah pertanian. Hal ini menjadikan pengelolaan tanah menjadi prioritas dalam pengembangan kedepan. Kebutuhan pengembangan teknologi pada pertanian berbasis agroekologi adalah pengembangan teknologi untuk meningkatkan kandungan bahan organik tanah (soil organic matter). Bahan organik berperan penting dalam memperbaiki struktur tanah, meningkatkan kapasitas menahan air, menyediakan unsur hara, serta mendukung aktivitas mikroorganisme tanah (Sifola et al., 2024). Langkah pengembangan dapat diarahkan pada pemanfaatan kompos, pupuk kandang, pupuk hijau, biochar, residu tanaman, dan biomassa lokal yang tersedia di berbagai agroekosistem Indonesia.

Pengembangan teknologi seperti pemberian bahan organik dalam bentuk nano partikel, seperti nano biochar ataupun nano pupuk organik menjadi teknologi yang dapat diterapkan skala luas. Menurut Brar et al. (2024), teknologi ini dikembangkan untuk meningkatkan efisiensi pemanfaatan bahan organik dalam memperbaiki kualitas tanah dan mendukung pertumbuhan tanaman. Ukuran partikel yang sangat kecil menyebabkan luas permukaan spesifik menjadi lebih besar sehingga meningkatkan kemampuan adsorpsi, retensi air, retensi unsur hara, serta interaksi dengan mikroorganisme tanah dibandingkan bahan organik konvensional.

Di tengah berbagai tantangan yang dihadapi sektor pertanian, mulai dari degradasi lahan hingga perubahan iklim, agroekologi menawarkan harapan untuk mewujudkan sistem pertanian yang lebih seimbang antara kebutuhan produksi dan kelestarian lingkungan. Namun, keberhasilan pengembangannya memerlukan dukungan keilmuan yang mampu menjawab permasalahan nyata di lapangan dan sesuai dengan kondisi lokal Indonesia. Dengan kolaborasi yang kuat antara akademisi, pemerintah, petani, komunitas lokal, dan berbagai pemangku kepentingan lainnya, agroekologi dapat menjadi fondasi penting bagi terwujudnya ketahanan pangan yang berkelanjutan serta masa depan pertanian Indonesia yang lebih tangguh dan berdaya saing.

DAFTAR PUSTAKA

- Abuzaid, A., Mazrou, Y., Baroudy, A. E. E., Ding, Z., & Shokr, M. (2022). Multi-Indicator and Geospatial Based Approaches for Assessing Variation of Land Quality in Arid Agroecosystems. Sustainability. <https://doi.org/10.3390/su14105840>
- Aeni, N., Setiari, N. dan Nurchayati, Y., 2020. Pengaruh cekaman kekeringan terhadap morfologi dan kandungan prolin tanaman kedelai (*Glycine max* L.). Jurnal Biologi Tropis, 20(3), pp.345-352.
- Afridi, M.S. et al. (2022) “Harnessing microbial multitrophic interactions for rhizosphere microbiome engineering,” Microbiological Research, 265(127199), pp. 1–22.
- Agussaini, H. (2023) Valuasi Ekonomi Sumber Daya Alam dan Lingkungan. [slide materi kuliah]. Prodi Perencanaan Wilayah dan Kota, FT-USK.
- Ahmad, M.T. et al. (2024) “Performance assessment and indicators for agricultural water management—A review,” Water and Environment Journal [Preprint]. Available at: <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/wej.12913>.
- Ahmed, N. et al. (2024) “Micronutrients and their effects on Horticultural crop quality, productivity and sustainability,” Scientia Horticulturae, 323, pp. 1–19.
- Ahrens, C. D., 2009. Meteorology Today An Indroduction to Weather, Climate and the Environmant. Ninth Edition, page: 1-528.
- Alarcón-Segura, V. et al. (2022) ‘Strip intercropping of wheat and oilseed rape enhances biodiversity and biological pest control in a conventionally managed farm scenario’, Journal of applied ecology, 59(6), pp. 1513–1523.
- Alexandridis, N., Marion, G., Chaplin-Kramer, R., Dainese, M., Ekroos, ... & Martin, E. A. (2022). Archetype models upscale understanding of natural pest control response to land-use change. Ecological Applications, 32. <https://doi.org/10.1002/eap.2696>

- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. 1998. Crop Evapotranspiration: Guidelines for Computing Crop Water Requirements. Rome: FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56.
- Alloway, B.J. (2013) Heavy Metals in Soils: Trace Metals and Metalloids in Soils and their Bioavailability. 3rd edn. Dordrecht: Springer.
- Altieri, M. A. (1999) "The ecological role of biodiversity in agroecosystems." *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 74(1-3), hal. 19-31.
- Altieri, M. A. (1999). The ecological role of biodiversity in agroecosystems. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 74(1-3), 19-31.
- Altieri, M. A. (2019) *Agroecology: Principles and Practices for Diverse, Resilient, and Productive Farming Systems*. Oxford Res. Edited by H. Shugart. doi: <https://doi.org/10.1093/acrefore/9780199389414.013.356>.
- Altieri, M.A., Nicholls, C.I., Henao, A. and Galvis, M.A., 2015. Agroecology and the design of climate-resilient farming systems. *Agronomy for Sustainable Development*, 35(3), pp.869–890.
- Amaruzaman, S., Leimona, B., dan Tanika, L. (2018) Panduan Pelaksanaan Instrumen Ekonomi Pembayaran dan Kompensasi/Imbal Jasa Lingkungan. World Agroforestry Centre, USAID-Bijak, KLH-USAid.
- Aminatun, T. et al., 2021. Keanekaragaman organisme pada rhizosfer gulma siam di lahan vulkanik, pesisir, dan karst.. *Jurnal Penelitian Saintek*, 26(1), pp. 1-16.
- Anderson, S., Kumar, S. and Blanco, H. (2023) *Soil Hydrology in a Changing Climate*. CRC Press.
- Ansor Hasibuan, R. et al. (2025) "Characteristics of Soil Chemical Properties and Soil Fertility in Land Types in Several Villages of North Rantau District, Labuhanbatu Regency," *JURNAL AGRONOMI TANAMAN TROPIKA (JUATIKA)*, 7(1). Available at: <https://doi.org/10.36378/juatika.v7i1.3903>.
- Anwar, S. and Sudadi, U. (2013) *Kimia Tanah*. Bogor, Indonesia: Departemen Ilmu Tanah dan Sumberdaya Lahan, Fakultas Pertanian, Institut Pertanian Bogor.

- Apriani, N., Susilowati, L., Jaya, D. & Suriadi, A., 2024. POPULASI BAKTERI PENAMBAT N, N TOTAL, DAN SERAPAN N TANAMAN JAGUNG DI BAWAH PERLAKUAN VARIASI IRIGASI DAN JENIS BAHAN ORGANIK. *Agroteksos*, 34(3), pp. 1134-1146.
- Ardana, P. D. H., Suparwata, D. O., Sudrajat, A., Chatun, S., dan Harsono, I. (2024) "The Role of Bali's Traditional Subak Farming System in the Preservation of Natural and Cultural Resources." *West Science Nature and Technology*, 2 (01), hal. 31-38.
- Arévalo-Gardini, E. et al. (2015) "Changes in Soil Physical and Chemical Properties in Long Term Improved Natural and Traditional Agroforestry Management Systems of Cacao Genotypes in Peruvian Amazon," *PLOS ONE*. Edited by R. Balestrini, 10(7), p. e0132147. Available at: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0132147>.
- Armstrong, W. et al. (2019) "Tolerance of Roots to Low Oxygen: 'Anoxic' cores, the Phytoglobin-Nitric Oxide Cycle, and Energy or Oxygen Sensing," *Journal of Plant Physiology*, 239, pp. 92–108. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2019.04.010>.
- Arsyad, S. (2010) *Konservasi Tanah dan Air*. Bogor: IPB Press.
- Arsyad, S. 2010. *Konservasi Tanah dan Air*. Bogor: IPB Press.
- Aschehoug, E.T. et al. (2016) 'The mechanisms and consequences of interspecific competition among plants', *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 47(1), pp. 263–281.
- Asdak, C. 2018. *Hidrologi dan Pengelolaan Daerah Aliran Sungai*. Yogyakarta: Gadjah Mada University Press.
- Askri, A., Alnaqbi, M. M. A., Alketbi, S. A. B., Alkaabi, B. M. T., & Sheteiwy, M. S. (2025) 'Soil structural stability shaped by multisource compost amendments: Links to organic matter and microbial processes', in *Research Square*. doi: <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-7461561/v1>.
- Aslam, M. et al. (2022) "Plant Low-Temperature Stress: Signaling and Response," *Agronomy*. MDPI. Available at: <https://doi.org/10.3390/agronomy12030702>.

- Assopi, A.S. et al. (2025) 'Peningkatan Produktivitas dan Nilai Ekonomi Pertanian: Tinjauan Keuntungan Penerapan Tumpangsari Tanaman Sereal dengan Kacang-kacangan', *Jurnal Ilmiah Mahasiswa Agrokomplek*, 4(2), pp. 431–437.
- Assouline, S. (2004) 'Rainfall-induced soil surface sealing: A critical review of observations, physical mechanisms, and modeling', *Water Resources Research*, 40(9).
- Atta, K. et al. (2023) "Impacts of Salinity Stress on Crop Plants: Improving Salt Tolerance Through Genetic and Molecular Dissection," *Frontiers in Plant Science*. Frontiers Media SA. Available at: <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1241736>.
- Audette, Y. et al. (2021) 'The effect of agroecosystem management on the distribution of C functional groups in soil organic matter: A review', *Biology and Fertility of Soils*, 57(7), pp. 881–894. Available at: <https://doi.org/10.1007/s00374-021-01580-2>.
- Available at: <https://www.fao.org/soils-portal/soil-biodiversity/soil-organisms/en/> [Accessed 2026].
- Ayiti, O.E. and Babalola, O.O. (2022) "Factors Influencing Soil Nitrification Process and the Effect on Environment and Health," *Frontiers Sustainable Food Systems*, 6(821994), pp. 1–12.
- Balandrán-Valladares, M. et al. (2021) "Changes in nutrient concentration and oxidative metabolism in pecan leaflets at different doses of zinc," *CAAS Agricultural Journals*, 67(1), pp. 33–39.
- Bardgett, R.D. and van der Putten, W.H. (2014) 'Belowground biodiversity and ecosystem functioning', *Nature*, 515(7528), pp. 505–511.
- 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>
- Bayala, J. and Prieto, I., 2020. Water acquisition, sharing and redistribution by roots: applications to agroforestry systems. *Plant and Soil*, 453, pp.17–28.

- Bayupratama (2023) Subak, sebuah Warisan Budaya UNESCO: Manifestasi Harmoni antara Alam, Petani, dan Yang Ilahi. <https://budayabali.com/id/subak-sebuah-warisan-budaya-unesco-manifestasi-harmoni-antara-alam-petani-dan-yang-ilahi>.
- Bellon-Maurel, V., Lutton, E., Bisquert, P., Brossard, L., ... & Veissier, I. (2022). Digital revolution for the agroecological transition of food systems: A responsible research and innovation perspective. *Agricultural Systems*, 203, 103524. <https://doi.org/10.1016/j.agry.2022.103524>
- Belmin, R., Malézieux, É., Basset-Mens, C., Martin, T., Mottes, C., Della Rossa, P., Vayssières, J., & Bellec, F. L. (2022). Designing agroecological systems across scales: a new analytical framework. *Agronomy for Sustainable Development*, 42, 1-18. <https://doi.org/10.1007/s13593-021-00741-9>
- Beniaich, A. et al. (2023) “Spontaneous vegetation as an alternative to cover crops in olive orchards reduces water erosion and improves soil physical properties under tropical conditions,” *Agricultural Water Management*, 279(August 2022). Available at: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2023.108186>.
- Bezner Kerr, R. et al. (2021a) “Can agroecology improve food security and nutrition? A review,” *Global Food Security*, 29(2021), pp. 1–12. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.gfs.2021.100540>.
- Bezner Kerr, R. et al. (2021b) “Can agroecology improve food security and nutrition? A review,” *Global Food Security*, 29(2021), pp. 1–12. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.gfs.2021.100540>.
- Bezner Kerr, R., Madsen, S., Stüber, M., et al. (2021). Can agroecology improve food security and nutrition? A review. *Global Food Security*, 29, 100540.
- Bhunia, S. et al. (2021) ‘Agronomic Efficiency of Animal-Derived Organic Fertilizers and Their Effects on Biology and Fertility of Soil: A Review’, *Agronomy*, 11(5), p. 823. Available at: <https://doi.org/10.3390/agronomy11050823>.

- Bhunias, S. et al. (2021) 'Agronomic Efficiency of Animal-Derived Organic Fertilizers and Their Effects on Biology and Fertility of Soil: A Review', *Agronomy*, 11(5), p. 823. doi: 10.3390/agronomy11050823.
- Bienes, R. et al. (2021) 'Tracking Changes on Soil Structure and Organic Carbon Sequestration after 30 Years of Different Tillage and Management Practices', *Agronomy*, 11(2), p. 291. Available at: <https://doi.org/10.3390/agronomy11020291>.
- Bihmidine, S., Julius, B.T., Slewinski, T.L. and Braun, D.M., 2015. Phloem loading and unloading of sucrose: drivers of crop yield. *Journal of Experimental Botany*, 66(15), pp.4423-4435.
- Bintoro, A., Indriyanto, Harianto, S.P. and Dewi, B.S., 2022. Biodiversitas pohon di Repong Damar Krui. *Journal of People, Forest and Environment*, 2(2), pp.61-70.
- Björnsne, A. (2018) "Climate impact and methodological challenges in natural ecosystems," in *The nitrogen cycle in soil*. Gothenburg: University of Gothenburg, pp. 1-81.
- Blum, A. (2017) "Osmotic Adjustment is a Prime Drought Stress Adaptive Engine in Support of Plant Production," *Plant Cell and Environment*. Blackwell Publishing Ltd, pp. 4-10. Available at: <https://doi.org/10.1111/pce.12800>.
- BMKG (2026) Cuaca Ekstrem Dampak Nyata Perubahan Iklim, BMKG Tekankan Pentingnya Penguatan Peringatan Dini dan Kolaborasi, <https://www.bmkg.go.id/berita/cuaca-ekstrem-dampak-nyata-perubahan-iklim-bmkg-tekanan-pentingnya-penguatan-peringatan-dini-dan-kolaborasi>?
- Bobea, A.O. et al. (2021) "Anthropogenic Climate Change has Slowed Global Agricultural Productivity Growth," *Nature Climate Change*, 11, pp. 306-312.
- Bommarco, R., Kleijn, D., dan Potts, S. G. (2013). "Ecological intensification: harnessing ecosystem services for food security." *Trends in Ecology & Evolution*, 28(4), hal. 230-238.

- Bommarco, R., Vico, G. and Hallin, S. (2018) "Exploiting ecosystem services in agriculture for increased food security," *Global Food Security*, 17, pp. 57–63. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.gfs.2018.04.001>.
- Bondad, J. J., Harrison, M., Whish, J., Sprague, S., & Barry, K. M. (2023). Integrated crop-disease models: New frontiers in systems thinking. *Farming System*, 1(1), April 2023, 100004. <https://doi.org/10.1016/j.farsys.2023.100004>
- Boote, K., Jones, J.W., & Hoogenboom, G. (2021). Incorporating realistic trait physiology into crop growth models to support genetic improvement. in *silico Plants* 3(1). <https://doi.org/10.1093/insilicoplants/diab002>
- Braat, L. C., dan de Groot, R. (2012) "The ecosystem services agenda: bridging the worlds of natural science and economics, conservation and development, and public and private policy." *Ecosystem Services* 1, hal. 4-15. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecoser.2012.07.011>.
- Brady, N. C. & Weil, R. R., 2022. *Sifat dan Karakteristik Tanah*. ke 16 ed. s.l.:Pearson Education..
- Brady, N. C., & Weil, R. R. (2017). *The Nature and Properties of Soils*. 15th Edition. Pearson Education.
- Brady, N.C. and Weil, R.R. (2016) *The nature and properties of soils*. Fifteenth edition, global edition. Harlow, England London New York: Pearson (Pearson global edition).
- Brar, B. et al. (2024) "Nanobiochar: Soil and plant interactions and their implications for sustainable agriculture," *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 57(2024), pp. 1–18. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2024.103077>.
- Bronick, C.J. and Lal, R. (2005) 'Soil structure and management: a review', *Geoderma*, 124(1-2), pp. 3–22.
- Brooker, R.W. et al. (2015) 'Improving intercropping: a synthesis of research in agronomy, plant physiology and ecology', *New Phytologist*, 206(1), pp. 107–117.
- Brown, R. and Green, S., 2020. Water absorption mechanisms in roots. *Journal of Experimental Botany*, 71(9), pp.2101-2115.

- Brunet, J. et al. (2025) “Global Change Aggravates Drought, with Consequences For Plant Reproduction,” *Annals of Botany*. Oxford University Press, pp. 89–104. Available at: <https://doi.org/10.1093/aob/mcae186>.
- Buchmann, S. L., & Nabhan, G. P. (2012). *The Forgotten Pollinators*. Island Press.
- Budi, G.. and Neolainad (2024) ‘Penentuan Parameter Tanah Untuk Perencanaan Struktur Penahan Galian’, in *KoNTekS*, pp. 24–26.
- Cadre, E. L., Mira, S., Tang, X., & Emily, M. (2025). Choreographing rhizosphere effect with agricultural practices for agroecology? *Plos One*, 20(9), e0327301. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0327301>
- Callaway, R.M. and Walker, L.R. (1997) ‘Competition and facilitation: a synthetic approach to interactions in plant communities’, *Ecology*, 78(7), pp. 1958–1965.
- Campbell, G.S., & Norman, J.M. (1998). *An Introduction to Environmental Biophysics*. Springer.
- Carminati, A., Ahmed, M.A., Zarebanadkouki, M. and Javaux, M., (2024) ”Root mucilage and its role in soil structure, water retention and rhizosphere functioning” *Plant and Soil*, 499(1–2), pp.1–21.
- Cesco, S., Sambo, P., Borin, M., Basso, B., Orzes, G., & Mazzetto, F. (2023). Smart agriculture and digital twins: Applications and challenges in a vision of sustainability. *European Journal of Agronomy*, 146, 126809. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2023.126809>
- Chaerani, N. and Wulandari, F.T. (2026) “Agroekologi Untuk Sistem Pangan Berkelanjutan,” *Empiricism Journal*, 7(1), pp. 300–310. Available at: <https://doi.org/10.36312/bbbjh668>.
- Chang, T.G., Zhu, X.G. and Zhao, H., 2017. Source–sink interaction: a key determinant for crop yield improvement. *Trends in Plant Science*, 22(11), pp.919–922.
- Chen, Q., Mushtaq, W., Wang, X., Liao, Z., Li, J., Xiao, S., Miao, Y., & Liu, D. (2025) ‘Crop rotation alleviates continuous cropping obstacles in *Chrysanthemum morifolium* production by regulating rhizosphere soil

- microbial communities and metabolites', *Environmental Microbiome*, 20(1). doi: <https://doi.org/10.1186/s40793-025-00754-x>.
- Chen, Y. Da and Wu, C.C. (2024) "The Contradictory Issue of the Impact of Antecedent Soil Moisture to Interrill Erosion in Clay Soil: A Two-Year Field Study," *Water (Switzerland)*, 16(15). Available at: <https://doi.org/10.3390/w16152076>.
- Chen, Y., Liu, X., Wang, H. and Zhang, J., (2025) "Biological tillage effects of deep-rooted cover crops on soil compaction alleviation and soil quality improvement" *Soil and Tillage Research*, 248, p.106-178.
- Cheriere, T., Descheemaeker, K., Falconnier, G., Ganeme, A., Lairez, J., Sawadogo, H., & Adam, M. (2025). A conceptual framework for the contextualization of crop model applications and outputs in participatory research. *Agronomy for Sustainable Development*, 45. <https://doi.org/10.1007/s13593-024-01001-2>
- Chowdhury, S., Sen, S., & Janardhanan, S. 2022. Comparative Analysis and Calibration of Low Cost Resistive and Capacitive Soil Moisture Sensor.
- Christian, R.R. et al. (2016) "Improved Understanding of Nitrogen Cycling in Coastal Ecosystems Through Network Models," *Treatise on Estuarine and Coastal Science*, 9, pp. 383–396.
- Christie, M., Fazey, I., Cooper, R., Hyde, T., Deri, A., Hughes, L., Bush, G., Brander, L., Nahman, A., de Lange, W., dan Reyers, B. (2008) "An Evaluation of Economic and Non-economic Techniques for Assessing the Importance of Biodiversity to People in Developing Countries." [final report]. Report to Defra, London.
- Ciais, P. et al. (2013) "Carbon and Other Biogeochemical Cycles," in *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge: Cambridge University Press, p. 465.
- CIFOR-ICRAF, 2023. *Agroforestri Damar Mata Kucing di Lampung dan Agroforestri Nusantara*. Bogor: CIFOR-ICRAF Indonesia.
- CIFOR-ICRAF, 2023. *Agroforestri Khas Pegunungan Nusantara*. Bogor: CIFOR-ICRAF Indonesia.

- CIFOR-ICRAF, 2026. Agroforestry. Bogor and Nairobi: Center for International Forestry Research and World Agroforestry.
- Colbach, N., Colas, F., Cordeau, S., Mailliot, T., Queyrel, W., Villerd, J., & Moreau, D. (2021). The FLORSYS crop-weed canopy model, a tool to investigate and promote agroecological weed management. *Field Crops Research*, 261, 108006. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2020.108006>
- Corato, Ugo De, Egidio Viola, C. K. and Minkina, T. (2024) ‘Impact of the sustainable agricultural practices for governing soil health from the perspective of a rising agri-based circular bioeconomy’, *Applied Soil Ecology*, 194, pp. 1–15. doi: <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2023.105199>.
- Costanza, R., d'Arge, R., de Groot, R., Farber, S., Grasso, M., Hannon, B., Limburg, K., Naeem, S., O'Neill, R. V., Paruelo, J., Raskin, R. G., Sutton, P., dan den Belt, M. V. (1997) “The value of the world's ecosystem services and natural capital.” *Nature*, Vol. 387, hal. 253-260.
- Crespin-Boucaud, A., Lebourgeois, V., Seen, D. L., Castets, M., & Bégué, A. (2020). Agriculturally Consistent Mapping Of Smallholder Farming Systems Using Remote Sensing And Spatial Modelling. *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 35-42. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-xlii-3-w11-35-2020>
- Cui, Z.D.Z. (2020). Producing more with less: reducing environmental impacts through an integrated soil-crop system management approach. *Frontiers of Agricultural Science and Engineering*, 7(1), 14. <https://doi.org/10.15302/j-fase-2019295>
- Dai, L. et al. (2023) “Biocrust-reduced soil water retention and soil infiltration in an alpine Kobresia meadow,” *Hydrology and Earth System Sciences*, 27(23), pp. 4247–4256. Available at: <https://doi.org/10.5194/hess-27-4247-2023>.
- Daum, T. (2025). Digitalization and skills in agriculture. *Outlook on Agriculture*, 54, 171 - 181. <https://doi.org/10.1177/00307270251336474>

- Davidson, E.A. (2009) "The contribution of manure and fertilizer nitrogen to atmospheric nitrous oxide since 1860," *Nature Geoscience*, 2(9), pp. 659–662. Available at: <https://doi.org/10.1038/ngeo608>.
- Deshpande, G., et al. 2022. IoT-Based Low-Cost Soil Moisture and Soil Temperature Monitoring System.
- Dexter, A.R. (2004) 'Soil physical quality: Part I. Theory, effects of agricultural management, and problems with existing thresholds', *Geoderma*, 120(3-4), pp. 201–214.
- Dietrich, D., Pang, L., Kobayashi, A. and Fozard, J., (2024) "Hydrotropism and root adaptation to heterogeneous water availability" *Current Opinion in Plant Biology*, 77, p.102-511
- Diffenbaugh, N.S. et al. (2017) "Quantifying the influence of global warming on unprecedented extreme climate events," *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 114(19), pp. 4881–4886. Available at: <https://doi.org/10.1073/pnas.1618082114>.
- Djaenudin, D., Marwan, H., Subagjo, H., & Hidayat, A. 2011. *Petunjuk Teknis Evaluasi Lahan untuk Komoditas Pertanian*. Bogor: Balai Besar Litbang Sumberdaya Lahan Pertanian.
- DLHK Denpasar (2023) *PENYUSUNAN DOKUMEN BERBASIS JASA EKOSISTEM*.
- Dokumen Strategi dan Rencana Aksi Keanekaragaman Hayati Indonesia (IBSAP) / Versi Pembaruan Bappenas.
- Drinkwater, L. E., & Snapp, S. S. (2022). Advancing the science and practice of ecological nutrient management for smallholder farmers. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 6. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2022.921216>
- Droutsas, I., Challinor, A., Deva, C., & Wang, E. (2022). Integration of machine learning into process-based modelling to improve simulation of complex crop responses. *in silico Plants*, 4(2), diac017. <https://doi.org/10.1093/insilicoplants/diac017>
- Duffy, C., Toth, G.G., Hagan, R.P.O., McKeown, P.C., Rahman, S.A., Widyaningsih, Y., Sunderland, T.C.H. and Spillane, C., 2021.

Agroforestry contributions to smallholder farmer food security in Indonesia. *Agroforestry Systems*, 95(6), pp.1109–1124.

Dumont, A. M., Gasselin, P., Baret, P. V. (2021). Transitions to agroecology: Insights from sustainability science. *Sustainability*, 13(5), 2560.

Dumont, A., Wartenberg, A., & Baret, P. (2021). Bridging the gap between the agroecological ideal and its implementation into practice. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 41. <https://doi.org/10.1007/s13593-021-00666-3>

Duque, L.O. and Villordon, A. (2019) “Root Branching and Butrient Efficiency: Status and Way Forward in Root and Tuber Crops,” *Frontiers in Plant Science*. *Frontiers Media S.A.* Available at: <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00237>.

Durham, T.C. and Mizik, T. (2021) “Comparative Economics of Conventional, Organic, and Alternative Agricultural Production Systems.” Available at: <https://doi.org/10.3390/economies>.

Dusfour-Castan, P., Buck-Sorlin, G., Loisel, P., Fontez, B., & Ballini, E. (2026). Wheat growth model capturing growth-defense trade-off. *Frontiers in Plant Science*, 17. <https://doi.org/10.3389/fpls.2026.1763868>

eevagan, V., Karthika, V., & Arunkumar, N. (2026) ‘Algae as Biofertilizers: Enhancing Soil Health and Crop Productivity’, *Ecology, Environment and Conservation*, 32, pp. S41–S44. doi: <https://doi.org/10.53550/eec.2026.v32.i01s.007>.

Elouattassi, Y., Ferioun, M., Ghachtouli, N. E., Derraz, K., & Rachidi, F. (2023). Agroecological concepts and alternatives to the problems of contemporary agriculture: Monoculture and chemical fertilization in the context of climate change. *Journal of Agriculture and Environment for International Development (JAEID)*, 117(2), 41–98. <https://doi.org/10.36253/jaeid-14672>

Erdanaev, E., Kappas, M., & Wyss, D. (2022). Irrigated Crop Types Mapping in Tashkent Province of Uzbekistan with Remote Sensing-Based

- Classification Methods. Sensors (Basel, Switzerland), 22. <https://doi.org/10.3390/s22155683>
- Ergo, V. V. et al. (2018) “Heat and Water Stressed Field-Grown Soybean: A Multivariate Study on the Relationship between Physiological-Biochemical Traits and Yield,” *Environmental and Experimental Botany*, 148, pp. 1–11. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2017.12.023>.
- Fageria, N.K. and Baligar, V.C. (2008) “Chapter 7 Ameliorating Soil Acidity of Tropical Oxisols by Liming For Sustainable Crop Production,” *Advances in Agronomy*. Elsevier, pp. 345–399. Available at: [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(08\)00407-0](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(08)00407-0).
- Fahmi, A.I. dan Wijaya, A., 2021. *Fisiologi Cekaman Tanaman: Mekanisme Molekuler dan Adaptasi terhadap Lingkungan Ekstrem*. Yogyakarta: Penerbit Andi.
- Fang, X. et al. (2021) ‘Yak excreta-induced changes in soil microbial communities increased the denitrification rate of marsh soil under warming conditions’, *Applied Soil Ecology*, 165, p. 103935. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2021.103935>.
- FAO (2015) The impact of natural hazards and disasters on agriculture and food security, <https://www.fao.org/land-water/water/drought/droughtandag/en/?>
- FAO (2017) Climate smart agriculture overview, <https://www.fao.org/climate-smart-agriculture/overview/en/>.
- FAO (2019) *Sustainable Food and Agriculture: An Integrated Approach*. Edited by C. Campanhola and S. Pandey. Chennai: Academic Press.
- FAO (2023) *The State of the World’s Land and Water Resources for Food and Agriculture*. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- FAO, 2021. *FAO SOILS PORTAL*. [Online]
- FAO, 2026. *Agroforestry: Overview*. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations.

- FAO, 2026. Sustainable Forest Management Toolbox: Agroforestry Basic Knowledge. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Faralli, M. et al. (2023) “Nitrogen Control of Transpiration in Grapevine,” *Physiologia Plantarum*, 175(2). Available at: <https://doi.org/10.1111/ppl.13906>.
- Fernie, A.R., Bachem, C.W., Helariutta, Y., Neuhaus, H.E., Prat, S., Ruan, Y.L., Stitt, M., Sweetlove, L.J. and Visser, R.G., 2020. Synchronization of source–sink transitions. *Nature Plants*, 6(3), pp.211–219.
- Feyisa, G., Palao, L., Nelson, A., Gumma, M., Paliwal, A., Win, K. T., Nge, K. H., & Johnson, D. E. (2020). Characterizing and mapping cropping patterns in a complex agro-ecosystem: An iterative participatory mapping procedure using machine learning algorithms and MODIS vegetation indices. *Comput. Electron. Agric.*, 175, 105595. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105595>
- Filippelli, G.M. (2009) “Phosphorus Cycle,” *Encyclopedia of Paleoclimatology and Ancient Environments*, 186, pp. 780–783.
- Firmansyah and Argosubekti, N. (2020) “A review of Heat Stress Signaling in Plants,” *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. Institute of Physics Publishing. Available at: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/484/1/012041>.
- Fisher, B., dan Christie, M. (2009) Integrating the ecological and economic dimensions in biodiversity and ecosystem service valuation. [Chapter 1] *The Economics of Ecosystems and Biodiversity: The Ecological and Economic Foundations (TEEB D0)*.
- Fitriatin, B. N. et al., 2022. Metabolic characterization of phosphate solubilizing microorganisms and their role in improving soil phosphate solubility, yield of upland rice and phosphorus fertilizer efficiency. *Front. Sustain. Food Syst*, Volume 6.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (2018). *The 10 Elements of Agroecology: Guiding the Transition to Sustainable*

Food and Agricultural Systems. Food and Agriculture Organization, Rome.

- Fowler, N. (1986) ‘The role of competition in plant communities in arid and semiarid regions’, *Annual review of ecology and Systematics*, pp. 89–110.
- Freeman, A. M. III, Herriges, J. A. & Kling, C. L. (2014). *The Measurement of Environmental and Resource Values: Theory and Methods*. RFF Press.
- Fuentes-Peñailillo, F., Gutter, K., Vega, R., & Silva, G. C. (2024). Transformative Technologies in Digital Agriculture: Leveraging Internet of Things, Remote Sensing, and Artificial Intelligence for Smart Crop Management. *J. Sens. Actuator Networks*, 13, 39. <https://doi.org/10.3390/jsan13040039>
- Gadzhiev, N., Vagapova, A. and Yaumieva, E. (2023) “Climate change and global warming: The global carbon cycle,” in *BIO Web of Conferences* 76, pp. 1–5.
- Gao, Y., Li, X., Zhang, H. and Chen, J., (2025) “Aquaporins and root hydraulic conductivity under drought stress: recent advances and future perspectives” *Plant Physiology and Biochemistry*, 215, pp.108-915.
- Gao, Y.X. et al. (2024) “Identification of irrigation events using Bayesian statistics-based change detection and soil moisture measurements,” *Agricultural Water Management*, 302(July), p. 108999. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2024.108999>.
- García-Santos, V., Sánchez, J.M. and Cuxart, J. (2022) “Evapotranspiration Acquired with Remote Sensing Thermal-Based Algorithms: A State-of-the-Art Review,” *Remote Sensing*, 14(14), pp. 1–36. Available at: <https://doi.org/10.3390/rs14143440>.
- Gascuel-Oudou, C., Lescourret, F., Dedieu, B., Détang-Dessendre, ... & Caquet, T. (2022). A research agenda for scaling up agroecology in European countries. *Agronomy for Sustainable Development*, 42. <https://doi.org/10.1007/s13593-022-00786-4>

- Gaudio, N., Louarn, G., Barillot, R., Meunier, C., Vezy, R., & Launay, M. (2021). Exploring complementarities between modelling approaches that enable upscaling from plant community functioning to ecosystem services as a way to support agroecological transition. *in silico Plants*, 4(1), diab037. <https://doi.org/10.1093/insilicoplants/diab037>
- Geiger, R., Aron, R.H., & Todhunter, P. (2009). *The Climate Near the Ground*. Rowman & Littlefield.
- Gerke, J. (2022) “The Central Role of Soil Organic Matter in Soil Fertility and Carbon Storage,” *Soil Systems*, 6(2), pp. 1–14. Available at: <https://doi.org/10.3390/soilsystems6020033>.
- Gliessman, S. (2020). Transforming food and agriculture systems with agroecology. *Agriculture and Human Values*, 37, 547 - 548. <https://doi.org/10.1007/s10460-020-10058-0>
- Gliessman, S. R. (2014) *Agroecology: The Ecology of Sustainable Food Systems* (3rd ed.). CRC Press.
- Gliessman, S. R. (2014). *Agroecology: The Ecology of Sustainable Food Systems*. CRC Press.
- Gliessman, S.R. (2015) *Agroecology: The Ecology of Sustainable Food Systems*, Third Edition. 3rd ed. Hoboken: CRC Press.
- Gliessman, S.R., 2014. *Agroecology: The Ecology of Sustainable Food Systems*. 3rd ed. Boca Raton: CRC Press.
- Gofar, N., Permatasari, S.D.I. and Setiawati, P., 2021. *Pengantar Bercocok Tanam Agroekologis*. Bening Media Publishing.
- Gómez, J. F. M., & Byttebier, K. (2025). Agroecological sustainability: exploring the intersection of digital agriculture, ethics and the right to food. *Discover Agriculture*, 3. <https://doi.org/10.1007/s44279-025-00228-1>
- Gonçalves, B., Morais, M.C., Pereira, S., Castro, I., Moutinho-Pereira, J., Correia, C.M., Santos, A. and Silva, A.P., 2021. Tree–crop ecological and physiological interactions within climate change context: a mini-review. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 9, 661978.

- Gorazda, K. et al. (2013) “Phosphorus cycle — possibilities for its rebuilding,” *Acta biochimica Polonica*, 60(4), pp. 725–730.
- Goretti, M.K.S., Eviliyanto, dan Bayuardi, G. (2023) “Ladang Berpindah Sebagai Kearifan Lokal Masyarakat Suku Dayak Taman Desa Melapi 1 Kecamatan Putussibau Selatan Kabupaten Kapuas Hulu.” *Geo Khatulistiwa: Jurnal Pendidikan Geografi dan Pariwisata*. 3(1), hal. 1-9.
- Gorooei, A. et al. (2023) ‘Cropping systems and agricultural management strategies affect soil organic carbon dynamics in semi-arid regions’, *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 6. Available at: <https://doi.org/10.3389/fsufs.2022.1016000>.
- Graci, S. and Barone, A. (2023) “Tomato Plant Response to Heat Stress: a Focus on Candidate Genes for Yield-Related Traits,” *Frontiers in Plant Science*. *Frontiers Media SA*. Available at: <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1245661>.
- Grape.ag. Modern Microclimate Monitoring for Agriculture.
- Grishin, Alexander et al. (2021) “Thermoregulation of Plant Systems as a Factor of Production Processes,” *E3S Web of Conferences*. EDP Sciences. Available at: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202128502013>.
- Grunwald, Y., Yaaran, A. and Moshelion, M. (2024) “Illuminating Plant Water Dynamics: the Role of Light in Leaf Hydraulic Regulation,” *New Phytologist*, 241(4), pp. 1404–1414. Available at: <https://doi.org/10.1111/nph.19497>.
- Gulo, A.A.S. and Gulo, G.N.H. (2024) ‘Dinamika Gerakan Air Di Tanah: Pengaruh Tekstur, Struktur, Dan Kepadatan Bulk’, *Penarik : Jurnal Ilmu Pertanian dan Perikanan*, 01(02), pp. 133–137.
- Guo, G. et al. (2024) “Soil organic matter components and sesquioxides integrally regulate aggregate stability and size distribution under erosion and deposition conditions in southern China,” *Journal of Hydrology*, 639, p. 131588. Available at: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2024.131588>.

- Gupta, A., Rico-Medina, A. and Caño-Delgado, A.I., 2020. The role of brassinosteroids in plant adaptation to drought and salinity stress. *Journal of Experimental Botany*, 71(6), pp.1847-1856.
- Gupta, A., Singh, P., Kumar, R. and Sharma, S., (2025) “Integrated root responses to nutrient and water limitation under climate change scenarios” *Plant and Soil*, 507, pp.55–78.
- Gurr, G. M., Wratten, S. D., & Altieri, M. A. (2004). *Ecological Engineering for Pest Management: Advances in Habitat Manipulation*. CSIRO Publishing.
- Guy, C. (1999) *Molecular Responses of Plants to Cold Shock and Cold Acclimation*, J. Mol. Microbiol. Biotechnol. Available at: www.caister.com/bacteria-plant.
- Gyssels, G., et al. (2005) 'Impact of plant roots on the resistance of soils to erosion by water: a review', *Progress in Physical Geography*, 29(2), pp. 189–217.
- Hackfort, S. (2021). Patterns of Inequalities in Digital Agriculture: A Systematic Literature Review. *Sustainability*, 13(22), 12345. <https://doi.org/10.3390/su132212345>
- Haghpannah, M. et al. (2024) “Drought Tolerance in Plants: Physiological and Molecular Responses,” *Plants*. Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). Available at: <https://doi.org/10.3390/plants13212962>.
- Hairiah, K., Sardjono, M.A. and Sabarnurdin, S., 2003. *Pengantar Agroforestri*. Bogor: World Agroforestry Centre (ICRAF).
- Hairiah, K., van Noordwijk, M. and Suprayogo, D. (2002) ‘Interaksi Antara Pohon-Tanah-Tanaman Semusim: Kunci Keberhasilan Atau Kegagalan Dalam Sistem Agroforestri’, *World Agroforestry Centre (ICRAF) Southeast Asia*. Bogor [Preprint].
- Hajirad, I., Ahmadaali, K., & Liaghat, A. (2025). Crop yield and water productivity modeling using nonlinear growth functions. *Scientific Reports*, 15. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-16096-0>

- Hamzei, J. and Seyedi, M. (2015) 'Evaluation of the effects of intercropping systems on yield performance, land equivalent ratio, and weed control efficiency', *Agricultural Research*, 4(2), pp. 202–207.
- Handoko. 1995. *Klimatologi Dasar: Landasan Pemahaman Fisika Atmosfer dan Unsur-Unsur Iklim*. Jakarta: Pustaka Jaya.
- Hanifa, A.P. et al. (2025) *TUMPANGSARI: Harmoni Untuk Keseimbangan Ekosistem*. Kamiya Jaya Aquatic.
- Hardjowigeno, S., 2015. *Ilmu Tanah..* Jakarta: Akademika Pressindo.
- Harini, R., Aulia, D. N., Ningrum, E. C., Hanifah, K., Fitria, L., dan Dewanti, T. (2020) "Kearifan Lokal Pertanian, Permasalahan, dan Arah Strategi dalam Pengelolaan Pertanian di Desa Sembungan." *Majalah Geografi Indonesia*, 34(2), hal. 125-129. DOI: 10.22146/mgi.32310.
- Harlan, J. R. (1992). *Crops & Man*. American Society of Agronomy.
- Hartmann, M. and Six, J. (2022) 'Soil structure and microbiome functions in agroecosystems', *Nature Reviews Earth & Environment*, 4(1), pp. 4–18. Available at: <https://doi.org/10.1038/s43017-022-00366-w>.
- Hatfield, J. L., & Prueger, J. H. (2015). Temperature Extremes: Effect on Plant Growth and Development. *Weather and Climate Extremes*, 10, 4–10.
- Hatfield, J.L. and Dold, C., 2019. Water use efficiency: Advances and challenges in a changing climate. *Frontiers in Plant Science*, 10, p.103.
- Hatfield, J.L., & Prueger, J.H. (2015). Microclimate effects on crop production. *Agronomy Journal*, 107(5), 1701–1715.
- Hawkes, J. G., Maxted, N., & Ford-Lloyd, B. V. (2000). The ex situ conservation of plant genetic resources. Modern Academic Publishers
- Heinen, M. et al. (2024) "SWAP 50 years: Advances in modelling soil-water-atmosphere-plant interactions," *Agricultural Water Management*, 298, p. 108883. Available at: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.agwat.2024.108883>.
- Hernández-Ochoa, I., Gaiser, T., Kersebaum, K., Webber, H., Seidel, S., Grahmann, K., & Ewert, F. (2022). Model-based design of crop diversification through new field arrangements in spatially

heterogeneous landscapes. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 42. <https://doi.org/10.1007/s13593-022-00805-4>

Herzog, M. et al. (2016) “Mechanisms of Waterlogging Tolerance in Wheat – a Review of Root and Shoot Physiology,” *Plant, Cell & Environment*, 39(5), pp. 1068–1086. Available at: <https://doi.org/10.1111/pce.12676>.

Hidayati, N., Triadiati, T. dan Anas, I., 2018. Photosynthesis and biochemical adaptation of local upland rice cultivars to drought stress. *Jurnal Fitopatologi Indonesia*, 14(2), pp.55-63.

Hillel, D. (2004) *Introduction to Environmental Soil Physics*. Amsterdam: Elsevier Academic Press.

Hisyam, F., Permana, A.P. and Hutagalung, R. (2024) ‘Analisis Porositas Batugamping Sebagai Reservoir Air Tanah Daerah Bintalahe, Kabupaten Bone Bolango, Provinsi Gorontalo’, *Journal of Applied Geoscience and Engineering*, 3(2), pp. 99–112. Available at: <https://doi.org/10.34312/jage.v3i2.30311>.

HLPE. (2021). *Agroecological and other innovative approaches for sustainable agriculture and food systems*. High Level Panel of Experts on Food Security and Nutrition, FAO.

Hooijer, A., et al. (2012) 'Subsidence and carbon loss in Indonesian tropical peatlands', *Biogeosciences*, 9(3), pp. 1053–1071.

Hopkins, W.G. and Hüner, N.P.A., 2009. *Introduction to Plant Physiology*. 4th ed. New York: John Wiley & Sons.

Hoshide, A. K., Sarkar, R., Larkin, R, dan Abreu, D. (2023) *Ecological intensification and sustainable intensification: Increasing benefits to and reducing impacts on the environment to improve future agricultural and food systems*. Published in *Frontiers in Environmental Science*.

Hou, D. et al. (2021) “Protective Mechanism of Mung Bean Coat Against Hyperlipidemia in Mice Fed with A High-Fat Diet: Insight from Hepatic Transcriptome Analysis,” *Food Funct.*, 12(24), pp. 12434–12447. Available at: <https://doi.org/10.1039/D1FO02455H>.

Hu, Y. et al. (2023) “Soil and water conservation effects of different types of vegetation cover on runoff and erosion driven by climate and underlying

- surface conditions,” CATENA, 231, p. 107347. Available at: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.catena.2023.107347>.
- Hüber, C. et al. (2022) ‘The impact of maize-bean intercropping on insect biodiversity’, *Basic and Applied Ecology*, 61, pp. 1–9.
- Hun, H. and Sarun, H. (2026) “Soil Chemical Properties and Nutrient Dynamics: pH, Cation Exchange Capacity, Nutrient Cycling, and Constraints to Plant Growth,” *Journal of Agriculture and Environment*, 5.
- Hura, J. et al. (2024) ‘Analisis permeabilitas tanah berpasir dan tanah lempung dalam hubungannya dengan manajemen irigasi’, *Penarik : Jurnal Ilmu Pertanian dan Perikanan*, 01(02), pp. 60–67.
- Huuskonen, J. and Oksanen, T. (2018) “Soil sampling with drones and augmented reality in precision agriculture,” *Computers and Electronics in Agriculture*, 154, pp. 25–35.
- Ibrahim, H., Gaieb, S., Brahim, N., Blavet, D., ... & Pansu, M. (2021). Modelling the Organic Evolution of a Mediterranean Limestone Soil under Usual Cropping of Durum Wheat and Faba Bean. *Agronomy*, 11(9), 10.3390. <https://doi.org/10.3390/agronomy11091688>
- Ingram, J., Maye, D., Bailye, C., Barnes, A., Bear, C., ... & Wilson, L. (2022). What are the priority research questions for digital agriculture? *Land Use Policy*, 114, 105962. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2021.105962>
- IPCC (2021) “Technical Summary,” *Climate Change 2021 – The Physical Science Basis*. Cambridge University Press, pp. 35–144. Available at: <https://doi.org/10.1017/9781009157896.002>.
- IPCC (2023) *Climate Change 2021 – The Physical Science Basis*, *Climate Change 2021 – The Physical Science Basis*. Cambridge University Press. Available at: <https://doi.org/10.1017/9781009157896>.
- IPCC, 2019. *Climate Change and Land: An IPCC Special Report on Climate Change, Desertification, Land Degradation, Sustainable Land Management, Food Security, and Greenhouse Gas Fluxes in Terrestrial Ecosystems*. Geneva: Intergovernmental Panel on Climate Change.

- Isayenkov, S. V. and Maathuis, F.J.M. (2019) "Plant salinity stress: Many Wnanswered Questions Remain," *Frontiers in Plant Science*. Frontiers Media S.A. Available at: <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00080>.
- Jan, M. M., Khan, M. A., Ali, M., & Ahmad, P. (2024) "Modulating root system architecture: Cross-talk between auxin and phytohormones" *Frontiers in Plant Science*, 15
- Janes-Bassett, V., Davies, J., Rowe, E., & Tipping, E. (2020). Simulating long-term carbon nitrogen and phosphorus biogeochemical cycling in agricultural environments. *The Science of the total environment*, 714, 136599. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.136599>
- Janiawati, I. A. A. (2014) *Sistem Subak Dan Subak Abian Pada Tatanan Lanskap Di Bali*. Paper on Landscape Ecology subject, Bogor Agricultural University.
- Jiao, X., Zhang, Y., Wang, L. and Chen, H., (2024) "The function of root exudates in the root colonization by beneficial soil rhizobacteria" *Biology*, 13(2), p.95.
- Jose, S., 2009. Agroforestry for ecosystem services and environmental benefits: an overview. *Agroforestry Systems*, 76, pp.1–10.
- Juice, S. M., Hartman, M. D., Von Haden, A. C., Parton, W. J., & Brzostek, E. (2025). Modeling Plant Nutrient Acquisition Strategies Alters Projections of Carbon and Nitrogen Dynamics in Bioenergy Agroecosystems. *GCB Bioenergy*, 17. <https://doi.org/10.1111/gcbb.70042>
- Juventia, S.D. et al. (2022) 'Spatio-temporal design of strip cropping systems', *Agricultural Systems*, 201, p. 103455.
- Kader, M. A., Senge, M., Mojid, M. A., & Ito, K. (2017). Recent Advances in Mulching Materials and Methods for Modifying the Soil Environment. *Soil and Tillage Research*, 168, 155–166.
- Karmaoui, A., Moumane, A., Jaafari, E. S., Menouni, A., Karkouri, J. A., Yacoubi, M., & Hajji, L. (2023). Thirty Years of Change in the Land Use and Land Cover of the Ziz Oases (Pre-Sahara of Morocco) Combining

- Remote Sensing, GIS, and Field Observations. *Land*, 12(12), 10.3390. <https://doi.org/10.3390/land12122127>
- Katyayani, K.K.S. et al. (2025) “ROLE OF MYCORRHIZA IN PHOSPHORUS MOBILIZATION IN AGROFORESTRY SYSTEMS,” *Krishi Science*, 6(5), pp. 35–38.
- Kaushal, M., Kolombia, Y. A., Alakonya, A., Kuate, A. F., Ortega-Beltran, A., Amah, D., & Masso, C. (2021). Subterranean Microbiome Affiliations of Plantain (*Musa spp.*) Under Diverse Agroecologies of Western and Central Africa. *Microbial Ecology*, 84(2), 580–593. <https://doi.org/10.1007/s00248-021-01873-x>
- Kementerian Pertanian RI. 2023. Upaya Konservasi Tanah Pada Lahan Miring Melalui Terasering di Dataran Tinggi.
- Khan, Y., Shah, S. and Hui, T. (2022) “The Roles of Arbuscular Mycorrhizal Fungi in Influencing Plant Nutrients, Photosynthesis, and Metabolites of Cereal Crops—A Review,” *Agronomy*, 12(9), p. 2191.
- Khudori, K. (2011) Sistem Pertanian Pangan Adaptif Perubahan Iklim. Available at: <https://doi.org/10.33964/jp.v20i2.28> (Accessed: June 4, 2026).
- Klenke, G., Brines, S., Hernandez, N., Li, K., Glancy, R., Cabrera, J. L., Neal, B. H., Adkins, K. A., Schroeder, R., & Perfecto, I. (2024). Farmer Perceptions of Land Cover Classification of UAS Imagery of Coffee Agroecosystems in Puerto Rico. *Geographies*, 4(2), 10.3390. <https://doi.org/10.3390/geographies4020019>
- Kochian, L.V., Piñeros, M.A., Liu, J. and Magalhaes, J.V. (2015) 'Plant adaptation to acid soils: The genomics and cell biology of aluminum tolerance', *Current Opinion in Plant Biology*, 24, pp. 119–126.
- Koevoets, I.T., Venema, J.H., Testerink, C. and Pierik, R., (2024) “Root system plasticity for drought adaptation in crops” *Trends in Plant Science*, 29(4), pp.357–372.
- Konapala, G. et al. (2020) “Climate change will affect global water availability through compounding changes in seasonal precipitation and

evaporation,” *Nature Communications*, 11(1). Available at: <https://doi.org/10.1038/s41467-020-16757-w>.

Kopittke, P.M. et al. (2019) “Soil and the intensification of agriculture for global food security,” *Environment International*. Elsevier Ltd, pp. 1–8. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.105078>.

Kosmus, M., Isabel Renner, I., dan Ullrich, S. (2019) *Integrating Ecosystem Services into Development Planning – Agrarian Landscapes*. Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH.

Kothari, K., Battisti, R., Boote, K., Archontoulis, S., Confalone, A., Constantin, J., Cuadra, S. V., Debaeke, P., Faye, B., ... & Salmerón, M. (2024). Evaluating differences among crop models in simulating soybean in-season growth. *Field Crops Research*, 309, 1 April 2024, 109306. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2024.109306>

Kou, X., Han, W. and Kang, J. (2022) “Responses of root system architecture to water stress at multiple levels: A meta-analysis of trials under controlled conditions,” *Frontiers in Plant Science*. Frontiers Media S.A. Available at: <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.1085409>.

Kourgialas, N.N., Anastopoulos, I. and Stefanakis, A. (2024) “Adapting Water and Soil Management to Climate Change,” *Sustainability (Switzerland)*, 16(6), pp. 4–6. Available at: <https://doi.org/10.3390/su16062416>.

Kpienbaareh, D. et al. (2024) “Local actors, farmer decisions and landscape crop diversity in smallholder farming systems: A systems perspective,” *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 374. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.agee.2024.109138>.

Kramer, P.J., 1983. *Water Relations of Plants*. New York: Academic Press.

Krastanova, M. et al. (2022) ‘Aquaponic systems: biological and technological parameters’, *Biotechnology & Biotechnological Equipment*, 36(1), pp. 305–316.

Kugbe, X.J. et al. (2018) ‘Role of intercropping in modern agriculture and sustainability: A Review’.

Kumar, A. et al. (2025) ‘Evaluating soil physico-chemical properties and nutrient availability through intensified conservation agriculture-based

- cropping systems', *Frontiers in Agronomy*, 7. Available at: <https://doi.org/10.3389/fagro.2025.1612792>.
- Kumar, A. et al. (2025) "Adapting Crops to Rising Temperatures: Understanding Heat Stress and Plant Resilience Mechanisms," *International Journal of Molecular Sciences*. Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). Available at: <https://doi.org/10.3390/ijms262110426>.
- Kumar, A. et al. (2025) "Evaluating soil physico-chemical properties and nutrient availability through intensified conservation agriculture-based cropping systems," *Frontiers in Agronomy*, 7, p. 1612792. Available at: <https://doi.org/10.3389/fagro.2025.1612792>.
- Kumar, N. V., Patil, M. B., Nadagouda, B. T., & Beerge, R. (2025) 'Synergistic Effects of Different Composts and Microbial Inoculants on Crop Yield, Soil Fertility, and Microbial Populations', 33(1), pp. 1–11. doi: <https://doi.org/10.1080/1065657x.2025.2567534>.
- Kump, L.R., Kasting, J.F. and Crane, R.G. (1999) *The Earth System*. Upper Saddle River, New Jersey: Prentice Hall.
- Kusumastuti, A., Indrawati, W., Supriyanto & Kurniawan, A., 2022. Keanekaragaman mesofauna tanah dan aktivitas mikroorganisme tanah pada vegetasi nilam di berbagai dosis biochar dan pupuk majemuk NPK.. *Agriprima: Journal of Applied Agricultural Sciences*, 6(2), pp. 145-162.
- Kuyah, S., Oborn, I. and Jonsson, M. (2016) "Trees in agricultural landscapes enhance provision of ecosystem services in Sub-Saharan.,," *frican Journal* has since changed name to *Ecosystems and People*, 12, pp. 255–273.
- Kyker-Snowman, E., Wieder, W., Frey, S., & Grandy, A. S. (2020). Stoichiometrically coupled carbon and nitrogen cycling in the MIMICS-CN v1.0. *Geoscientific Model Development*, 13(9): 4413–4434. <https://doi.org/10.5194/gmd-13-4413-2020>
- Lakitan, B. 2012. *Dasar-Dasar Klimatologi*. Jakarta: RajaGrafindo Persada.

- Lal, R. (2019) 'Strategies for soil health restoration and climate change mitigation', *Journal of Soil and Water Conservation*, 74(3), pp. 54A–60A.
- Lal, R. (2020). *Soil Conservation and Ecosystem Services*. *International Soil and Water Conservation Research*, 8(3), 193–197.
- Lal, R. (2015) 'Restoring Soil Quality to Mitigate Soil Degradation', *Sustainability*, 7(5), pp. 5875–5895.
- Lal, Rattan. (2004). "Soil Carbon Sequestration to Mitigate Climate Change." *Geoderma*. 123. hal. 1-22. 10.1016/j.geoderma.2004.01.032
- Lamers, J., van der Meer, T. and Testerink, C., 2020. How plants sense and respond to stressful environments. *Plant Physiology*, 182(4), pp.1624-1635.
- Leakey, A.D., Ferguson, J.N., Pignon, C.P., Wu, A., Jin, Z., Hammer, G.L. and Long, S.P., 2019. Water use efficiency as a constraint and target for improving crop yields. *Plant, Cell & Environment*, 42(4), pp.1180-1201.
- Leakey, R.R.B., 1996. Definition of agroforestry revisited. *Agroforestry Today*, 8(1), pp.5–7.
- Lebeau, S. et al. (2023) "Cover crop effects on infiltration, aggregate stability, and water retention in the Lower Mississippi River Valley," *Agrosystems, Geosciences and Environment*, 6(1), pp. 1–14. Available at: <https://doi.org/10.1002/agg2.20341>.
- Lehmann, A., Zheng, W. and Rillig, M.C., (2024) "Arbuscular mycorrhizal fungi and glomalin-related soil proteins in soil aggregation and ecosystem functioning" *Soil Biology and Biochemistry*, 194, p.109-327.
- Lehmann, J. and Joseph, S. (eds.) (2015) *Biochar for Environmental Management: Science, Technology and Implementation*. 2nd edn. London: Routledge.
- Lehmann, J. and Kleber, M. (2015) 'The contentious nature of soil organic matter', *Nature*, 528(7580), pp. 60–68.
- Leni Agrariani, L.A. (2026) "Pengetahuan Ekologis Tradisional, Kearifan Lokal, Dan Pengelolaan Lingkungan," *BASADYA: Jurnal Ilmu Bahasa*,

- Sastra, dan Budaya, 2(1), pp. 7–12. Available at: <https://doi.org/https://doi.org/10.70134/basadya.v2i1.1051>.
- Li, H. et al. (2024) “Evaluating the long-term effects of best management practices on pollution reduction and soil quality improvement in sloping farmland of the Three Gorges Reservoir area,” *Agricultural Water Management*, 297, p. 108844. Available at: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.agwat.2024.108844>.
- Li, Y. et al. (2025) ‘Editorial: Biochar in agroecosystems: optimizing soil fertility and crop productivity’, *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 9. Available at: <https://doi.org/10.3389/fsufs.2025.1609784>.
- Li, Y., Zhao, W., Wang, Z. and Zhang, X., (2024) “Root system characteristics and their role in soil erosion control in semi-arid ecosystems” *Catena*, 238, p.107-831.
- Liang, X. et al. (2025) ‘Integrated Management Practices Foster Soil Health, Productivity, and Agroecosystem Resilience’, *Agronomy*, 15(8), p. 1816. Available at: <https://doi.org/10.3390/agronomy15081816>.
- Lin, B.B., 2011. Resilience in agriculture through crop diversification: Adaptive management for environmental change. *BioScience*, 61(3), pp.183–193.
- Lithourgidis, A.S. et al. (2011) ‘Annual intercrops: an alternative pathway for sustainable agriculture’, *Australian journal of crop science*, 5(4), pp. 396–410.
- Liu, L. et al. (2026) “Differential Regulation of Heat Stress During the Seedling and Squaring Stage On the Reproductive Development and Yield Formation of Cotton,” *Industrial Crops and Products*, 239. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2025.122408>.
- Liu, X. et al. (2018) ‘Relationships among light distribution, radiation use efficiency and land equivalent ratio in maize-soybean strip intercropping’, *Field Crops Research*, 224, pp. 91–101.
- Lochocki, E., Rohde, S., Jaiswal, D., Matthews, M. L., Miguez, F., Long, S., & McGrath, J. (2022). *BioCro II: a Software Package for Modular Crop*

Growth Simulations. In *Silico Plants*, 4 (1).
<https://doi.org/10.1093/insilicoplants/diac003>

Lopez-Ridaura, S. (2022). Agroecology and Systems Analysis for Sustainable Agriculture. *Journal of Rural Problems*, 58(1), 31-35.
<https://doi.org/10.7310/arfe.58.31>

Lubis, Z., 1997. Repong Damar: Kajian tentang Proses Pengambilan Keputusan dalam Pengelolaan Lahan Hutan di Pesisir Krui, Lampung Barat. Bogor: CIFOR.

Lucchetta, M., Zuluaga, M. Y. A., Monterisi, S., Fattorini, R., Gaiotti, F., Cesco, S., & Pii, Y. (2025) ‘Innovative approaches to soil health: evaluating pruning waste compost, inoculated compost, and mineral fertilizer in a controlled growth chamber for sustainable vineyard practices’, *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 9, pp. 1–15. doi: <https://doi.org/10.3389/fsufs.2025.1504761>.

Luo, T. et al. (2022) “Seed Characteristics Affect Low-Temperature Stress Tolerance Performance of Rapeseed (*Brassica napus* L.) during Seed Germination and Seedling Emergence Stages,” *Agronomy*, 12(8). Available at: <https://doi.org/10.3390/agronomy12081969>.

Lynch, J.P., (2022) “Root phenotypes for improved nutrient capture: an underexploited opportunity for global agriculture” *New Phytologist*, 234(4), pp.1205–1218.

Lyu, Y., Cheng, C., Chen, X., Tang, S., Chen, S., Guan, X., Wu, L., Liang, Z., Zhu, Y., & Xia, G. (2026). Growth Simulation Model and Intelligent Management System of Horticultural Crops: Methods, Decisions, and Prospects. *Horticulturae*, 12(2), 139.
<https://doi.org/10.3390/horticulturae12020139>

Ma, Y. et al. (2021) “Growth and Physiological Responses of Cotton Plants to Salt Stress,” *Journal of Agronomy and Crop Science*, 207(3), pp. 565–576. Available at: <https://doi.org/10.1111/jac.12484>.

Maçik, M. et al. (2025) ‘Case study on agroecosystem management: Seasonal soil microbiome and maize yield response to an innovative NPK mineral fertilizer enriched with beneficial bacterial strains’, *Applied Soil*

Ecology, 210, p. 106084. Available at:
<https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2025.106084>.

- Maesyaroh, S.S. et al. (2022) ‘The effect of intercropping soybean (*Glycine max* L.) with refugia plant on yield and competition assessment’, in AIP Conference Proceedings. AIP Publishing LLC, p. 50016.
- Mahmud, N., Muniza, N. T. and Ahmed, A. (2025) ‘Low-Cost Biochar : A Sustainable Approach to Improve Soil Fertility and Crop Yield for Small-Scale Farmers’, *American Journal of Environmental Economics*, 4(1), pp. 67–72. doi: <https://doi.org/10.54536/ajee.v4i1.4613>.
- Malem, Z. Z., Muta’ali, L., dan Mei, E. T. W. (2020) “Daya Dukung Lingkungan Berbasis Jasa Ekosistem Pangan di Kabupaten Magelang.” *Prosiding Seminar Nasional Geografi III*, hal. 595 – 606. Badan Penerbit Fakultas Geografi Universitas Gadjah Mada.
- Mao, R., Huang, Y., Sun, L. and Chen, F., (2025) “Root-driven restoration of degraded soils: mechanisms and applications in ecological rehabilitation” *Land Degradation & Development*, 36(4), pp.1250–1267.
- Mapegau, B.I. et al. (2025) *Tumpangsari: Implementasi pertanian berkelanjutan*. Usk Press.
- Marschner, H. and Marschner, P. (2012) *Marschner’s mineral nutrition of higher plants*. 3rd ed. London Waltham, MA: Academic Press.
- Mayrowani, H. (2012) “Pengembangan Pertanian Organik di Indonesia,” *Forum Penelitian Agro Ekonomi* , 30(2), pp. 91–108.
- McMahon, M.J., Kofranek, A.M., and Rubatzky, V.E, 2007. *Hartmann’s Plant Science: growth, development, and utilization of cultivated plants*. Fourth edition. Page: 1-587.
- Md-Tahir, H., Mahmood, H. S., Husain, M., Khalil, A., Shoaib, M., Ali, M., Ali, M. M., Tasawar, M., ... & Cheema, M. J. M. (2024). Localized Crop Classification by NDVI Time Series Analysis of Remote Sensing Satellite Data; Applications for Mechanization Strategy and Integrated Resource Management. *AgriEngineering* 6(3), 10.3390. <https://doi.org/10.3390/agriengineering6030142>

- Mead, R. and Willey, R. (1980) 'The concept of a 'land equivalent ratio' and advantages in yields from intercropping', *Experimental agriculture*, 16(3), pp. 217–228.
- Mei, C. C. R. L. et al., 2021. Characterization of phosphate solubilizing bacterial endophytes and plant growth promotion in vitro and greenhouse. *Microorganisms*,. *Microorganism*, 9(9), p. 11 p.
- Mei, N. et al. (2021) 'Effects of 40 years applications of inorganic and organic fertilization on soil bacterial community in a maize agroecosystem in northeast China', *European Journal of Agronomy*, 130, p. 126332. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.eja.2021.126332>.
- Mibang, A., Doruk, K. and Ramamoorthy, P. (2021) "The role of sulphur in agriculture: Enhancing crop yield and quality," *International Journal of Chemical Studies*, 11(6), pp. 16–18.
- Millennium Ecosystem Assessment (2005). *Ecosystems and Human Well-being: Synthesis*. Island Press.
- Millennium Ecosystem Assessment (MEA). (2005) *Ecosystems and Human Well-being: Synthesis*. Island Press, Washington, DC.
- Mohamed, E. S., Belal, A., Abd-Elmabod, S. K., El-Shirbeny, M., Gad, A., & Zahran, M. (2021). Smart farming for improving agricultural management. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, 24(3): 971-981. <https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2021.08.007>
- Monteith, J. L., & Unsworth, M. H. 2013. *Principles of Environmental Physics*. London: Academic Press.
- Montesinos, D. (2015) 'Plant–plant interactions: from competition to facilitation', *Web Ecology*, 15(1), pp. 1–2.
- Moore, E.B. (2023) "Challenges and Opportunities for Cover Crop Mediated Soil Water Use Efficiency Enhancements in Temperate Rain-Fed Cropping Systems: A Review," *Land*, 12(5). Available at: <https://doi.org/10.3390/land12050988>.
- Morgan, R.P.C. (2005) *Soil Erosion and Conservation*. 3rd edn. Oxford: Blackwell Publishing.

- Muchane, M.N., Sileshi, G.W., Gripenberg, S., Jonsson, M., Pumariño, L. and Barrios, E., 2020. Agroforestry boosts soil health in the humid and sub-humid tropics: A meta-analysis. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 295, 106899.
- Mujiyo et al. (2023) 'A comparative study of soil fertility and biota population under organic, semi-organic, and conventional farming system of rice fields in Giriwoyo District, Wonogiri Regency, Indonesia', *Journal of Applied and Natural Science*, 15(4), pp. 1768–1780. Available at: <https://doi.org/10.31018/jans.v15i4.5201>.
- Mulyani, A., et al. (2021) 'Potensi dan Tantangan Rehabilitasi Lahan Kritis di Indonesia', *Jurnal Sumberdaya Lahan*, 15(1), pp. 12–25.
- Mulyanto, D. (2011) "Ekonomi Pekarangan Di Pedesaan Jawa." *Jurnal Komunitas*, 3 (1), 1 hal. 9-28. <http://journal.unnes.ac.id/nju/index.php/komunitas>.
- Mulyoutami, E., Lusiana, B., & Van Noordwijk, M. 2015. Teknik Konservasi Tanah dan Air untuk Pertanian Berkelanjutan. Bogor: World Agroforestry Centre (ICRAF).
- Munns, R. and Tester, M. (2008) 'Mechanisms of salinity tolerance', *Annual Review of Plant Biology*, 59, pp. 651–681.
- Muñoz, C., Solís-Martínez, O., Valencia-Luna, J. B., Sonder, K., Hernández-Anguiano, A. M., & Palacios-Rojas, N. (2025). Aflatoxins in Mexican Maize Systems: From Genetic Resources to Agroecological Resilience and Co-Occurrence with Fumonisin. *Toxins*, 17(11), 531. <https://doi.org/10.3390/toxins17110531>
- Mushtaq, N.U. et al. (2023) "Exogenous zinc mitigates salinity stress by stimulating proline metabolism in proso millet (*Panicum miliaceum* L.)," *Frontiers in Plant Science*, 14(1053869), pp. 1–17.
- Muta'ali, L. (2019) *Daya Dukung dan Daya Tampung Lingkungan Hidup Berbasis Jasa Ekosistem untuk Perencanaan Lingkungan Hidup*. Badan Penerbit Fakultas Geografi (BPFG) Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta.

- Nair, P.K.R. et al. (2010) 'Carbon sequestration in agroforestry systems', *Advances in agronomy*, 108, pp. 237–307.
- Nair, P.K.R., 1993. *An Introduction to Agroforestry*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers.
- Nair, P.K.R., Kumar, B.M. and Nair, V.D., 2021. *An Introduction to Agroforestry: Four Decades of Scientific Developments*. Cham: Springer.
- NASA (2025) Ice Sheets - Earth Indicator, <https://science.nasa.gov/earth/explore/earth-indicators/ice-sheets/>.
- Nazari, M., Bilyera, N., Banfield, C. C., Mason-Jones, K., Zarebanadkouki, M., Munene, R., & Dippold, M. A. (2022). Soil, climate, and variety impact on quantity and quality of maize root mucilage exudation. *Plant and Soil*, 482(1–2), 25–38. <https://doi.org/10.1007/s11104-022-05669-x>
- Nazari, M., Riebeling, S., Banfield, C. C., Akale, A., Crosta, M., Mason-Jones, K., Dippold, M. A., & Ahmed, M. A. (2020). Mucilage Polysaccharide Composition and Exudation in Maize from Contrasting Climatic Regions. *Frontiers in Plant Science*, 11. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.587610>
- Ngaba, M.J.Y., Mgelwa, A.S., Gurmesa, G.A., Uwiragiye, Y., Zhu, F., Qiu, Q., Fang, Y., Hu, B. and Rennenberg, H., 2024. Meta-analysis unveils differential effects of agroforestry on soil properties in different zonobiomes. *Plant and Soil*, 496, pp.589–607.
- Nicholls, C.I. and Altieri, M.A., 2018. Agroecology: Principles for the conversion and redesign of farming systems. *Journal of Ecosystem and Ecography*, 5(1), pp.1–8.
- Nicholls, C.I., Altieri, M.A. and Vazquez, L. (2016) "Agroecology: Principles for the Conversion and Redesign of Farming Systems," *Journal of Ecosystem & Ecography*, 5(1), pp. 1–8.
- NOAA (2023) Global Climate Report Annual 2023, <https://www.ncei.noaa.gov/access/monitoring/monthly-report/global/202313>.

- NOAA (2025) Ocean Acidification, <https://www.noaa.gov/education/resource-collections/ocean-coasts/ocean-acidification>.
- Nobel, P.S., 2009. *Physicochemical and Environmental Plant Physiology*. 4th ed. Oxford: Academic Press.
- Nubatonis, L.M. et al. (2024) *Revolusi Hijau : Transformasi Pertanian Menuju Kemandirian Pangan*.
- Nur Hannah Ismail, S., Stovin, V. and Cameron, R.W.F. (2023) "Functional urban ground-cover plants: identifying traits that promote rainwater retention and dissipation," *Urban Ecosystems*, 26(6), pp. 1709–1724. Available at: <https://doi.org/10.1007/s11252-023-01417-w>.
- Nurfatriani, F. (2006) "Konsep Nilai Ekonomi Total dan Metode Penilaian Sumberdaya Hutan." *Jurnal Penelitian Sosial dan Ekonomi*, 3(1), hal. 1-16. DOI: 10.20886/jpsek.2006.3.1.1-16.
- Nurliani, St. Rahbiah and Serang, S. (2017) "Analisis Dampak Pengelolaan Lahan Sawah Konvensional Terhadap Kualitas dan Produktivitas Lahan," *Jurnal Ecosystem*, 17(3), pp. 843–848.
- Nursyamsi, D. and Suprihati (2005) "Sifat-sifat Kimia dan Mineralogi Tanah serta Kaitannya dengan Kebutuhan Pupuk untuk Padi (*Oryza sativa*), Jagung (*Zea mays*), dan Kedelai (*Glycine max*)," *Bul. Agron. (Buletin Agronomi)*, 33(3), pp. 40–47.
- Oke, T.R. (1987). *Boundary Layer Climates*. Routledge.
- Oldeman, L.R. (1994) 'The Global Extent of Soil Degradation', in Greenway, D.J. (ed.) *Soil Resilience and Sustainable Land Use*. Wallingford: CAB International.
- Oldeman, L.R., 2011. An agroclimatic map of Java. *Contributions from the Central Research Institute for Agriculture*, 17, pp.1–22.
- Onset Computer Corporation. *HOBO MicroRX Environmental Monitoring Station*.
- Organization, F. and A. (2016) *The State of Food and Agriculture 2016: Climate Change, Agriculture and Food Security*. Rome: FAO

PUBLICATION. Available at:
<https://www.google.com/search?q=https://www.fao.org/publications/sofa/2016/en/>.

Ortiz-Bobea, A. et al. (2021) "Anthropogenic climate change has slowed global agricultural productivity growth," *Nature Climate Change*, 11(4), pp. 306–312. Available at: <https://doi.org/10.1038/s41558-021-01000-1>.

Padilah, S. (2023) *Seren Taun: Sejarah, Makna, dan Unsur Upacara Panen Masyarakat Sunda*.
<https://www.goodnewsfromindonesia.id/2023/11/04/seren-taun-sejarah-makna-dan-unsur-upacara-panen-masyarakat-sunda>.

Page, S.E. and Hooijer, A. (2016) 'In the line of fire: the hot topic of tropical peatland degradation and regeneration', *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, 371(1696).

Panda, S.K. et al. (2024) "Functionality of Reactive Oxygen Species (ROS) in Plants: Toxicity and Control in Poaceae Crops Exposed to Abiotic Stress," *Plants*. Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). Available at: <https://doi.org/10.3390/plants13152071>.

Parrotta, L. et al. (2019) "Cold Stress Affects Cell Wall Deposition and Growth Pattern in Tobacco Pollen Tubes," *Plant Science*, 283, pp. 329–342. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2019.03.010>.

Paul, E., 2015. *Mikrobiologi, Ekologi, dan Biokimia Tanah*. ke 14 ed. s.l.:Academic Press.

Pavlova, A. I. (2023). Agro-Ecological Classification Of Agricultural Land Using Machine Learning, Gis And Remote Sensing Data. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 15(6), 72-88. <https://doi.org/10.12731/2658-6649-2023-15-6-960>

Peng, J. et al. (2023) "Effects of different vegetation restoration types on soil infiltration characteristics in severely eroded subtropical regions of South China," *Journal of Soil and Water Conservation*, 78(4), pp. 364–375. Available at: <https://doi.org/10.2489/jswc.2023.00047>.

- Permana, D.S. et al. (2019) “Disappearance of the last tropical glaciers in the Western Pacific Warm Pool (Papua, Indonesia) appears imminent,” 116, pp. 26382–26388. Available at: <https://doi.org/10.1073/pnas.1822037116/-/DCSupplemental>.
- Pessl Instruments. μ METOS Weather and Soil Monitoring System.
- Petraki, D., Gazoulis, I., Kokkini, M., Danaskos, M., Kanatas, P., Rekkas, A., & Travlos, I. (2025). Digital Tools and Decision Support Systems in Agroecology: Benefits, Challenges, and Practical Implementations. *Agronomy*, 15(1), 236. <https://doi.org/10.3390/agronomy15010236>
- Pez-Baeza, E. L. Ó., Hoyos, A. P., Mulyani, A., Mulyanto, B., Barus, B., & Panuju, D. R. (2022). Geospatial Analysis of Abandoned Lands Based on Agroecosystems: The Distribution and Land Suitability for Agricultural Land Development in Indonesia. *Land*, 11(11), 2071. <https://doi.org/10.3390/land11112071>
- Pingali, P.L. (2012) “Green revolution: Impacts, limits, and the path ahead,” *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, pp. 12302–12308. Available at: <https://doi.org/10.1073/pnas.0912953109>.
- Pinova Meteo. Agriculture Weather Station for Precise Microclimate Monitoring.
- Pointurier, O., Moreau, D., Pagès, L., Caneill, J., & Colbach, N. (2021). Individual-based 3D modelling of root systems in heterogeneous plant canopies at the multiannual scale. Case study with a weed dynamics model. *Ecological Modelling*, 440, 109376. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2020.109376>
- Poirier, V., Roumet, C., Munson, A.D. and Fort, F., (2024) “Root traits and their contribution to soil aggregate stability across contrasting ecosystems” *Geoderma*, 455, p.116-711.
- Porras, I., Barton, D. N., ChaCón-CasCante, A., dan Miranda, M (2013) *Learning from 20 years of Payments for ecosystem services in Costa Rica*. International Institute for Environment and Development (IIED), London.

- Power, A. G. (2010) "Ecosystem services and agriculture: tradeoffs and synergies." *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 365(1554), hal. 2959-2971.
- Power, A.G. (2010) "Ecosystem services and agriculture: Tradeoffs and synergies," *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*. Royal Society, pp. 2959–2971. Available at: <https://doi.org/10.1098/rstb.2010.0143>.
- Pratiwi, E., Satwika, T. D. & Agus, F., 2019. Keanekaragaman mikrob tanah gambut di bawah hutan dan di bawah perkebunan sawit di Provinsi Jambi.. *Jurnal Tanah dan Iklim*, 42(1), pp. 69-78.
- Prawito, P. et al. (2021) 'Soil Properties Variability Under Various Agroecosystems In Ultisols Of Bengkulu', *TERRA : Journal of Land Restoration*, 4(2), pp. 53–59. Available at: <https://doi.org/10.31186/terra.4.2.53-59>.
- Premalatha, R. P., Poorna Bindu, J., Nivetha, E., Malarvizhi, P., Manorama, K., Parameswari, E., & Davamani, V. (2023) 'A review on biochar's effect on soil properties and crop growth', *Frontiers in Energy Research*, 11, pp. 1–19. doi: <https://doi.org/10.3389/fenrg.2023.1092637>.
- Presiden Republik Indonesia. (2017) Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 46 Tahun 2017 tentang Instrumen Ekonomi Lingkungan Hidup. Lembaran Negara Republik Indonesia Tahun 2017 Nomor 228. <https://peraturan.go.id/id/pp-no-46-tahun-2017>.
- Pritchard, S.G. et al. (2020) 'Anthropogenic impacts on soil physical properties and carbon sequestration', *Global Change Biology*, 26(3), pp. 1120– 1135.
- Pulido-Esquivel, A.Y. et al. (2025) "Agroforestry Systems Enhance Soil Moisture Retention and Aquifer Recharge in a Semi-Arid Mexican Valley," *Water (Switzerland)*, 17(10), pp. 1–16. Available at: <https://doi.org/10.3390/w17101488>.
- Purswani, J. and Pozo, C. (2021) "Nitrification and Denitrification Processes: Environmental Impacts," in *Nitrogen Cycle*, pp. 60–81.

- Qiu, R. et al. (2024) “The Effects of Changing Environments, Abiotic Stresses, and Management Practices on Cropland Evapotranspiration: A Review,” *Reviews of Geophysics*, 63. Available at: <https://doi.org/10.1029/2024RG000858>.
- Rabot, E., Wiesmeier, M., Schlüter, S. and Vogel, H.J., (2024) “Biopores and root channels: key drivers of soil structure and ecosystem services” *European Journal of Soil Science*, 75(2), e13592.
- Rafflegeau, S., Gosme, M., Barkaoui, K., Garcia, L., Allinne, C., Deheuvels, ... & Justes, E. (2023). The ESSU concept for designing, modeling and auditing ecosystem service provision in intercropping and agroforestry systems. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 43. <https://doi.org/10.1007/s13593-023-00894-9>
- Rahma, A.D. et al. (2023) “Infiltration ability in the area of land use change, Bogor, West Java,” *Applied Water Science*, 13(11), p. 213. Available at: <https://doi.org/10.1007/s13201-023-02015-z>.
- Rahman, R., Anshor, M. & Baharudin, 2015. Applications Solvents Phosphate Bacteria, Nitrogen-Fixing Bacteria and Mycorrhizae Plants Against Pace of Chili (*Capsicum annum* L.). *Agrotekbis*, 3(3), pp. 316 - 328.
- Rahmat, A., Nisyawati, Walujo, E.B. and Zuhud, E.A.M., 2023. Plant diversity under traditional agroforestry system of repong damar in Pesisir Barat District, Lampung Province, Indonesia. *Biodiversitas*, 24(9), pp.4930–4941.
- Rangappa, K., Umesh, M.R., Rajanna, G.A., Gopakkali, P. and Shivakumar, B.G., 2025. Tree crop interactions, productivity and physiological performance of annual crops under agroforestry systems. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 9, 1494371.
- Rasmussen, L.V. et al. (2024) ‘Joint environmental and social benefits from diversified agriculture’, *Science*, 384(6691), pp. 87–93.
- Raveloaritiana, E. and Wanger, T.C. (2026) ‘Long-term agricultural diversification increases financial profitability, biodiversity, and ecosystem services: a second-order meta-analysis’, *Nature Communications* [Preprint].

- Raza, A., Razzaq, A., Mehmood, S.S., Zou, X., Zhang, X., Lv, Y. and Xu, J., 2019. Impact of climate change on crops adaptation strategies to environmental stresses. *Scientia*, 22(1), pp.11-29.
- Read & Smith, 2010. *Mycorrhizal Symbiosis*. rd 3 ed. s.l.:Academic Press.
- Reimov, M., Mamatkulov, Z., Khamraliev, A., ... & Abdurashitov, B. (2023). Spatial analysis in decision-making on agriculture activities. *E3S Web of Conferences*, 386, 01002. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202338601002>
- Rengasamy, P. (2010) 'Soil processes affecting crop production in salt-affected villages', *Current Science*, 99(9), pp. 1220–1225.
- Ritchie, H. (2024) Climate change will affect food production, but here are the things we can do to adapt, <https://archive.ourworldindata.org/20260417-112857/climate-change-will-affect-food-production-things-can-adapt.html>.
- Rochmah, H.F., Suwanto, S. and Muliasari, A.A. (2020) 'Optimasi lahan replanting kelapa sawit dengan sistem tumpangsari jagung (*Zea mays* L) dan kacang tanah (*Arachis hypogaea* L)', *Jurnal Simetrik*, 10(1), pp. 256–262.
- Rodrigues, C. I. D., Brito, L. M., dan Nunes, L. J. R. (2023) "Soil Carbon Sequestration in the Context of Climate Change Mitigation: A Review." *Soil System*. 7 (64). hal. 1-21. <https://doi.org/10.3390/soilsystems7030064>.
- Rosenberg, N.J., Blad, B.L., & Verma, S.B. (1983). *Microclimate: The Biological Environment*. Wiley.
- Rossi, S., Marone, F. and Tomasi, N., 2021. Regulation of photosynthate distribution and source-sink balance in field crops under changing environments. *Agricultural Water Management*, 255, p.107022.
- Ruan, Y.L., 2022. Sucrose metabolism in relation to source-sink relations and crop yield. *Annual Review of Plant Biology*, 73(1), pp.381-406.
- Ruminta, R., Handoko, H. and Nurmala, T. (2018) "Indikasi perubahan iklim dan dampaknya terhadap produksi padi di Indonesia (Studi kasus :

- Sumatera Selatan dan Malang Raya),” *Jurnal AGRO*, 5(1), pp. 48–60. Available at: <https://doi.org/10.15575/1607>.
- Rupngam, T. and Messiga, A.J. (2024) “Unraveling the Interactions between Flooding Dynamics and Agricultural Productivity in a Changing Climate,” *Sustainability* (Switzerland). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). Available at: <https://doi.org/10.3390/su16146141>.
- Rusdiyana, Nurwahyunani, A. and Marianti, A. (2021) “Analisis Peran Petani dalam Konservasi Lahan Pertanian Berbasis Kearifan Lokal,” *Indonesian Journal of Conservation*, 10(1), pp. 42–47. Available at: <https://doi.org/10.15294/ijc.v10i1.31056>.
- RYNAN Agriculture. Smart Weather Stations for Farms.
- Salazar, M.P. et al. (2020) “Soil organic carbon. Stratification and spatial variation of different fractions in an Argiudoll under no tillage,” *Revista de la Facultad de Agronomía, La Plata*, 119(2), pp. 1–11.
- Salisbury, F.B. and Ross, C.W., 1992. *Plant Physiology*. 4th ed. California: Wadsworth Publishing.
- SALVE, A., TIWARI, C. and BAGHELE, L. (2022) “IMPACT OF AGROFORESTRY SYSTEMS: A REVIEW,” *Asian Jr. of Microbiol. Biotech. Env. Sc*, 24(2), pp. 214–223.
- Sangale, B., Awari, U. M. K. H. W., & Ingle, V. (2022). Crop Growth Simulation Modelling - A Review. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, 11(1). <https://doi.org/10.20546/ijcmas.2022.1101.010>
- Santos, F.C. dos et al. (2025) ‘Organic matter: a critical soil health indicator in agrosystems within the Cerrado of Bahia, Brazil and South Florida, USA’, *Frontiers in Soil Science*, 5. Available at: <https://doi.org/10.3389/fsoil.2025.1524550>.
- Satyakam et al. (2022) “Cold Adaptation Strategies in Plants—An Emerging Role of Epigenetics and Antifreeze Proteins to Engineer Cold-Resilient Plants,” *Frontiers in Genetics*. Frontiers Media S.A. Available at: <https://doi.org/10.3389/fgene.2022.909007>.

- Sauvadet, M. et al. (2021) ‘Agroecosystem diversification with legumes or non-legumes improves differently soil fertility according to soil type’, *Science of The Total Environment*, 795, p. 148934. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148934>.
- Schroth, G. and Sinclair, F.L. eds., 2003. *Trees, Crops and Soil Fertility: Concepts and Research Methods*. Wallingford: CABI Publishing.
- Sehgal, A. et al. (2018) “Drought or/and Heat-Stress Effects on Seed Filling in Food crops: Impacts on Functional Biochemistry, Seed Yields, and Nutritional Quality,” *Frontiers in Plant Science*. Frontiers Media S.A. Available at: <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.01705>.
- Seleiman, M.F. et al. (2021) “Plants Drought Stress Impacts on Plants and Different Approaches to Alleviate Its Adverse Effects,” *Plants*, pp. 1–25. Available at: <https://doi.org/10.3390/plants>.
- Selzer, T. and Schubert, S. (2023) “Water dynamics of cover crops: No evidence for relevant water input through occult precipitation,” *Journal of Agronomy and Crop Science*, 209(3), pp. 422–437. Available at: <https://doi.org/10.1111/jac.12631>.
- Shafansyah, M. et al. (2025) ‘Pengaruh pH Tanah Terhadap Metode Aerasi Dalam Stabilisasi Logam Berat Timbal (Pb 2 +)’, *Jurnal Serambi Engineering*, X(4), pp. 16066–16072.
- Shahbaz Khan, Sohail Irshad, Kashf Mehmood, Zuhair Hasnain, Muhammad Nawaz, Afroz Rais, Safia Gul, Muhammad Ashfaq Wahid, A. H. and Ibrar, E. F. A. and D. (2024) ‘Biochar Production and Characteristics, Its Impacts on Soil Health, Crop Production, and Yield Enhancement: A Review’, *Plants*, 13(166), pp. 1–18. doi: <https://doi.org/10.3390/plants13020166>.
- Sheshshayee, M.S., Ramakrishnan, M., Jaba, J., Sreevathsa, R., Shivashankar, K.S. and Prasad, T.G., 2020. Physiological mechanisms regulating water use efficiency in crops. *Journal of Plant Growth Regulation*, 39(2), pp.512-527.
- Shiddieq, D. and Sudira, P. (2018) *Aspek dasar agronomi berkelanjutan*. UGM PRESS.

- Shree, D., Deepasree, A., Jose, J., Nareshbhai, G. K., & Ankireddypalli, J. K. (2024) 'Advancements in soil health and disease management through organic amendments', *International Journal of Research in Agronomy*, 7(8), pp. 680–683. doi: <https://doi.org/10.33545/2618060x.2024.v7.i8i.1400>.
- Shroff, R., & Cortés, C. R. (2020). The Biodiversity Paradigm: Building Resilience for Human and Environmental Health. *Development*, 63(2–4), 172–180. <https://doi.org/10.1057/s41301-020-00260-2>
- Sidauruk, L. (2016) 'Desain tumpangsari kentang dalam upaya menekan infestasi hama *Myzus persicae* Sulzer pada sistem pertanian organik'.
- Sidauruk, L. and Sipayung, P. (2018) 'Cropping management on potato field, a strategy to suppress pest by increasing insect diversity and natural enemies', in *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. IOP Publishing, p. 12026.
- Sidauruk, L. et al. (2015) 'Effect of intercropping system on green peach aphid dynamics on organic farming of potato in Karo Highland', *Int. J. Sci. Tech. Res*, 4(10), pp. 272–277.
- Sidauruk, L., Panjaitan, E. and Sipayung, P. (2024) 'Prospects Habitat Management to Control Pest Population on Annual Plant to Support Sustainable Agricultural Development in Indonesia', *AgBioForum*, 26(2), pp. 151–158.
- Sievert, S., Kiene, R.P. and Schulz-Vogt, H. (2007) "The Sulfur Cycle," *Oceanography*, 20(2), pp. 117–123.
- Sifola, M.I. et al. (2024) "Organic Fraction Municipal Solid Waste Compost and Horse Bean Green Manure Improve Sustainability of a Top-Quality Tobacco Cropping System: The Beneficial Effects on Soil and Plants," *Sustainability (Switzerland)*, 16(15), pp. 1–20. Available at: <https://doi.org/10.3390/su16156466>.
- Singh, B.K. et al. (2023) "Climate change impacts on plant pathogens, food security and paths forward," *Nature Reviews Microbiology*, 21(10), pp. 640–656. Available at: <https://doi.org/10.1038/s41579-023-00900-7>.

- Siol, C., Majer, S. and Thrän, D. (2025) 'Integrating soil- and agro-ecosystem models into life cycle assessments of sustainable management of agricultural residues: a review in the context of Sustainable Development Goals and planetary boundaries', *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 30(12), pp. 2908–2924. Available at: <https://doi.org/10.1007/s11367-025-02550-8>.
- Siregar, L.A.M. dan Jamilah, J., 2022. Respons morfofisiologis dan anatomi tanaman kelapa sawit (*Elaeis guineensis* Jacq.) terhadap cekaman genangan air. *Jurnal Agronomi Indonesia*, 50(1), pp.88-96.
- Six, J., Bossuyt, H., Degryze, S. and Denef, K. (2004) 'A history of research on aggregation and soil quality revisited', *Soil and Tillage Research*, 79
- Smith, J. and Johnson, A., 2018. The role of water in plant growth. *Plant, Cell & Environment*, 41(3), pp.345-358.
- Smith, M.R., Rao, I.M. and Merchant, A., 2018. Source–sink relationships in crop plants: intensifying research for food security. *Frontiers in Plant Science*, 9, p.1511.
- Soemarwoto, O. (1987). *Homegardens: A traditional system of agriculture in Indonesia*. International Rice Research Institute.
- Sokol, N.W., Sanderman, J., Bradford, M.A. and Cotrufo, M.F., (2025) “Root-derived carbon as a major driver of persistent soil organic matter formation” *Nature Reviews Earth & Environment*, 6(1), pp.45–60..
- Solekhah, B.A. and Priyadarshini, R. (2024) 'Kajian Pola Distribusi Tekstur terhadap Bahan Organik pada Berbagai Penggunaan Lahan Study of Texture Distribution Patterns of Organic Matter on Various Land Uses', *Agro Bali : Agricultural Journal*, 7(1), pp. 256–265.
- Sparks, D.L. (2003) *Environmental Soil Chemistry*. 2nd edn. Amsterdam: Academic Press.
- Srivastava, R.K., & Yetgin, A. (2024)” An overall review on influence of root architecture on soil carbon sequestration potential” *Theoretical and Experimental Plant Physiology*, 36, 165–178.
- Stigter, K. (2010). *Applied Agrometeorology*. Springer.

- Stomph, T. et al. (2020) ‘Designing intercrops for high yield, yield stability and efficient use of resources: Are there principles?’, *Advances in agronomy*, 160(1), pp. 1–50.
- Subedi, K. (2025) ‘Agriculture Extension in Developing Countries EXPLORING THE ROLE OF BIOFERTILIZERS IN ENHANCING SOIL HEALTH AND SUPPORTING SUSTAINABLE AGRICULTURE : A COMPREHENSIVE REVIEW’, 3(1), pp. 16–20. doi: 10.26480/aedc.01.2025.
- Sudomo, A., Hani, A., Widyaningsih, T.S. and Mindawati, N., 2023. Can agroforestry contribute to food and livelihood security for smallholder farmers in Indonesia? *Sustainability*, 15(10), 7991.
- Sukabuminow. 2025. Terasering, Inovasi Pertanian di Lahan Miring yang Efektif dan Estetik.
- Sullivan, P. (1998) ‘Intercropping principles and production practices’, *Agronomy systems guide (Appropriate Technology Transfer for Rural Areas (Organization))* [Preprint].
- Sun, H., Jiang, S., Jiang, C., Wu, C., Gao, M., Wang, Q., (2021) “A review of root exudates and rhizosphere microbiome for crop production” *Environ. Sci. Pollut. Res.* 28, 54497–54510.
- Sun, L., Wang, S., Narsing Rao, M. P., Shi, Y., Lian, Z.-H., Jin, P.-J., Wang, W., Li, Y.-M., Wang, K.-K., Banerjee, A., Cui, X.-Y., & Wei, D. (2023) ‘The shift of soil microbial community induced by cropping sequence affect soil properties and crop yield’, *Frontiers in Microbiology*, 14. doi: <https://doi.org/10.3389/fmicb.2023.1095688>.
- Suparmoko, M., Subandar, A., dan Khan, A. (2007) *Panduan Valuasi Ekonomi Sumber Daya Alam dan Lingkungan*. Kementerian Negara Lingkungan Hidup.
- Suryani, E. and Dariah, D.A. (2012) “Peningkatan Produktivitas Tanah Melalui Sistem Agroforestri,” *Jurnal Sumberdaya Lahan*, 6(2), pp. 101–109. Available at: <https://doi.org/https://doi.org/10.2017/jsdl.v6n2.2012.%p>.

- Sutanto, R. 2012. *Pertanian Organik: Menuju Pertanian Alternatif dan Berkelanjutan*. Yogyakarta: Kanisius.
- Sylvia, D. M., Fuhrmann, J. J., Hartel, P. G. & Zuberer, D. A., 2021. *Principles and Applications of Soil Microbiology*. s.l.:Pearson.
- Taiz, L. and Zeiger, E., 2015. *Plant Physiology and Development*. 6th ed. Massachusetts: Sinauer Associates, Inc.
- Tamburini, G. et al. (2020) ‘Agricultural diversification promotes multiple ecosystem services without compromising yield’, *Science advances*, 6(45), p. eaba1715.
- Tamburini, G., Bommarco, R., Wanger, T. C., et al. (2020). Agricultural diversification promotes multiple ecosystem services without compromising yield. *Science Advances*, 6(45), eaba1715.
- Tambussi, E.A., Maydup, M.L., Carrión, C.A., Guiamet, J.J. and Araus, J.L., 2021. Concepts and methods for assessing water use efficiency in field crop breeding. *Agricultural Water Management*, 243, p.106484.
- Tan, K.H. (2011) *Principles of soil chemistry*. 4. ed. Boca Raton, Fla.: CRC Press (Books in soils, plants, and the environment, 126).
- Tatarintsev, V., Lebedeva, L., Syzdykova, G., & Inkarov, D. (2023). Management of agricultural land use sustainability at the local level using GIS technologies and special map material. *Sustainable Development of Mountain Territories*, 4, 15. <https://doi.org/10.21177/1998-4502-2023-15-4-864-876>
- Terán-Samaniego, K., Robles-Parra, J. M., ... & Espinoza-López, P. C. (2025). Agroecology and Sustainable Agriculture: Conceptual Challenges and Opportunities—A Systematic Literature Review. *Sustainability* 17(5), 10.3390. <https://doi.org/10.3390/su17051805>
- Thapa, A. et al. (2026) “Social-ecological outcomes of agroecological transitions: A case study from natural farming systems in central India,” *PLOS Sustainability and Transformation*, 5(1), p. e0000212. Available at: <https://doi.org/10.1371/journal.pstr.0000212>.
- The Royal Botanic Gardens Kew, 2022. *Water and Plants: Understanding the Relationship*. Tersedia di: <https://www.kew.org/science/how-we>

work/water-and-plants-understanding-relationship [Diakses 24 Juni 2026].

- Tiefenbacher, A. et al. (2021) ‘Optimizing Carbon Sequestration in Croplands: A Synthesis’, *Agronomy*, 11(5), p. 882. Available at: <https://doi.org/10.3390/agronomy11050882>.
- Tilman, D., Reich, P.B. and Isbell, F. (2012) “Biodiversity impacts ecosystem productivity as much as resources, disturbance, or herbivory,” *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 109(26), pp. 10394–10397. Available at: <https://doi.org/10.1073/pnas.1208240109>.
- Tjasjono, B. (2004). *Klimatologi*. Penerbit ITB.
- Tropenbos Indonesia, 2024. *Pathways to Progress: Opportunities for Contributing to the Adoption of Agroforestry in Indonesia to Reach Impact at Scale*. Bogor: Tropenbos Indonesia.
- Tropenbos Indonesia, 2024. *Scaling Agroforestry in Indonesia*. Bogor: Tropenbos Indonesia.
- Tscharntke, T., et al. (2005). Landscape perspectives on agricultural intensification and biodiversity—ecosystem service management. *Ecology Letters*, 8(8), 857-874.
- Ukozehasi, C., Elkelish, A. and Kullaj, E. (2024) “The $\delta^{2}\text{H}$ and $\delta^{18}\text{O}$ isotopic evidence for hydraulic redistribution by *Alnus acuminata* in an agricultural landscape,” *Discover Agriculture*, 2(1). Available at: <https://doi.org/10.1007/s44279-024-00094-3>.
- Ullah, A. et al. (2022) “Heat Stress Effects on the reproductive Physiology and Yield of Wheat,” *Journal of Agronomy and Crop Science*, 208(1), pp. 1–17. Available at: <https://doi.org/10.1111/jac.12572>.
- UNCCD (2022) *Global Land Outlook: Land Restoration for Recovery and Resilience*. Bonn: United Nations Convention to Combat Desertification.
- Ustaoğlu, E., Sisman, S., & Aydinoglu, A. C. (2021). Determining agricultural suitable land in peri-urban geography using GIS and Multi Criteria

- Decision Analysis (MCDA) techniques. *Ecological Modelling*, 455, 109610. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2021.109610>
- van Noordwijk, M., 2019. *Sustainable Development Through Trees on Farms: Agroforestry in Its Fifth Decade*. Bogor: World Agroforestry.
- Vandermeer, J.H. (1992) *The ecology of intercropping*. Cambridge university press.
- Verdouw, C., Tekinerdogan, B., Beulens, A., & Wolfert, S. (2021). Digital twins in smart farming. *Agricultural Systems*, 189, 103046. <https://doi.org/10.1016/j.agry.2020.103046>
- Vereecken, H. et al. (2022) “Soil hydrology in the Earth system,” *Nature Reviews Earth & Environment*, 3(9), pp. 573–587. Available at: <https://doi.org/10.1038/s43017-022-00324-6>.
- Vidican, R., Malinas, A., Ranta, O., Moldovan, C., Marian, O., Ghețe, A., Ghișe, C. R., Popovici, F., & Cățunescu, G. (2023). Using Remote Sensing Vegetation Indices for the Discrimination and Monitoring of Agricultural Crops: A Critical Review. *Agronomy*, 13(12), 3040. <https://doi.org/10.3390/agronomy13123040>
- Viera-Arroyo, W., Binego, L., Ryans, F., López, D., Moya, M., Vera, L., & Caicedo, C. (2025). Systematic Review of Integrating Technology for Sustainable Agricultural Transitions: Ecuador, a Country with Agroecological Potential. *Sustainability*, 17(13), 6053. <https://doi.org/10.3390/su17136053>
- Visscher, A.M., Paul, C., Pinto, R., Vangansbeke, P., Sánchez, A.C., Hasler, M., Techen, A.K., Wezel, A., Winter, S., Zikeli, S., Entling, M.H., Albrecht, M. and Batáry, P., 2023. Agroforestry enhances biological activity, diversity and soil-based ecosystem functions in temperate agriculture: a meta-analysis. *Global Change Biology*, 29, pp.2878–2893.
- Vittori Antisari, L. et al. (2021) ‘Soil Quality and Organic Matter Pools in a Temperate Climate (Northern Italy) under Different Land Uses’, *Agronomy*, 11(9), p. 1815. Available at: <https://doi.org/10.3390/agronomy11091815>.

- Vu, D.H., Stuerz, S. and Asch, F. (2020) “Nutrient Uptake and Assimilation Under Varying Day and Night Root Zone Temperatures in Lowland Rice,” *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 183(5), pp. 602–614. Available at: <https://doi.org/10.1002/jpln.201900522>.
- Wagner, J. et al. (2017) “Cold Tolerance of The Male Gametophyte During Germination and Tube Growth Depends on the Flowering Time,” *Plants*, 6(1), pp. 1228–1237. Available at: <https://doi.org/10.3390/plants6010002>.
- Wahyunto dan Dariah, A. 2014. Degradasi Lahan dan Upaya Konservasi pada Lahan Kering. Bogor: Balai Besar Litbang Sumberdaya Lahan Pertanian.
- Wambrauw, H.L., Wambrauw, M.S.F., Sineri, A.S., Fatem, S.M., Rahawarin, Y.Y., Iyai, D.A. and Sillanpää, M., 2024. Biodiversity conservation, food security, and carbon storage in local agroforestry practices in the Papua Region, Indonesia. *Biodiversitas*, 25(11), pp.4331–4344.
- Wang, B., Huang, X., Chen, J., Fu, L., Chen, Y., Gao, W., & Sui, P. (2024) ‘Intercropping With Green Manure Regulates Microbial Community Structure and Improves Tea Quality by Changing Soil Available Nutrients Under Organic Management’, *Land Degradation & Development*, 36(4), pp. 1384–1397. doi: <https://doi.org/10.1002/ldr.5437>.
- Wang, D., Cao, W., Zhang, F., Li, Z.-R., Xu, S., & Wu, X. (2022). A Review of Deep Learning in Multiscale Agricultural Sensing. *Remote. Sens.*, 14, 559. <https://doi.org/10.3390/rs14030559>
- Wang, G., Huang, W., Zhou, G., Mayes, M., & Zhou, J. (2020). Modeling the processes of soil moisture in regulating microbial and carbon-nitrogen cycling. *Journal of Hydrology*, 585, 124777. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.124777>
- Wang, H., Zhong, L., Liu, J., Liu, X., Xue, W., Liu, X., Yang, H., Shen, Y., Li, J., & Sun, Z. (2024) ‘Systematic Analysis of the Effects of Different Green Manure Crop Rotations on Soil Nutrient Dynamics and Bacterial Community Structure in the Taihu Lake Region, Jiangsu’, *Agriculture*, 14(7), p. 1017. doi: <https://doi.org/10.3390/agriculture14071017>.

- Wang, Q., Liu, Y., Zhao, X. and Zhang, Z., (2025) “Molecular regulation of nutrient transporter genes under nutrient deficiency stress in plants” *Frontiers in Plant Science*, 16, p.1523847.
- Wang, Y. et al. (2024) “Research Progress on The Physiological Response and Molecular Mechanism of Cold Response in Plants,” *Frontiers in Plant Science*. *Frontiers Media SA*. Available at: <https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1334913>.
- Warman, G.R. and Kristiana, R. (2018) ‘Mengkaji sistem tanam tumpangsari tanaman semusim’, in *Proceeding Biology Education Conference: Biology, Science, Enviromental, and Learning*, pp. 791–794.
- Weih, M., Mínguez, M.I. and Tavoletti, S. (2022) ‘Intercropping systems for sustainable agriculture’, *Agriculture*. MDPI, p. 291.
- Wen, Z., Li, H., Shen, J. and Rengel, Z., (2024) “Root exudates mediate nutrient acquisition and rhizosphere interactions under nutrient limitation” *Plant and Soil*, 501, pp.1–22.
- Wessels, K.J., et al. (2012) 'Can we detect terrestrial vegetation feedback to climate change with satellite data?', *Global Change Biology*, 18(6), pp. 1489–1501.
- Wezel, A. et al. (2009) “Agroecology as a science, a movement and a practice. A review,” *Agronomy for Sustainable Development*, 29(4), pp. 503–515. Available at: <https://doi.org/10.1051/agro/2009004>.
- Wezel, A., Bellon, S., Doré, T., Francis, C., Vallod, D. and David, C., 2009. *Agroecology as a science, a movement and a practice. A review. Agronomy for Sustainable Development*, 29(4), pp.503–515.
- Wezel, A., Herren, B., Kerr, R. B., et al. (2020). *Agroecological principles and elements and their implications for transitioning to sustainable food systems. A review. Agronomy for Sustainable Development*, 40, 40.
- Widiawati, Y. (2025) “Pengaruh Sistem Pertanian Organik terhadap Kesehatan Tanah dan Keanekaragaman Hayati di Lahan Hortikultura Dataran Tinggi Dieng,” *Jurnal Penelitian Multidisiplin*, 3(6), pp. 194–200. Available at: <https://doi.org/https://doi.org/10.55681/armada.v2i6.1668>.

- Winter, K., Garcia, M. and Virgo, A. (2025) "Heat-induced F0-fluorescence Rise is not an Indicator of Severe Tissue Necrosis in Thermotolerance Assays of Young and Mature Leaves of a Tropical Tree Species, *Calophyllum Inophyllum*," *Photosynthetica*, 63(1), pp. 46–50. Available at: <https://doi.org/10.32615/ps.2025.004>.
- Wiryono. (2013) *Pengantar Ilmu Lingkungan*. Pertelon Media, Bengkulu.
- Wittman, H., James, D., & Mehrabi, Z. (2020). Advancing food sovereignty through farmer-driven digital agroecology, 47, 3. <https://doi.org/10.7764/ijanr.v47i3.2299>
- WMO (World Meteorological Organization). (2018). *Guide to Agricultural Meteorological Practices*. Geneva.
- Xing, Y. et al. (2023) 'Two pathways drive enhanced nitrogen acquisition via a complementarity effect in long-term intercropping', *Field Crops Research*, 293, p. 108854.
- Xu, Z. et al. (2020) 'Intercropping maize and soybean increases efficiency of land and fertilizer nitrogen use; A meta-analysis', *Field Crops Research*, 246, p. 107661.
- Xun, W., Liu, Y., Ma, A., Yan, H., Miao, Y., Shao, J., Zhang, N., Xu, Z., Shen, Q., Zhang, R., (2024) "Dissection of rhizosphere microbiome and exploiting strategies for sustainable agriculture" *New Phytol.* 242, 2401–2410.
- Yadollahi, P. et al. (2014) 'Effect of intercropping on weed control in sustainable agriculture.'
- Yang, X., Wang, G., Chen, Y., Sui, P., Pacenka, S., Steenhuis, T.S. and Siddique, K.H., 2022. Sustainable water management strategy to improve water use efficiency and reduce groundwater depletion in intensive cropping systems. *Agricultural Water Management*, 262, p.107416.
- Yohana, C. et al. (2022) 'Keuntungan pola tanam jagung tumpangsari dengan kacang tanah di Kabupaten Sumba Timur, Provinsi Nusa Tenggara Timur', *Jintan: Jurnal Ilmiah Nasional Pertanian*, 2(1), pp. 41–51.

- Yu, J., Jiang, M. and Guo, C. (2019) “Crop Pollen Development Under Drought: From the Phenotype to The Mechanism,” *International Journal of Molecular Sciences*. MDPI AG. Available at: <https://doi.org/10.3390/ijms20071550>.
- Yu, L., Ahrens, B., Wutzler, T., Schrumpf, M., & Zaehle, S. (2020). Jena Soil Model (JSM v1.0; revision 1934): a microbial soil organic carbon model integrated with nitrogen and phosphorus processes. *Geoscientific Model Development*, 13(2): 783–803. <https://doi.org/10.5194/gmd-13-783-2020>
- Yu, Y., Cheng, Q., Wang, F., Zhu, Y., Shang, X., Jones, A., He, H., & Song, Y. (2023). Crop/Plant Modeling Supports Plant Breeding: I. Optimization of Environmental Factors in Accelerating Crop Growth and Development for Speed Breeding. *Plant Phenomics*, 5. <https://doi.org/10.34133/plantphenomics.0099>
- Yulianto, K. (2016) *Science and Tecnology Agroekologi : Model Pertanian Berkelanjutan Masa Depan*, Desember.
- Zalwa, C.A. et al. (2002) ‘Analisis Penetapan Tekstur Tanah Dengan Metode Hidrometer Pada Tanah Di Kecamatan Galang Analysis Of Soil Texture Determination Using The Hydrometer Method On Soil In Galang Distict’, *Pucuk : Jurnal Ilmu Tanaman*, 5(1), pp. 1–4.
- Zappa, L. et al. (2024) “Benefits and pitfalls of irrigation timing and water amounts derived from satellite soil moisture,” *Agricultural Water Management*, 295(February), p. 108773. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2024.108773>.
- Zebua, H.P. et al. (2026) ‘Analisis Pengaruh Tekstur Dan Stuktur Tanah Terhadap Kemampuan Menyimpan Air Dilahan Pertanian Datar Rendah’, *Jigrona : Jurnal Ilmu Agroteknologi Indonesia*, 02(01), pp. 39–45.
- Zega, N.D. (2024) ‘Pengaruh Tekstur Dan Struktur Tanah Terhadap Distribusi Air Dan Udara Di Profil Tanah’, *Penarik : Jurnal Ilmu Pertanian dan Perikanan*, 01(02), pp. 1–6.

- Zhan, X. et al. (2025) ‘Response of soil microbial community diversity and structure to soybean-based intercropping and its effects on yield’, *Frontiers in Microbiology*, 16. Available at: <https://doi.org/10.3389/fmicb.2025.1658783>.
- Zhang, H. et al. (2020) ‘Influence of Tillage, Straw-Returning and Mineral Fertilization on the Stability and Associated Organic Content of Soil Aggregates in the North China Plain’, *Agronomy*, 10(7), p. 951. Available at: <https://doi.org/10.3390/agronomy10070951>.
- Zhang, H. et al. (2023) “Cover cropping impacts on soil water and carbon in dryland cropping system,” *PLoS ONE*, 18(6 June), pp. 1–29. Available at: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0286748>.
- Zhang, H., Zhu, J., Gong, Z. and Zhu, J.K., 2022. Abiotic stress responses in plants. *Nature Reviews Genetics*, 23(2), pp.104-119.
- Zhang, L., Xu, Y., Wang, S. and Li, M., (2024) “Osmotic adjustment mechanisms in plant roots under drought stress” *Environmental and Experimental Botany*, 223, p.105745.
- Zhang, P. et al. (2023) “Hydrological characteristics of different organic materials mulches,” *Scientific Reports*, 13(1), pp. 1–9. Available at: <https://doi.org/10.1038/s41598-023-28124-y>.
- Zhang, Y. et al. (2023) “Plants’ Response to Abiotic Stress: Mechanisms and Strategies,” *International Journal of Molecular Sciences*. Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). Available at: <https://doi.org/10.3390/ijms241310915>.
- Zhang, Y., He, Y. and Song, J. (2023) “Effects of climate change and land use on runoff in the Huangfuchuan Basin, China,” *Journal of Hydrology*, 626, p. 130195. Available at: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2023.130195>.
- Zhao, C. et al. (2017) “Temperature increase reduces global yields of major crops in four independent estimates,” *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 114(35), pp. 9326–9331. Available at: <https://doi.org/10.1073/pnas.1701762114>.

Zulfikar, F., Syahputra, A., dan Kurniawan, H. 2023. "Implementation of Soil and Water Conservation in Indonesia and Its Impacts on Biodiversity, Hydrology, Soil Erosion and Microclimate." *Applied Sciences*, 13(13): 7648.

BIODATA PENULIS



Sofia Wantasen

Lahir di Tombatu, Sulawesi Utara, 25 September 1963. Kuliah di Universitas Sam Ratulangi dengan Ijazah Insinyur (1987), Magister Sains Ilmu Lingkungan (1995) di Universitas Gadjah Mada (UGM) Yogyakarta, dan Doktor Ilmu Lingkungan (2012) di UGM Yogyakarta.

Sertifikasi Tim Penyusun AMDAL KTPA (No. Reg.LHK. 642.00133 2017). Koordinator Program Studi (Korprodi) Agroteknologi (2022-2026). Dosen Tetap Fakultas Pertanian Universitas Sam Ratulangi Manado Program Studi Agroteknologi.

Dosen Pengajar Mata Kuliah; Ekologi Pertanian, Pengantar AMDAL, Pencemaran Lingkungan, Klimatologi, Agrohidrologi.

Publikasi:

The impact of nitrogen fertilizer on the aquatic environment in the UpperTondano watershed, North Sulawesi Province, Journal of Physics: Conference Series Vol. 1434 (2020); Climate Correlation with Nutmeg (*Myristica fragrans* Houtt.) Crop Productivity in North Minahasa Regency - International Conference on Sustainable Agriculture and Biosystem (ICSAB) 2022; Mining Waste Management for Enviromental Quality Improvement with Moringa Seed Powder, Internasional Conference on Agrifood, feed, and fuel (4thICTAFF) (2024); Spatial Impact of Nitrogen Fertilizer Residue on the Biotic Environment of Rice Field Irrigation Channels (JPJII, Vol 14 (2) Scopus Q3, 2025); Moringa (*Moringa oleifera* L) Seed Powder as a Bioadsorbent for Heavy Metals in Community Gold Mine Effluent : Implication for Agricultural Water Use Jurnal Agroteknologi Terapan JAT Universitas Sam Ratulangi Journal ISSN :-EISSN :2797-0647 Vol. 6 No. 2 Juli-Desember 2025 : 454-465, SINTA 3; Monitoring of Aquatic Insects as Bioindicators of River Pollution; Jurnal Agroteknologi Terapan JAT Universitas Sam Ratulangi

Journal ISSN :-EISSN : 2797-0647 Vol 7 No.1 Januari- Juni 2026 ; 1-8 SINTA 3.

Beberapa Buku yang yang sudah dipublikasikan, antara lain:

Buku Ajar Analisis Mengenai Dampak Lingkungan ISBN: 978-623-177-097-4 (2023); Buku Ajar Agrohidrologi ISBN: 9786231771612 (2024); Buku: Kualitas Air Permukaan Daerah Aliran Sungai Tondano QRCBN 62-4902-7482-276 (2024); Buku Ajar Pencemaran Lingkungan ISBN: 978-623-177-295-4 (2025); Buku Referensi Dasar-dasar Ilmu Pertanian Terpadu ISBN 978-634-7292-28-5 (2025).



Loso Judijanto

Adalah peneliti yang bekerja pada lembaga penelitian IPOSS Jakarta. Penulis dilahirkan di Magetan pada tanggal 19 Januari 1971. Penulis menamatkan pendidikan Master of Statistics di The University of New South Wales, Sydney, Australia pada tahun 1998 dengan dukungan beasiswa ADCOS (Australian Development Cooperation Scholarship) dari Australia.

Sebelumnya penulis menyelesaikan Magister Manajemen di Universitas Indonesia pada tahun 1995 dengan dukungan beasiswa dari Bank Internasional Indonesia. Pendidikan sarjana diselesaikan di Institut Pertanian Bogor pada Jurusan Statistika – FMIPA pada tahun 1993 dengan dukungan beasiswa dari KPS-Pertamina. Penulis menamatkan pendidikan dasar hingga SMA di Maospati. Sepanjang kariernya, penulis pernah ditugaskan untuk menjadi anggota Dewan Komisaris dan/atau Komite Audit pada beberapa perusahaan/lembaga yang bergerak di berbagai sektor, antara lain pengelolaan pelabuhan laut, telekomunikasi seluler, perbankan, pengembangan infrastruktur, sekuritas, pembiayaan infrastruktur, perkebunan, pertambangan batu bara, properti dan rekreasi, dan pengelolaan dana perkebunan. Penulis memiliki minat dalam riset di bidang kebijakan publik, ekonomi, keuangan, human capital, dan corporate governance. Penulis dapat dihubungi melalui e-mail di losojudijantobumn@gmail.com.



Tangguh Prakoso

Lahir di Surakarta, 28 September 1992. Telah menyelesaikan studi S1 pada program Agroteknologi di Universitas Sebelas Maret Surakarta (UNS) pada tahun 2015, serta Gelar Master of Science di Universitas Gadjah Mada

(UGM) tahun 2018. Semasa kuliah bergerak sebagai aktivis ada organisasi Kelompok Studi Ilmiah (KSI) Fakultas Pertanian UNS sebagai ketua umum periode 2014 serta staff keilmiahan pada Himpunan Mahasiswa Agroteknologi (FORMAT) pada tahun 2013. Mulai mengajar di Lembaga Pengembangan Profesi (LPP) Yogyakarta pada tahun 2019. Serta tahun 2020 – sekarang mengajar di Universitas Muria Kudus pada Fakultas Pertanian. Mengajar mata kuliah statistika, Ekonomi Pertanian, Agroforestri, Ilmu Tanah, Agroklimatologi, Teknologi konservasi sumberdaya lahan, serta Pertanian Berkelanjutan. Buku ini merupakan salah satu karya laki-laki berdarah Jawa ini. Ia bisa dihubungi melalui email: tangguh.prakoso@umk.ac.id



Nurlaelah

Seorang akademisi dan praktisi pendidikan yang mendedikasikan keahliannya pada ilmu kimia murni dan inovasi teknologi pembelajaran. Menuntaskan pendidikan sarjana di Universitas Negeri Makassar, kemudian memperdalam kepakarannya melalui studi magister di Universitas Negeri Yogyakarta, fokus pada pengembangan media pembelajaran kimia berbasis teknologi mutakhir.

Sebagai seorang pendidik dengan rekam jejak yang kuat, pengalamannya yang mendalam di tingkat sekolah menengah hingga perannya saat ini di lingkungan pendidikan tinggi. Nurlaelah dikenal karena kemampuannya menyederhanakan konsep kimia yang kompleks menjadi narasi yang mudah dipahami, ia tidak hanya aktif dalam pengembangan kurikulum dan manajemen laboratorium, tetapi juga terus mengasah aspek humanis dalam mengajar melalui berbagai pelatihan, diantaranya Emotional Spiritual Quotient (ESQ) dan penguasaan Teknologi Informasi dan Komunikasi (TIK).

Ketertarikannya yang mendalam pada pendekatan STEAM (Science, Technology, Engineering, Arts, and Mathematics) tercermin dalam berbagai karya publikasi ilmiahnya, terutama dalam pengembangan media berbasis Android. Dalam buku ini, ia membawa perspektif unik tentang bagaimana prinsip-prinsip kimia mulai dari dinamika nutrisi hingga reaksi biokimia di dalam tanah dapat dikelola secara kreatif untuk menciptakan solusi agroekologi yang berkelanjutan.



Heny Alpandari

Merupakan Dosen Fakultas Pertanian Universitas Muria Kudus. Menyelesaikan studi S1 di Universitas Muhammadiyah Yogyakarta serta Master of Science Universitas Gadjah Mada. Mulai mengajar Tahun 2019 di Politeknik Lembaga Pengembangan Profesi (LPP) Yogyakarta. Tahun 2020 hingga saat ini mengajar di Universitas Muria Kudus. Beberapa buku yang sudah ditulis diantaranya:

Manajemen Strategi Agribisnis, Pengantar Kewirausahaan (Pentingnya Kewirausahaan dalam Ekonomi Modern), Implementasi Teknologi Budidaya Perikanan, Pengantar Agribisnis: konsep, strategi, dan tantangan dalam agroindustri, Pertanian Budidaya dan Tanaman, Pemahaman Dasar Tentang Lingkungan: Mengenal Sistem Ekosistem, Pengantar Ilmu Pertanian dan Hortikultura Kajian Komprehensif dari Konsep hingga Pemasaran, Pengantar Ilmu Lingkungan. Buku ini merupakan salah satu karya yang ia tulis dan Inshaa Allah akan disusul dengan buku-buku berikutnya. Pokok bahasan buku yang ditulis semata-mata untuk berbagi ilmu pengetahuan. Kontak person dan email aktif: heny.alpandari@umk.ac.id



Jeanne M. Paulus

Adalah Guru Besar Bidang Ilmu Pertanian dan Perkebunan di Fakultas Pertanian Universitas Sam Ratulangi. Penulis aktif melakukan riset tentang kajian budidaya organik tanaman pangan dan hortikultura dan sering menjadi narasumber dalam berbagai kegiatan pengabdian masyarakat tentang pelatihan pemanfaatan limbah organik dalam budidaya tanaman. Buku yang sudah ditulis oleh penulis, yaitu: Teknologi Produksi Padi Sawah Berbasis Organik, Teknik Budidaya

Sayuran Hidroponik, Metabolisme Tanaman, Fisiologi Tumbuhan, Biokimia Tanaman, Teknik Budidaya Ubi-Ubian, Teknologi Hidroponik dan Aeroponik, Peranan Elisitor Biosaka untuk Meningkatkan Produktivitas Padi. Penulis aktif dalam organisasi profesi, yaitu sebagai Dewan Pakar pada Perhimpunan Agonomi Indonesia (PERAGI) Komda Sulawesi Utara dan sebagai Dewan Penasihat Perhimpunan Hortikultura Indonesia (PERHORTI) Komda Sulawesi Utara.



Try Koryati

Bertugas sebagai Dosen di LLDIKTI Wilayah I Sumatera Utara, mulai dari tahun 1994 sampai saat ini dan dpk pada Fakultas Pertanian Universita Amir Hamzah Medan. Try Koryati merupakan lulusan Prodi Agronomi Universitas Syiah Kuala Banda Aceh tahun 1987 (S1), Prodi Agronomi pada tahun 1994 (S2) dan Bidang Ilmu Pertanian pada tahun 2016 (S3) Universitas Sumatera Utara. Mendapat gelar Profesor pada tanggal 1 Juni 2023. Penelitian-penelitian yang telah dilaksanakan umumnya berkaitan dengan

fisiologi dan tanaman perkebunan, khususnya tanaman karet. Hasil penelitian penulis telah di publikasi pada jurnal nasional akreditasi maupun jurnal internasional bereputasi. Beberapa Buku Referensi Ilmiah hasil kolaborasi yang ditulis dan telah diterbitkan antara lain: Fisiologi Tumbuhan, Belajar dari Covid-19 Prespektif Teknologi dan Pertanian, Dasar-Dasar Kewirausahaan untuk Perguruan Tinggi dan Dunia Bisnis, Teknologi dan Produksi Benih, Pemuliaan Tanaman dan Tanaman Semusim dan Tahunan, Teknologi dan Manajemen Perkebunan, Dasar-Dasar Agronomi, Diversifikasi Pangan Lokal serta Sistem Pertanian Konservasi



Adeleyda M. W. Lumingkewas

Lahir di Langowan Sulawesi Utara, 20 Agustus 1972. Penulis menyelesaikan program pendidikan sarjana di Fakultas Pertanian Universitas Sam Ratulangi (1995), Selanjutnya mengikuti program pendidikan Pascasarjana di program Pascasarjana Unsrat pada program studi Agronomi dan lulus pada tahun 2008. Penulis melanjutkan studi Doktorat di sekolah

Pascasarjana Institut Pertanian Bogor program studi Klimatologi Terapan dengan beasiswa BPPS dan lulus memperoleh gelar Doktorat pada tahun 2015. Penulis merupakan dosen tetap pada program studi Agroteknologi Fakultas Pertanian Universitas Sam Ratulangi dan diangkat dalam jabatan Lektor pada tahun 2023. Beberapa buku yang sudah diterbitkan antara lain: Soba Pangan Alternatif dan Fungsional (2023) ISBN 978-623-459-861-2, serta Ekofisiologi (2024) ISBN 978-623-8410-46-0 juga bersama Tim Buku Agrohidrologi (2024) ISBN 978-623-177-161-2. Keprofesian, sebagai Ketua 1 Pengurus Perhimpunan Meteorologi Pertanian Indonesia (PERHIMPI) Cabang Sulawesi Utara, Pengurus Komisariat Daerah Sulawesi Utara Perhimpunan Agronomi Indonesia (PERAGI) dan Anggota Perkumpulan Agroteknologi/Agroekoteknologi Indonesia (PAGI) serta anggota Perhimpunan Hortikultura Indonesia (PERHORTI).



Esta Rendra RS

Merupakan staf pengajar di Jurusan Pendidikan Geografi Fakultas Keguruan dan Ilmu Pendidikan Universitas Siliwangi. Penulis mengampu beberapa mata kuliah diantaranya Mata Kuliah Ekologi dan Lingkungan, Meteorologi dan klimatologi, Biogeografi, serta Pendidikan Kependudukan dan Lingkungan Hidup (PKLH). Penulis menyelesaikan pendidikan Magister di jurusan Pendidikan

Kependudukan dan Lingkungan Hidup di Universitas Siliwangi pada tahun 2012.

Minat kajian dan penelitian penulis berfokus pada bidang kajian Ekologi dan Lingkungan, dengan menekankan pada pengelolaan lingkungan berkelanjutan. Fokus tersebut mencakup integrasi aspek ekologi, kependudukan, dan pendidikan dalam mendukung pembangunan yang berwawasan lingkungan. Dalam aktivitas akademiknya, penulis aktif mengembangkan bahan ajar dan karya tulis ilmiah yang mendorong pemahaman kritis terhadap isu-isu lingkungan hidup. Melalui pengajaran dan penelitian, penulis berkomitmen untuk berkontribusi dalam penguatan kapasitas akademik dan praktik pengelolaan lingkungan yang berkelanjutan.



Fikria Minsoeriahadi

Merupakan lulusan Program Studi Kimia, Universitas Islam Negeri Syarif Hidayatullah Jakarta yang memiliki ketertarikan pada bidang kimia, lingkungan, analisis ilmiah, dan penerapan konsep sains berkelanjutan. Penulis memiliki pengalaman dalam kegiatan penelitian, analisis laboratorium, serta pengembangan program pelatihan berbasis sains. Melalui karya

ini, penulis berusaha menyampaikan pemahaman mengenai hubungan antara ilmu lingkungan, proses alam, dan penerapan konsep keberlanjutan dalam kehidupan sehari-hari.



Steviani Yolanda

Merupakan mahasiswa Program Studi Agroekoteknologi, Minat Budidaya Pertanian, Fakultas Pertanian, Universitas Brawijaya, dengan fokus pada fisiologi tanaman dan pemuliaan tanaman. Ia memiliki minat pada bidang fisiologi tanaman, bioteknologi dan studi molekuler, serta inovasi pertanian berbasis keberlanjutan.

Selama masa perkuliahan, ia aktif dalam berbagai kegiatan akademik dan organisasi, di antaranya dalam IAAS (International Association of Students in Agricultural and Related Sciences) LC UB dan PRISMA (Pusat Riset dan Kajian Ilmiah Mahasiswa), serta terlibat dalam berbagai kepanitiaan dan pengembangan kapasitas mahasiswa.

Ia telah meraih lebih dari 50 penghargaan dalam ajang ilmiah tingkat nasional dan internasional, termasuk Juara 1 Mahasiswa Berprestasi Fakultas Pertanian Universitas Brawijaya dan Juara 4 Mahasiswa Berprestasi tingkat universitas, serta merupakan penerima Beasiswa Unggulan dari Kementerian Pendidikan, Kebudayaan, Riset, dan Teknologi Republik Indonesia.

Dalam bidang penelitian, ia memperoleh pendanaan Program Kreativitas Mahasiswa (PKM) pada skema Riset Eksakta dan Gagasan Futuristik Tertulis. Selain itu, ia aktif sebagai pembimbing PKM mahasiswa baru, mentor beasiswa dan lomba, asisten praktikum, serta presenter dalam berbagai konferensi ilmiah, juga sebagai moderator dan pembicara dalam pelatihan dan seminar. Ia juga memiliki pengalaman kolaborasi internasional melalui kegiatan cultural exchange dengan mahasiswa dari Malaysia dan Filipina, yang memperluas perspektif global dan jejaring akademik. Keterlibatan tersebut mencerminkan komitmen dalam mendorong pengembangan kapasitas akademik mahasiswa serta memperluas dampak keilmuan.



Rizki Diah Afritanti

Merupakan akademisi di bidang pertanian dengan latar belakang keilmuan Pertanian berkelanjutan. Pendidikan tinggi jenjang sarjana di tempuh di Fakultas Pertanian, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta. Setelahnya penulis melanjutkan pendidikan pascasarjana di Fakultas Pertanian, Universitas Brawijaya, Malang. Dengan latar belakang yang kuat dan berkesinambungan di bidang pertanian, penulis memiliki kompetensi akademik, yang mendukung pengembangan riset, pendidikan serta penerepan ilmu pertanian.



Lamria Sidauruk

Lahir di Pematang Siantar pada tanggal 14 Mei 1968. Menyelesaikan pendidikan Sarjana Strata 1 pada tahun 1991 dari Program Studi Hama dan Penyakit Tanaman Universitas Sumatera Utara. Selanjutnya lulus Pendidikan Magister Pertanian pada Tahun 1999 dari Universitas Sumatera Utara dan dilanjutkan dengan Pendidikan Doktor Ilmu Pertanian di Universitas yang sama dan lulus pada Tahun 2016. Sejak Bulan Oktober 2025

memperoleh gelar Profesor Bidang Ilmu Perlindungan Tanaman, pengelolaan Hama dan penyakit Tanaman. Penulis merupakan Dosen LLDIKTI Wilayah I Sumatera Utara yang dipekerjakan di Fakultas Pertanian Universitas Methodist Indonesia Medan dengan matakuliah Dasar Perlindungan Tanaman, Ilmu Hama dan penyakit Tanaman, Metodologi Penelitian serta Pestisida dan Aplikasinya. Aktif sebagai peneliti dan beberapa kali memperoleh dana hibah penelitian dan pengabdian masyarakat dari Kemenristek DIKTI. Hasil penelitian dan pengabdian masyarakat dipublikasikan pada jurnal terindeks Scopus maupun Sinta. Saat ini menjadi anggota asosiasi profesi Perhimpunan Agronomi Indonesia komda Sumatera (PERAGI) Utara, Asosiasi Perguruan Tinggi Swasta Ilmu Pertanian Indonesia (APTSIPI) dan Perhimpunan Hortikultura Indonesia Komda Sumatera Utara (PERHORTI).



Tazkiyatul Syahidah

Lahir di Madiun pada tanggal 26 Mei 1991. Penulis menyelesaikan studi S1 Budidaya Hutan Universitas Gadjah Mada dan mengambil gelar Magister (S2) sekaligus Doktor (S3) pada program studi Entomologi di Institut Pertanian Bogor. Penulis saat ini merupakan Dosen di Program Studi Kehutanan, Fakultas Kehutanan, Institut Pertanian (Intan) Yogyakarta. Penulis mengampu mata kuliah Hama dan Penyakit Hutan, Perlindungan Tanaman Hutan, dan Agroforestri. Penulis saat ini menjabat sebagai Kepala Program Studi di Fakultas Kehutanan, Institut Pertanian (Intan) Yogyakarta. Penulis juga menulis dengan buku dengan judul Ilmu Dasar Pertanian.



Retna Astuti Kuswardani

Adalah Dosen Senior dan Peneliti Utama pada Program Studi Doktor Ilmu Pertanian (Agroteknologi) di Universitas Medan Area. Penulis menyelesaikan pendidikan program S1 s/d S3 di Universitas Gadjah Mada dalam bidang Proteksi Tanaman. Program Doktorat diselesaikan pada tahun 2006 dengan Predikat Cumlaude. Kemudian pada tahun 2009 memperoleh gelar Profesor dalam bidang Perlindungan Tanam

Matakuliah yang diampu antara lain pengelolaan hama berkelanjutan, Pestisida dan Teknik aplikasi, serta Falsafah dan Metodologi. Penulis bertugas sebagai dosen yang membimbing mahasiswa S1, S2 maupun S3 di Fakultas Pertanian Universitas Medan Area dari tahun 1987 sampai dengan sekarang. Penulis juga aktif melakukan penelitian dan PkM dengan sumber dana berasal dari kerjasama luar Negeri, Kemendiktisaintek, dan DIYA UMA. Bidang fokus penelitiannya antara lain ekologi serangga hama, pengendalian hayati hama, biopestisida dan rekayasa ekologi. Penulis aktif dalam perhimpunan profesi antara lain Perhimpunan Entomologi Indonesia (PEI), Indonesia Planters Society, PERWAKU, ADRI dan ASWGI. Penulis selain sebagai reviewer pada berbagai jurnal nasional terakreditasi. juga menjadi tenaga ahli bidang penelitian dan PkM LLDIKTI Wil I.



Okti Purwaningsih

Lahir di Kudus. Pendidikan terakhir S3 Ilmu Pertanian UGM. Sejak tahun 1997 menjadi dosen di Fakultas Pertanian Universitas PGRI Yogyakarta. Mengampu mata kuliah Fisiologi Tanaman, Kesuburan Tanah, dan Dasar-dasar Teknologi Benih.

Beberapa karya ilmiah diterbitkan dalam jurnal nasional terakreditasi dan jurnal internasional bereputasi. Fokus penelitian tentang sustainable agriculture, pemanfaatan bahan organik untuk kesuburan tanah dan pertumbuhan tanaman.



Ida Bagus Putu Bhayunagiri

Adalah seorang akademisi dan pakar di bidang pertanian yang memiliki dedikasi mendalam terhadap isu Agroekologi dan Manajemen Sumberdaya Lahan. Saat ini, beliau aktif menjabat sebagai dosen di Fakultas Pertanian, Universitas Udayana, di mana beliau mengintegrasikan prinsip-prinsip sains ekologi

dengan tantangan praktis yang dihadapi sektor pertanian di Indonesia. Menyelesaikan pendidikan magister dengan fokus pada manajemen

sumber daya pertanian, beliau konsisten menempatkan keberlanjutan lingkungan sebagai inti dari setiap kajiannya. Kepakaran beliau mencakup analisis dampak perubahan iklim terhadap produktivitas lahan serta pengembangan strategi Pertanian Tangguh Iklim (PTI) yang relevan dengan karakteristik biofisik dan sosial-budaya lokal.



Andre Setiyawan

Penulis dilahirkan di Palembang, Sumatera Selatan, pada 13 Maret 1998. Ketertarikan penulis terhadap bidang pertanian mulai tumbuh sejak tahun 2015, ketika penulis menyadari bahwa pertanian memiliki peran penting dalam mendukung ketahanan pangan, kelestarian lingkungan, dan kesejahteraan masyarakat. Minat tersebut kemudian mendorong penulis untuk menempuh pendidikan tinggi bidang pertanian.

Penulis menyelesaikan pendidikan Sarjana pada Program Studi Agroteknologi, Universitas Sarjanawiyata Tamansiswa, pada tahun 2019. Selanjutnya, penulis melanjutkan studi Magister pada Program Studi Magister Agronomi, Universitas Gadjah Mada, dan berhasil menyelesaikannya pada tahun 2023. Saat ini, penulis bekerja sebagai dosen tetap pada Program Studi S1 Agroteknologi, Universitas Tamansiswa Palembang. Penulis aktif dalam kegiatan pendidikan, penelitian, pengabdian kepada masyarakat, serta organisasi akademik dan profesi. Selain itu, penulis juga aktif menulis artikel ilmiah, jurnal, dan book chapter sebagai kontribusi nyata dalam pengembangan ilmu pertanian, khususnya bidang agroteknologi dan agronomi. Ke depan, penulis berkomitmen terus mengembangkan karya ilmiah yang bermanfaat bagi mahasiswa, petani, dan masyarakat luas.

Email Penulis: andresetiyawan09@gmail.com



Halis Agussaini

Adalah akademisi Fakultas Teknik Universitas Syiah Kuala (USK) sekaligus praktisi senior di bidang arsitektur, perancangan kota, serta perencanaan wilayah dan kota. Menjadi dosen sejak tahun 1993, beliau mengajar pada jenjang S1 dan S2 pada program studi Teknik Sipil, Arsitektur, serta Perencanaan Wilayah dan Kota, dengan fokus pada mata kuliah perencanaan kota dan wilayah, guna lahan, lingkungan, manajemen

proyek, serta studio perencanaan.

Beliau merupakan alumni S1 Teknik Arsitektur dan S2 Perancangan Kota dari Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) Surabaya, serta meraih gelar Doktor (S3) Perencanaan Wilayah dari Universitas Sumatera Utara (USU) dengan fokus mendalam pada penataan ruang pesisir berbasis mitigasi bencana. Kompetensi profesionalnya diperkuat dengan gelar Insinyur Profesional Madya (IPM), gelar Arsitek (Ar.) dari Dewan Arsitek Indonesia, serta Sertifikat Kompetensi Ahli K3 Muda.

Beliau memiliki pengalaman yang luas sebagai praktisi dan pernah menjadi tenaga ahli dalam proyek strategis seperti penyusunan RTBL, masterplan kota hijau, dan RTRW kabupaten/kota. Beliau juga terlibat aktif dalam rekonstruksi pascabencana gempa dan tsunami Aceh berkolaborasi dengan BRR NAD-Nias, UN-Habitat, UNDP, dan USAID. Kapabilitas ini didukung oleh berbagai sertifikasi diklat, mulai dari manajemen proyek, hukum kontrak konstruksi, penyusunan RDTR, AMDAL, hingga pengkaji teknis SLF.



Sundahri

Dosen Program Studi Agronomi

Fakultas Pertanian

Universitas Jember

Penulis lahir di Pamekasan dan menjadi dosen Program Studi Agronomi, Fakultas Pertanian, Universitas Jember melalui Ikatan Dinas dari Departemen Pendidikan dan Kebudayaan Republik Indonesia. Penulis menyelesaikan pendidikan di Program Studi Agronomi, Fakultas Pertanian, Universitas Jember; Program Postgraduate Diploma in Agricultural Science, La Trobe University, Melbourne; dan Program Magister Agronomi, Program Pascasarjana Universitas Jember.

Sejak 2025, Penulis sebagai ketua Bidang Komunikasi dan Publikasi Perhimpunan Agronomi Indonesia (PERAGI) Komisariat Jawa Timur periode 2025-2029, aktif dalam tulis-menulis di media massa dan media sosial (Jackfruit Photography), serta menulis buku referensi yang hingga kini telah menerbitkan sebanyak 22 buah buku.

Selain sebagai editor in chief *Papuma: Journal of Community Services*, Penulis memiliki hobby fotografi dan pernah memenangkan berbagai lomba foto tingkat nasional dan internasional.

Penulis dapat dihubungi melalui e-mail: sundahri.faperta@unej.ac.id



Nindya Arini

Adalah dosen aktif di Program Studi Agroteknologi, Universitas Muria Kudus sejak tahun 2019 hingga sekarang. Menyelesaikan studi S1 dan S2 jurusan Agronomi di Universitas Gadjah Mada. Memiliki ketertarikan pada bidang ekologi tanaman yang tertuang pada beberapa jurnal yang telah dipublikasikan. Buku ini merupakan karya buku ketiga dalam karirnya

menjadi dosen. Semoga selanjutnya lahir karya-karya baru terkait bidang pertanian untuk berbagi ilmu kepada khalayak luas.

nindya.arini@umk.ac.id

INTERAKSI

Tanah–Tanaman–Iklim

dalam SISTEM AGROEKOLOGI



Buku ini berisi pembahasan yang komprehensif mengenai interaksi antara tanah, tanaman, dan iklim sebagai tiga komponen utama yang membentuk sistem agroekologi yang berkelanjutan. Materi disusun secara sistematis mulai dari konsep dasar agroekologi, karakteristik fisik, kimia, dan biologi tanah, fisiologi serta sistem perakaran tanaman, hingga pengaruh iklim, perubahan iklim, dan berbagai siklus biogeokimia yang berlangsung dalam agroekosistem. Selain itu, buku ini mengulas penerapan berbagai sistem budidaya berkelanjutan, pengelolaan kesuburan tanah, konservasi dan restorasi lahan, respons tanaman terhadap cekaman lingkungan, peran keanekaragaman hayati dan jasa ekosistem, serta pendekatan sistem dalam pengembangan agroekologi untuk mendukung ketahanan pangan dan keberlanjutan global. Dengan penyajian yang terpadu antara konsep ilmiah dan aplikasinya di lapangan, buku ini diharapkan dapat menjadi referensi yang bermanfaat bagi mahasiswa, dosen, peneliti, praktisi pertanian, serta seluruh pembaca yang ingin memperdalam pemahaman tentang pengelolaan agroekosistem yang produktif, adaptif, dan berwawasan lingkungan.

Berikut bab yang akan dibahas pada buku ini :

- Bab 1: Pengantar Agroekologi
- Bab 2: Tanah Sebagai Komponen Utama Agroekosistem
- Bab 3: Sifat Fisika Tanah dan Pengaruhnya terhadap Pertumbuhan Tanaman
- Bab 4: Sifat Kimia Tanah dan Ketersediaan Hara untuk Tanaman
- Bab 5: Biologi Tanah dan Ekologi Mikroba Tanah
- Bab 6: Fisiologi Tanaman dalam Konteks Agroekologi
- Bab 7: Sistem Perakaran Tanaman dan Interaksinya dengan Tanah
- Bab 8: Iklim dan Cuaca dalam Sistem Agroekologi
- Bab 9: Perubahan Iklim dan Dampaknya Terhadap Sistem Pertanian
- Bab 10: Siklus Air dalam Agroekosistem
- Bab 11: Siklus Karbon, Nitrogen, dan Fosfor dalam Agroekosistem
- Bab 12: Keanekaragaman Hayati dan Fungsinya dalam Agroekosistem
- Bab 13: Sistem Pertanian Tumpang Sari dan Polikultur
- Bab 14: Sistem Agroforestri: Integrasi Pohon dalam Pertanian
- Bab 15: Konsep Iklim Mikro dan Faktor-Faktor Pembentuknya
- Bab 16: Pengelolaan Kesuburan Tanah Secara Agroekologis
- Bab 17: Degradasi Lahan dan Restorasi Agroekosistem
- Bab 18: Cekaman Abiotik dan Respon Tanaman
- Bab 19: Jasa Ekosistem dalam Pertanian Berkelanjutan
- Bab 20: Pendekatan Sistem dan Pemodelan dalam Agroekologi
- Bab 21: Agroekologi untuk Ketahanan Pangan dan Keberlanjutan Global



YAYASAN LITERASI SAINS INDONESIA

☎ 0812-7551-8124
✉ penerbit@literasisains.id
🌐 www.literasisains.id
📘 Literasi Sains Indonesia
📱 @literasisains.id

ISBN 978-634-7292-85-8



9

786347

292858