AGROEKOLOGI DAN KETAHANAN PANGAN



Betzy Ayu Omega Rampean | Fara Shaliza | Loso Judijanto | Ketut Dharma Susila | Arini Al Ifah
Atika Romalasari | Nike Triwahyuningsih | Widya Kristiyanti Putri | Merry Gloria Meliala
Tazkiyatul Syahidah | Tati Budi Kusmiyarti | Arief Dwinanto | Risal Nur Rahma Syahrir
Endah Prahmawati | Izuddinsyah Siregar | Puguh Bintang Pamungkas
Steviani Yolanda | Ida Bagus Putu Bhayunagiri

AGROEKOLOGI DAN KETAHANAN PANGAN



Betzy Ayu Omega Rampean | Fara Shaliza | Loso Judijanto | Ketut Dharma Susila | Arini Al Ifah
Atika Romalasari | Nike Triwahyuningsih | Widya Kristiyanti Putri | Merry Gloria Meliala
Tazkiyatul Syahidah | Tati Budi Kusmiyarti | Arief Dwinanto | Risal Nur Rahma Syahrir
Endah Prahmawati | Izuddinsyah Siregar | Puguh Bintang Pamungkas
Steviani Yolanda | Ida Bagus Putu Bhayunagiri

AGROEKOLOGI DAN KETAHANAN PANGAN

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 eksklusi 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).

AGROEKOLOGI DAN KETAHANAN PANGAN

Betzy Ayu Omega Rampean
Fara Shaliza
Loso Judijanto
Ketut Dharma Susila
Arini Al Ifah
Atika Romalasari
Nike Triwahyuningsih
Widya Kristiyanti Putri
Merry Gloria Meliala
Tazkiyatul Syahidah
Tati Budi Kusmiyarti
Arief Dwinanto
Risal Nur Rahma Syahrir
Endah Prahmawati
Izuddinsyah Siregar
Puguh Bintang Pamungkas
Steviani Yolanda
Ida Bagus Putu Bhayunagiri

YAYASAN LITERASI SAINS INDONESIA

AGROEKOLOGI DAN KETAHANAN PANGAN

Hak Cipta © 2026 pada Penulis

Cetakan 1, Juli 2026
17,6 x 25 cm, xx + 328 Halaman
ISBN: 978-634-7292-83-4

Penulis : Betzy Ayu Omega Rampean
Fara Shaliza
Loso Judijanto
Ketut Dharma Susila
Arini Al Ifah
Atika Romalasari
Nike Triwahyuningsih
Widya Kristiyanti Putri
Merry Gloria Meliala
Tazkiyatul Syahidah
Tati Budi Kusmiyarti
Arief Dwinanto
Risal Nur Rahma Syahrir
Endah Prahmawati
Izuddinsyah Siregar
Puguh Bintang Pamungkas
Steviani Yolanda
Ida Bagus Putu Bhayunagiri
Editor : Darmawan Listya Cahya
Y. Sulistiyohadi
Angelia Putriana
Desain Cover : Sandi Pratama

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 syukur ke hadirat Tuhan Yang Maha Esa karena atas rahmat dan karunia-Nya buku "AGROEKOLOGI DAN KETAHANAN PANGAN" ini dapat diselesaikan dengan baik. Buku ini disusun sebagai referensi yang membahas konsep agroekologi dan kaitannya dengan upaya mewujudkan ketahanan pangan melalui sistem pertanian yang berkelanjutan, ramah lingkungan, dan berorientasi pada keseimbangan ekosistem.

Materi dalam buku ini mencakup berbagai pembahasan penting, mulai dari konsep dasar agroekologi dan ketahanan pangan, ekosistem pertanian, pengelolaan tanah dan air, keanekaragaman hayati, hingga sistem pertanian berkelanjutan, agroforestri, pengendalian hama berbasis ekologi, perubahan iklim, pangan lokal, teknologi pertanian, serta kebijakan dan pengembangan agroekologi di masa depan. Selain itu, buku ini juga mengangkat pentingnya pendidikan, penyuluhan, serta pemahaman agroekologi sebagai bagian dari upaya membangun sistem pangan yang tangguh dan berkelanjutan. Penyajian materi dilakukan secara sistematis agar mudah dipahami oleh mahasiswa, akademisi, peneliti, praktisi pertanian, maupun masyarakat umum.

Bab yang akan dibahas pada buku yaitu:

Bab 1: Pengantar Agroekologi
Bab 2: Konsep Ketahanan Pangan
Bab 3: Ekosistem Pertanian dan Agrosistem
Bab 4: Tanah Sebagai Fondasi Agroekologi
Bab 5: Keanekaragaman Hayati Agrosistem
Bab 6: Sistem Pertanian Berkelanjutan
Bab 7: Agroforestri dan Sistem Pertanian Terpadu
Bab 8: Polikultur, Tumpangsari, dan Rotasi Tanaman
Bab 9: Pengelolaan Air dalam Perspektif Agroekologi
Bab 10: Pengendalian Hama dan Penyakit Berbasis Ekologi
Bab 11: Perubahan Iklim dan Adaptasi Pertanian
Bab 12: Pangan Lokal dan Kearifan Tradisional
Bab 13: Sistem Pangan dan Rantai Pasok Pertanian
Bab 14: Teknologi Pertanian Berbasis Agroekologi
Bab 15: Kebijakan dan Tata Kelola Agroekologi

Bab 16: Pendidikan dan Penyuluhan Agroekologi
Bab 17: Agroekologi Perkotaan dan Pertanian Skala Kecil
Bab 18: Perspektif dan Pengembangan Agroekologi
Bab 19: Masa Depan Agroekologi dan Ketahanan Pangan Global

Penulis mengucapkan terima kasih kepada seluruh pihak yang telah memberikan dukungan, baik secara moral maupun intelektual, sehingga buku referensi ini dapat diselesaikan dengan baik. Apresiasi juga disampaikan kepada rekan, akademisi, dan keluarga yang telah memberikan doa, motivasi, serta masukan selama proses penulisan. Dukungan tersebut menjadi penyemangat bagi penulis dalam menjaga kualitas dan kelancaran penyusunan buku ini. Semoga kita semua senantiasa diberikan kesehatan dan kesejahteraan.

Medan, Juli 2026

Tim Penulis

DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR iii
DAFTAR ISI v
DAFTAR GAMBAR xv
DAFTAR TABEL xix
BAB 1 PENGANTAR AGROEKOLOGI 1
1.1 Definisi dan Ruang Lingkup Agroekologi 1
1.1.1 Definisi Agroekologi 1
1.1.2 Ruang Lingkup Agroekologi 1
1.2 Sejarah Perkembangan Agroekologi di Dunia 3
1.3 Prinsip-Prinsip Dasar Agroekologi 5
1.4 Hubungan Agroekologi dengan Ilmu Pertanian Lainnya 6
1.5 Peran Agroekologi dalam Pembangunan Pertanian Berkelanjutan 8
1.6 Perbandingan Agroekologi dengan Pertanian Konvensional 10
BAB 2 KONSEP KETAHANAN PANGAN 13
2.1 Definisi dan Dimensi Ketahanan Pangan 13
2.2 Pilar-Pilar Ketahanan Pangan: Ketersediaan, Akses, Pemanfaatan, dan Stabilitas 15
2.3 Indikator dan Pengukuran Ketahanan Pangan 16
2.4 Ketahanan Pangan dalam Konteks Global dan Nasional 21
2.5 Tantangan Ketahanan Pangan di Era Modern 22
BAB 3 EKOSISTEM PERTANIAN DAN AGROSISTEM 25
3.1 Pengertian Ekosistem Pertanian (Agrosistem) 25
3.1.1 Konsep Dasar Ekosistem Pertanian 25
3.1.2 Perbedaan Ekosistem Alami dan Agrosistem 26
3.1.3 Peran Manusia dalam Pembentukan Agrosistem 27
3.2 Komponen Biotik dan Abiotik dalam Agrosistem 28

3.2.1 Komponen Biotik dalam Ekosistem Pertanian 28
3.2.2 Komponen Abiotik dan Pengaruhnya terhadap Produksi Pertanian ... 30
3.2.3 Interaksi antara Komponen Biotik dan Abiotik 31
3.3 Aliran Energi dan Siklus Materi dalam Agrosistem 32
3.3.1 Aliran Energi dalam Rantai dan Jaring Makanan Pertanian..... 32
3.3.2 Siklus Nutrien dalam Tanah dan Tanaman 33
3.3.3 Peran Mikroorganisme dalam Daur Materi..... 34
3.4 Keanekaragaman Hayati dalam Ekosistem Pertanian 35
3.4.1 Jenis Keanekaragaman Hayati dalam Agrosistem 35
3.4.2 Pentingnya Keanekaragaman bagi Stabilitas Ekosistem Pertanian 36
3.4.3 Dampak Praktik Pertanian terhadap Keanekaragaman Hayati 37
3.5 Jasa Ekosistem dan Manfaatnya bagi Pertanian 38
3.5.1 Konsep dan Jenis Jasa Ekosistem..... 39
3.5.2 Peran Jasa Ekosistem dalam Produktivitas Pertanian 40
3.5.3 Strategi Pemanfaatan Jasa Ekosistem secara Berkelanjutan 41
BAB 4 TANAH SEBAGAI FONDASI AGROEKOLOGI 43
4.1 Sifat Fisik, Kimia dan Biologi Tanah Pertanian 44
4.1.1 Sifat Fisik Tanah 44
4.1.2 Sifat Kimia Tanah 45
4.1.3 Sifat Biologi Tanah 45
4.2 Organisme Tanah dan Peranannya dalam Kesuburan 46
4.2.1 Keanekaragaman Organisme Tanah 47
4.2.2 Peranan Organisme Tanah dalam Kesuburan Tanah 48
4.2.3 Organisme Tanah sebagai Indikator Kesuburan..... 50
4.2.4 Pengelolaan Organisme Tanah dalam Agroekologi..... 50
4.2.5 Peran dalam Ketahanan Pangan 50
4.3 Siklus Hara Nitrogen, Fosfor dan Kalium Tanah..... 51
4.3.1 Siklus Nitrogen (N)..... 51

4.3.2 Siklus Fosfor (P) 52
4.3.3 Siklus Kalium (K) 53
4.4 Degradasi Tanah dan Dampaknya terhadap Ketahanan Pangan 53
4.5 Strategi Pemulihan dan Konservasi Kesuburan Tanah 56
BAB 5 KEANEKARAGAMAN HAYATI AGROSISTEM 59
5.1 Konsep Biodiversitas dalam Sistem Pertanian 59
5.2 Keanekaragaman Genetik Tanaman Pangan 62
5.3 Keanekaragaman Serangga, Polinator dan Musuh Alami 65
5.4 Peran Mikrobioma Tanah dalam Produktivitas Lahan 66
5.5 Konservasi Biodiversitas sebagai Strategi Ketahanan Pangan 66
BAB 6 SISTEM PERTANIAN BERKELANJUTAN 69
6.1 Konsep dan Prinsip Pertanian Berkelanjutan 69
6.2 Pertanian Organik : Filosofi dan Praktik 70
6.3 Pertanian Regeneratif dan Pemulihan Ekosistem 73
6.4 Pertanian Konservasi: Zero Tillage dan Minimal Pengolahan Tanah 76
6.5 Indikator Keberlanjutan dalam Sistem Pertanian 78
BAB 7 AGROFORESTRI DAN SISTEM PERTANIAN TERPADU 81
7.1 Definisi dan Tipologi Agroforestri 81
7.1.1 Agrisilvikultur 84
7.1.2 Silvopastura 85
7.1.3 Agrosilvopastura 85
7.1.4 Agroforestri Pekarangan 85
7.1.5 Agroforestri Multistrata 86
7.1.6 *Alley Cropping* 86
7.2 Manfaat Ekologis dan Ekonomis Agroforestri 87
7.2.1 Manfaat ekologis Agroforestri 87
7.2.2 Manfaat ekonomis Agroforestri 88
7.2.3 Integrasi Manfaat Ekologis dan Ekonomis dalam Ketahanan Pangan 88

7.3 Sistem Pertanian Terpadu Tanaman–Ternak 89
7.3.1 Konsep dan Komponen Sistem Tanaman–Ternak 89
7.3.2 Manfaat Sistem Tanaman–Ternak 90
7.3.3 Contoh Penerapan Sistem Tanaman–Ternak 91
7.4 Sistem Pertanian Terpadu Tanaman–Ikan (Minapadi) 91
7.4.1 Konsep, Komponen, dan Manfaat Sistem Minapadi 91
7.4.5 Contoh Penerapan Sistem Minapadi di Indonesia 92
7.5 Agroforestri Berbasis Kearifan Lokal Nusantara 93
7.5.1 Sistem Pekarangan Tradisional 94
7.5.2 Kebun Campuran (*Mixed Garden Systems*) 94
7.5.3 Sistem Talun dan Kebun Hutan 94
7.5.4 Peran Kearifan Lokal dalam Ketahanan Pangan 95
7.5.5 Integrasi Pengetahuan Lokal dan Teknologi Modern 95
BAB 8 POLIKULTUR, TUMPANGSARI, DAN ROTASI TANAMAN 97
8.1 Konsep Monokultur versus Polikultur dalam Agroekologi 97
8.2 Prinsip dan Manfaat Sistem Tumpangsari 99
8.2.1 Sistem Tumpangsari 99
8.2.2 Manfaat Tumpangsari 101
8.3 Rotasi Tanaman sebagai Strategi Pengelolaan Lahan 104
8.3.1 Penyeimbangan Nutrisi 105
8.3.2 Gangguan Biologis 105
8.3.3 Optimalisasi Struktur Tanah 105
8.3.4 Diversifikasi Ekonomi 106
8.4 Tanaman Penutup Tanah (*Cover crop*) dan Peranannya 106
8.5 Desain Pola Tanam Berbasis Ekologi untuk Ketahanan Pangan 108
BAB 9 PENGELOLAAN AIR DALAM PERSPEKTIF AGROEKOLOGI ... 111
9.1 Siklus Hidrologi dan Kaitannya dengan Sistem Pertanian 111
9.2 Irigasi Berkelanjutan dan Efisiensi Penggunaan Air 116

9.3 Pengelolaan Air Hujan dan Konservasi Air di Lahan Pertanian 118
9.4 Dampak Kekeringan dan Banjir terhadap Ketahanan Pangan 119
9.5 Teknologi Panen Air (Water Harvesting) berbasis Agroekologi 120
BAB 10 PENGENDALIAN HAMA DAN PENYAKIT BERBASIS EKOLOGI 123
10.1 Konsep Pengendalian Hama Terpadu (PHT) dalam Agroekologi 123
10.2 Musuh Alami: Predator, Parasitoid, dan Patogen Serangga 125
10.3 Pestisida Nabati dan Biopestisida sebagai Alternatif Ramah Lingkungan 128
10.4 Manipulasi Habitat untuk Menekan Populasi Hama 131
10.5 Resistensi Tanaman terhadap Hama dan Penyakit 135
BAB 11 PERUBAHAN IKLIM DAN ADAPTASI PERTANIAN 139
11.1 Dampak Perubahan Iklim terhadap Sistem Pertanian Global 139
11.2 Kerentanan Sektor Pertanian terhadap Anomali Cuaca 142
11.2.1 Kerangka Konseptual Kerentanan 142
11.2.2 Faktor Penentu Kerentanan 144
11.2.3 Faktor Kelembagaan 145
11.3 Strategi Adaptasi Pertanian di Wilayah Tropis 145
11.3.1 Pendekatan Agroekologi 145
11.3.2 Strategi Adaptasi Utama 146
11.3.3 Adaptasi Berbasis Pengetahuan Lokal 147
11.4 Pertanian Cerdas Iklim (*Climate-Smart Agriculture*) 148
11.4.1 Tiga Pilar Utama *Climate-Smart Agriculture* 148
11.4.2 Integrasi Tiga Pilar dalam *Climate-Smart Agriculture* 150
11.4.3 Peran Kebijakan dalam Implementasi CSA 151
11.5 Mitigasi Emisi Gas Rumah Kaca dari Sektor Pertanian 151
11.5.1 Sumber Utama Emisi Gas Rumah Kaca 151
11.5.2 Pendekatan Umum Mitigasi Emisi 152
11.5.3 Strategi Mitigasi Berbasis Tanaman dan Lahan 152

11.5.4 Strategi Mitigasi Berbasis Nutrisi 153
11.5.5 Strategi Mitigasi pada Sistem Peternakan 153
11.5.6 Peningkatan Serapan Karbon.....153
11.5.7 Keterkaitan dan Tantangan Mitigasi..... 154
BAB 12 PANGAN LOKAL DAN KEARIFAN TRADISIONAL 155
12.1 Nilai Strategis Pangan Lokal dalam Ketahanan Pangan Nasional 155
12.2 Kearifan Lokal Pertanian Nusantara dan Relevansinya 159
12.3 Diversifikasi Pangan Lokal sebagai Strategi Gizi Nasional.....161
12.4 Pelestarian Varietas Lokal dan Benih Tradisional 163
12.5 Revitalisasi Kuliner Berbasis Tanaman Pangan Lokal.....164
BAB 13 SISTEM PANGAN DAN RANTAI PASOK PERTANIAN 167
13.1 Konsep Sistem Pangan dari Hulu ke Hilir 167
13.1.1 Definisi Sistem Pangan 167
13.1.2 Komponen Sistem Pangan dari Hulu ke Hilir 167
13.1.3 Sistem Pangan Berbasis Agroekologi.....169
13.2 Rantai Nilai Pertanian dan Posisi Petani didalamnya 170
13.2.1 Konsep Rantai Nilai Pertanian 170
13.2.2 Pemahaman Rantai Nilai Pertanian dan Posisi Petani 171
13.3 Pasar lokal, Pasar Petani, dan Sistem Pangan Alternatif 174
13.3.1 Pasar Lokal 174
13.3.2 Pasar Petani.....174
13.3.3 Sistem Pangan Alternatif.....174
13.4 Pengurangan Kehilangan dan Pemborosan Pangan.....176
13.4 Transformasi Sistem Pangan Menuju Keberlanjutan 178
BAB 14 TEKNOLOGI PERTANIAN BERBASIS AGROEKOLOGI 181
14.1 Inovasi Teknologi dalam Kerangka Agroekologi 181
14.2 Pertanian Presisi dan Digitalisasi Lahan 183
14.2.1 Agroecology 4.0: Augmentasi Peran Manusia dalam Ekosistem Digital 183

14.2.2 Demokratisasi IoT untuk Petani Kecil: Menuju Inklusivitas Teknologi....184
14.3 Bioteknologi Ramah Lingkungan dalam Produksi Pangan....185
14.3.1 Pemanfaatan Mikrobioma Tanah sebagai Pengganti Input Sintetis 185
14.3.2 Penerapan Mikroba Endofit pada Padi Lokal di Indonesia....186
14.4 Teknologi Fermentasi dan Pengolahan Pupuk Organik....187
14.4.1 Konversi Limbah menjadi Bio-Slurry Premium....187
14.4.2 Restorasi Lahan yang Mengalami Kelelahan Hara....187
14.5 Penerapan Teknologi Tepat Guna untuk Petani Kecil....188
14.5.1 Inklusivitas Teknologi Tepat Guna (TTG)....188
14.5.2 Regenerasi dan Diseminasi Digital: Peran Petani Milenial sebagai Katalisator....190
BAB 15 KEBIJAKAN DAN TATA KELOLA AGROEKOLOGI....193
15.1 Kebijakan Pertanian Nasional dalam Perspektif Agroekologi....193
15.1.1 Paradigma Agroekologi dalam Kebijakan Pertanian Nasional....193
15.1.2 Integrasi Prinsip Agroekologi dalam Perencanaan Pertanian....194
15.1.3 Tantangan Implementasi Kebijakan Agroekologi di Tingkat Nasional....195
15.2 Regulasi dan Insentif untuk Pertanian Berkelanjutan....197
15.2.1 Kerangka Regulasi Pertanian Berkelanjutan....197
15.2.2 Skema Insentif Ekonomi bagi Petani Agroekologi....199
15.2.3 Evaluasi Efektivitas Regulasi dan Insentif....200
15.3 Peran Pemerintah Daerah dalam Pengembangan Agroekologi....201
15.3.1 Desentralisasi Kebijakan Pertanian dan Peran Daerah....201
15.3.2 Inovasi Program Daerah dalam Mendukung Agroekologi....203
15.3.3 Kolaborasi Pemerintah Daerah dengan Komunitas Lokal....204
15.4 Tata Kelola Sumber Daya Alam dan Lahan Pertanian....204
15.4.1 Prinsip Tata Kelola Sumber Daya Alam Berkelanjutan....205
15.4.2 Pengelolaan Lahan Pertanian Berbasis Ekologi....206

15.4.3 Konflik dan Resolusi dalam Pemanfaatan Sumber Daya.....207
15.5 Kebijakan Internasional terkait Pangan dan Agroekologi.....208
15.5.1 Peran Organisasi Internasional dalam Pengembangan Agroekologi 208
15.5.2 Kesepakatan Global tentang Ketahanan Pangan dan Lingkungan ..209
15.5.3 Adaptasi Kebijakan Internasional ke Konteks Nasional.....210
BAB 16 PENDIDIKAN DAN PENYULUHAN AGROEKOLOGI.....211
16.1 Peran Pendidikan dalam Transformasi Sistem Pertanian.....211
16.2 Kurikulum Agroekologi di Perguruan Tinggi Pertanian 214
16.3 Sekolah Lapang Petani sebagai Model Penyuluhan Partisipatif.....217
16.4 Peran Penyuluh Pertanian dalam Diseminasi Agroekologi 220
16.5 Literasi Pangan dan Agroekologi di Masyarakat 223
BAB 17 AGROEKOLOGI PERKOTAAN DAN PERTANIAN SKALA KECIL 227
17.1 Konsep dan Perkembangan Pertanian Perkotaan (Urban Farming).....227
17.2 Model Kebun Komunitas dan Pertanian Vertikal 231
17.3 Pekarangan Produktif sebagai Sumber Pangan Keluarga 234
17.4 Kontribusi Pertanian Perkotaan terhadap Ketahanan Pangan Lokal.....237
17.5 Tantangan dan Peluang Agroekologi di Wilayah Perkotaan 239
BAB 18 PERSPEKTIF DAN PENGEMBANGAN AGROEKOLOGI.....243
18.1 Paradigma Keilmuan dalam Agroekologi.....243
18.2 Pendekatan Partisipatif Berbasis Petani 244
18.4 Inovasi Pengembangan Ketahanan Pangan di Tingkat Nasional 250
18.4.1 Produk Pangan Hibrida 250
18.4.2 Smart Farming.....251
18.5 Jaringan Keilmuan Agroekologi di Tingkat Global.....252
BAB 19 MASA DEPAN AGROEKOLOGI DAN KETAHANAN PANGAN GLOBAL.....255
19.1 Proyeksi Kebutuhan Pangan Dunia Tahun 2050 256

19.2 Agroekologi sebagai Solusi Krisis Pangan dan Iklim 258
19.3 Transisi Menuju Sistem Pangan Agroekologis secara Global.....260
19.4 Peluang Indonesia dalam Kepemimpinan Agroekologi Tropis.....262
19.5 Visi Pertanian Berkelanjutan untuk Generasi Mendatang 265
DAFTAR PUSTAKA.....269
BIODATA PENULIS.....311

DAFTAR GAMBAR

Gambar 5.1: Keragaman Spesies Tanaman Pisang 60
Gambar 5.2: Keragaman Genetik Buah Pisang..... 61
Gambar 5.3: Keragaman Ekosistem Tanaman Padi 61
Gambar 5.4: Ragam benih lokal (*nationalgeographic*)..... 62
Gambar 5.5: Tiga Komoditas Utama Tanaman Pangan..... 63
Gambar 5.6: Presentase Varietas Padi di Kuantan Singingi 64
Gambar 5.7: Tanaman Sorgum Kriteria Heritabilitas..... 65
Gambar 7.1: Faktor-faktor yang mempengaruhi desain dan pengelolaan sistem agroforestri 82
Gambar 7.2: Struktur vertikal sistem agroforestri multistrata..... 87
Gambar 7.3: Siklus Nutrisi dalam Sistem Tanaman–Ternak 90
Gambar 7.4: Skema Sistem Minapadi..... 92
Gambar 7.5: Contoh Sistem Agroforestri Tradisional Nusantara 93
Gambar 8.1: Layanan ekosistem yang diberikan oleh sistem tumpangsari..... 103
Gambar 8.2: Diagram skema peran dari beberapa tipe tanaman penutup lahan berbeda dalam agroekosistem dan layanan ekologisnya. 108
Gambar 8.3: Langkah kerja utama dalam desain pola tanam berbasis ekologi 109
Gambar 8.4: Sistem penanaman tipikal dengan perbedaan ketinggian untuk anidasi spasial dan perbedaan kedalaman untuk pengambilan kelembapan dan nutrisi dari lapisan tanah yang berbeda..... 110
Gambar 10.1: Pengendalian Hama Terpadu Berbasis Ekologi 124
Gambar 10.2: Integrasi pengendalian hayati dengan semiokimia, manipulasi habitat, dan taktik budidaya dalam sistem PHT..... 127
Gambar 10.3: Skema kedudukan pestisida nabati dan biopestisida dalam PHT berbasis ekologi..... 129
Gambar 10.4: Dinamika peran *flower strip* dalam mendukung musuh alami di lahan tanaman semusim. 133

Gambar 10.5: Skema Manipulasi Habitat untuk Menekan Populasi Hama.....134

Gambar 10.6: Skema mekanisme biologis resistensi tanaman terhadap artropoda, yang melibatkan pertahanan konstitutif dan pertahanan terinduksi setelah serangan.....137

Gambar 10.1: Pengendalian Hama Terpadu Berbasis Ekologi 124

Gambar 10.2: Integrasi pengendalian hayati dengan semiokimia, manipulasi habitat, dan taktik budidaya dalam sistem PHT.....127

Gambar 10.3: Skema kedudukan pestisida nabati dan biopestisida dalam PHT berbasis ekologi.....129

Gambar 10.4: Dinamika peran *flower strip* dalam mendukung musuh alami di lahan tanaman semusim. 133

Gambar 10.5: Skema Manipulasi Habitat untuk Menekan Populasi Hama.....134

Gambar 10.6: Skema mekanisme biologis resistensi tanaman terhadap artropoda, yang melibatkan pertahanan konstitutif dan pertahanan terinduksi setelah serangan.....137

Gambar 11.1: Interaksi berbagai faktor stres (iklim, biotik, tanah, dan antropogenik) terhadap sistem pertanian dalam konteks perubahan iklim yang menentukan ketahanan tanaman (*climate-resilient crops*).....140

Gambar 11.2: Kerangka kerentanan menurut IPCC yang menunjukkan interaksi antara paparan (*exposure*), sensitivitas (*sensitivity*), dan kapasitas adaptif (*adaptive capacity*) dalam menentukan tingkat kerentanan sistem pertanian terhadap perubahan iklim.....143

Gambar 11.3: Konsep *Climate-Smart Agriculture* (CSA) yang mengintegrasikan adaptasi, mitigasi, dan ketahanan pangan 150

Gambar 13.1: Sistem Pangan dari Hulu ke Hilir.....168

Gambar 13.2: Tahapan Peran Petani dalam Rantai Nilai 173

Gambar 13.3: Pasar Lokal, Pasar Petani, dan Sistem Pangan.....176

Gambar 17.1: Pertanian Perkotaan di Amerika Serikat.....227

Gambar 17.2: Timeline Sejarah Pertanian Perkotaan 230

Gambar 17.3: Kebun Komunitas di Rio de Janeiro 232

Gambar 17.4: Aktivitas Panen Terong (*brinjals*) di Kebun Komunitas "The Giving Garden".....232
Gambar 17.5: Teknik Pertanian Vertikal 233
Gambar 17.6: Pemanfaatan Pekarangan di Kelurahan Caturharjo.....235

DAFTAR TABEL

Tabel 7.1: Tipologi Sistem Agroforestri Berdasarkan Komponen Penyusunnya 83

Tabel 10.1: Perbedaan predator, parasitoid, dan patogen serangga sebagai musuh alami 128

Tabel 10.2: Perbandingan umum pestisida nabati dan biopestisida dalam pengendalian berbasis ekologi 131

Tabel 10.3: Bentuk manipulasi habitat dan fungsi ekologisnya dalam menekan populasi hama 135

Tabel 10.4: Jenis resistensi tanaman terhadap hama dan penyakit serta perannya dalam PHT berbasis ekologi 138

Tabel 11.1: Dampak Perubahan Iklim pada Sistem Pertanian Global 141

Tabel 11.2: Faktor Penentu dan Perannya dalam Kerentanan Iklim 144

Tabel 11.3: Strategi Mitigasi dan Dampaknya 153

Tabel 12.1: Diversifikasi Pangan Lokal Sumber Karbohidrat (per 100g BDD) 162

Tabel 14.1: Perbandingan Efisiensi Input Pertanian Digital vs Konvensional ... 184

Tabel 14.2: Matriks Perbandingan Efisiensi Operasional (Penerapan Irigasi Tetes Berbasis IoT) 185

BAB 1
PENGANTAR AGROEKOLOGI

1.1 Definisi dan Ruang Lingkup Agroekologi

Perkembangan sektor pertanian modern menghadapi berbagai tantangan, seperti degradasi lingkungan, perubahan iklim, dan ketahanan pangan, sehingga diperlukan pendekatan yang lebih berkelanjutan dalam pengelolaan sistem pertanian. Dalam konteks tersebut, agroekologi muncul sebagai pendekatan ilmiah yang mengintegrasikan prinsip ekologi dengan praktik pertanian guna menciptakan sistem yang produktif sekaligus berkelanjutan (FAO, 2018; FAO, 2023).

1.1.1 Definisi Agroekologi

Agroekologi merupakan pendekatan ilmiah yang menerapkan prinsip-prinsip ekologi dalam sistem pertanian untuk mengoptimalkan interaksi antara komponen biotik dan abiotik sekaligus memperhatikan aspek sosial dan ekonomi dalam mewujudkan sistem pangan berkelanjutan (FAO, 2018; FAO, 2023). Pendekatan ini tidak hanya berorientasi pada peningkatan produktivitas, tetapi juga pada keberlanjutan lingkungan, ketahanan pangan, dan kesejahteraan petani melalui integrasi ilmu pengetahuan modern dan pengetahuan lokal (Gliessman, 2018; FAO, 2023).

Contoh: Sistem tumpangsari antara jagung dan kacang-kacangan merupakan praktik agroekologi karena mampu meningkatkan kesuburan tanah melalui fiksasi nitrogen serta mengurangi penggunaan pupuk kimia sintetis.

1.1.2 Ruang Lingkup Agroekologi

Ruang lingkup agroekologi mencakup pemahaman interaksi ekologis dalam agroekosistem, seperti siklus nutrisi, aliran energi, serta keanekaragaman hayati yang berperan dalam menjaga stabilitas dan produktivitas sistem pertanian (Gliessman, 2018; FAO, 2018). Selain itu, agroekologi juga mencakup pengelolaan sumber daya alam secara berkelanjutan melalui diversifikasi tanaman, integrasi tanaman–ternak, dan konservasi tanah serta air guna meningkatkan ketahanan terhadap perubahan iklim (FAO, 2018; HLPE, 2019). Lebih luas, agroekologi

melibatkan aspek sosial, ekonomi, dan kebijakan, termasuk pemberdayaan petani, penguatan sistem pangan lokal, serta transformasi menuju sistem pertanian yang adil dan berkelanjutan (Wezel et al., 2020; FAO, 2023).

Contoh: Sistem agroforestri yang mengombinasikan tanaman pangan dengan pohon berkayu merupakan bagian dari agroekologi karena mampu meningkatkan keanekaragaman hayati, menjaga kualitas tanah, dan memberikan manfaat ekonomi tambahan bagi petani.

1. **Interaksi Ekologis dalam Agroekosistem**

   Ruang lingkup utama agroekologi adalah mengkaji interaksi antara komponen biotik (tanaman, hewan, mikroorganisme) dan abiotik (tanah, air, iklim) dalam agroekosistem. Interaksi ini mencakup siklus nutrisi, aliran energi, serta hubungan trofik yang memengaruhi produktivitas dan stabilitas sistem pertanian. Pemahaman terhadap proses ekologis ini penting untuk mengoptimalkan fungsi alami ekosistem tanpa merusak lingkungan (Gliessman, 2018; FAO, 2018).

   Contoh: Keberadaan mikroorganisme tanah seperti bakteri penambat nitrogen dapat meningkatkan kesuburan tanah secara alami tanpa pupuk kimia.

2. **Pengelolaan Sumber Daya Alam**

   Agroekologi mencakup pengelolaan sumber daya alam secara berkelanjutan, seperti tanah, air, dan keanekaragaman hayati. Pendekatan ini menekankan penggunaan input lokal, konservasi tanah dan air, serta peningkatan bahan organik untuk menjaga produktivitas jangka panjang. Pengelolaan ini bertujuan untuk mengurangi degradasi lingkungan akibat praktik pertanian intensif (FAO, 2018; HLPE, 2019).

   Contoh: Penerapan teknik konservasi tanah seperti terasering di lahan miring untuk mencegah erosi dan menjaga kesuburan tanah.

3. **Diversifikasi dan Integrasi Sistem Pertanian**

   Agroekologi mendorong diversifikasi tanaman dan integrasi berbagai komponen dalam sistem pertanian, seperti tanaman, ternak, dan perikanan. Diversifikasi ini bertujuan meningkatkan stabilitas sistem, mengurangi risiko kegagalan panen, dan meningkatkan efisiensi pemanfaatan sumber daya.

Integrasi antar komponen juga menciptakan hubungan saling menguntungkan dalam agroekosistem (Wezel et al., 2020; FAO, 2018).

Contoh: Sistem integrasi tanaman dan ternak, di mana limbah ternak digunakan sebagai pupuk, sementara tanaman digunakan sebagai pakan ternak.

4. **Aspek Sosial dan Ekonomi Pertanian**

   Ruang lingkup agroekologi juga mencakup dimensi sosial dan ekonomi, seperti kesejahteraan petani, akses terhadap sumber daya, dan keberlanjutan sistem pangan. Agroekologi mendorong pemberdayaan petani kecil, penguatan ekonomi lokal, serta pengembangan pasar yang adil dan berkelanjutan (FAO, 2018; HLPE, 2019).

   Contoh: Pembentukan kelompok tani untuk memperkuat posisi tawar petani dalam pemasaran hasil pertanian.

5. **Kebijakan dan Sistem Pangan**

   Agroekologi tidak hanya berfokus pada tingkat lahan, tetapi juga mencakup kebijakan pertanian dan sistem pangan secara keseluruhan. Hal ini meliputi perumusan kebijakan yang mendukung praktik pertanian berkelanjutan, distribusi pangan yang adil, serta pengurangan ketergantungan pada sistem pangan global yang tidak berkelanjutan (FAO, 2018; Wezel et al., 2020).

   Contoh: Program pemerintah yang mendukung pertanian organik dan pengurangan penggunaan pestisida kimia.

1.2 Sejarah Perkembangan Agroekologi di Dunia

Agroekologi merupakan pendekatan dalam ilmu pertanian yang berkembang sebagai respons terhadap berbagai permasalahan lingkungan dan sosial akibat sistem pertanian konvensional. Seiring waktu, agroekologi mengalami perkembangan dari sekadar cabang ilmu ekologi terapan menjadi pendekatan yang lebih holistik yang mencakup aspek lingkungan, sosial, ekonomi, dan kebijakan dalam sistem pangan berkelanjutan (FAO, 2018; FAO, 2023).

1. **Fase Awal (Awal Abad ke-20)**

   Agroekologi mulai berkembang pada awal abad ke-20 sebagai cabang ilmu yang mengkaji hubungan antara ekologi dan pertanian, khususnya interaksi antara tanaman dan lingkungan fisiknya. Pada tahap ini, agroekologi masih

terbatas pada pembahasan ekologi tanaman dan belum mencakup dimensi sosial maupun ekonomi dalam sistem pertanian (Wezel et al., 2009; Gliessman, 2018).

2. Fase Perkembangan (1960–1980-an)

Pada periode 1960 hingga 1980-an, agroekologi mengalami perkembangan signifikan sebagai respons terhadap dampak negatif Revolusi Hijau, seperti degradasi tanah, pencemaran lingkungan, dan ketergantungan pada input kimia. Dalam fase ini, agroekologi mulai dipandang sebagai pendekatan alternatif yang menekankan keberlanjutan melalui diversifikasi tanaman, efisiensi sumber daya, dan keseimbangan ekosistem (Altieri, 2018; HLPE, 2019).

3. Fase Integrasi (1990–2000-an)

Memasuki periode 1990-an hingga awal 2000-an, agroekologi berkembang menjadi konsep yang lebih luas, tidak hanya sebagai ilmu tetapi juga sebagai praktik pertanian dan gerakan sosial. Pendekatan ini mulai mengintegrasikan aspek sosial, ekonomi, dan budaya, serta berfokus pada ketahanan pangan dan pemberdayaan petani kecil, sehingga mendapatkan perhatian global dari berbagai lembaga internasional (Wezel et al., 2020; FAO, 2018).

4. Fase Modern (2010–Sekarang)

Pada fase modern, agroekologi diakui secara global sebagai pendekatan strategis dalam transformasi sistem pangan berkelanjutan. Agroekologi digunakan untuk menghadapi tantangan global seperti perubahan iklim, penurunan keanekaragaman hayati, dan krisis pangan, serta didukung oleh kerangka kerja internasional seperti "10 Elemen Agroekologi" yang dikembangkan oleh FAO (FAO, 2018; FAO, 2023).

5. Contoh Penerapan Global

Salah satu contoh penerapan agroekologi dapat ditemukan di Amerika Latin melalui gerakan *campesino a campesino*, yaitu pendekatan pertukaran pengetahuan antarpetani dalam mengembangkan praktik pertanian berkelanjutan. Pendekatan ini terbukti mampu meningkatkan kemandirian petani, memperkuat sistem pangan lokal, serta menjaga keseimbangan lingkungan secara berkelanjutan (Altieri, 2018; Wezel et al., 2020).

1.3 Prinsip-Prinsip Dasar Agroekologi

Agroekologi sebagai pendekatan pertanian berkelanjutan didasarkan pada prinsip-prinsip ekologi yang bertujuan untuk menciptakan sistem pertanian yang produktif, ramah lingkungan, dan berkeadilan sosial. Prinsip-prinsip ini menjadi pedoman dalam merancang dan mengelola agroekosistem agar mampu menjaga keseimbangan antara kebutuhan produksi dan kelestarian sumber daya alam (FAO, 2018; HLPE, 2019).

1. Keanekaragaman (*Diversity*)

Prinsip keanekaragaman menekankan pentingnya diversifikasi tanaman, hewan, dan mikroorganisme dalam sistem pertanian untuk meningkatkan stabilitas dan ketahanan agroekosistem. Keanekaragaman hayati berperan dalam mengurangi risiko kegagalan panen, meningkatkan efisiensi pemanfaatan sumber daya, serta mendukung pengendalian hama secara alami (FAO, 2018; Wezel et al., 2020).

Contoh: Sistem tumpangsari (intercropping) antara jagung dan kacang-kacangan dapat meningkatkan hasil panen sekaligus memperbaiki kesuburan tanah.

2. Daur Ulang (*Recycling*)

Prinsip daur ulang mengutamakan pemanfaatan kembali bahan organik dan nutrisi dalam sistem pertanian untuk mengurangi ketergantungan pada input eksternal. Hal ini dilakukan melalui pengomposan, pemanfaatan limbah pertanian, serta integrasi tanaman dan ternak dalam satu sistem (FAO, 2018; HLPE, 2019).

Contoh: Penggunaan pupuk kompos dari sisa tanaman atau kotoran ternak untuk meningkatkan kesuburan tanah secara alami.

3. Efisiensi (*Efficiency*)

Prinsip efisiensi menekankan penggunaan sumber daya secara optimal, seperti air, energi, dan nutrisi, untuk meningkatkan produktivitas tanpa merusak lingkungan. Agroekologi berupaya mengurangi penggunaan input kimia melalui pemanfaatan proses alami dalam ekosistem (FAO, 2018; Wezel et al., 2020).

Contoh: Penggunaan irigasi tetes untuk menghemat air dan meningkatkan efisiensi penggunaan air pada tanaman.

4. Ketahanan (*Resilience*)

Prinsip ketahanan bertujuan meningkatkan kemampuan sistem pertanian dalam menghadapi gangguan seperti perubahan iklim, serangan hama, dan bencana alam. Sistem yang beragam dan terintegrasi cenderung lebih stabil dan mampu pulih dengan cepat dari tekanan lingkungan (HLPE, 2019; FAO, 2018).

Contoh: Sistem agroforestri yang menggabungkan tanaman pangan dan pohon dapat melindungi tanah dari erosi dan meningkatkan ketahanan terhadap kekeringan.

5. **Sinergi (*Synergy*)**

   Prinsip sinergi menekankan interaksi positif antara berbagai komponen dalam agroekosistem sehingga dapat meningkatkan produktivitas dan efisiensi sistem secara keseluruhan. Interaksi ini melibatkan hubungan antara tanaman, hewan, tanah, dan mikroorganisme (FAO, 2018; Wezel et al., 2020).

   Contoh: Integrasi tanaman padi dengan ikan (mina padi) yang saling menguntungkan dalam satu lahan.

6. **Nilai Sosial dan Ekonomi (*Human and Social Values*)**

   Agroekologi juga memperhatikan kesejahteraan petani, keadilan sosial, dan keberlanjutan ekonomi dalam sistem pertanian. Pendekatan ini mendorong pemberdayaan petani, penguatan ekonomi lokal, serta sistem pangan yang adil dan inklusif (FAO, 2018; HLPE, 2019).

   Contoh: Pengembangan pasar lokal untuk produk pertanian organik yang meningkatkan pendapatan petani.

1.4 Hubungan Agroekologi dengan Ilmu Pertanian Lainnya

Agroekologi merupakan pendekatan multidisipliner yang mengintegrasikan berbagai cabang ilmu pertanian untuk menciptakan sistem pertanian yang berkelanjutan. Dalam praktiknya, agroekologi tidak berdiri sendiri, melainkan memiliki keterkaitan erat dengan berbagai disiplin ilmu seperti agronomi, ilmu tanah, perlindungan tanaman, dan sosial ekonomi pertanian. Integrasi ini penting untuk memahami sistem pertanian secara holistik, mulai dari aspek biologi hingga aspek manusia dalam pengelolaannya (Gliessman, 2018; FAO, 2018).

1. **Hubungan dengan Agronomi**

Agroekologi memiliki hubungan yang sangat erat dengan agronomi karena keduanya sama-sama mempelajari teknik budidaya tanaman. Namun, agroekologi memperluas pendekatan agronomi dengan memasukkan prinsip ekologi dalam pengelolaan tanaman, seperti diversifikasi tanaman, rotasi tanaman, dan pemanfaatan interaksi alami antarorganisme. Dengan demikian, agroekologi membantu agronomi menjadi lebih berkelanjutan dengan mengurangi ketergantungan pada input eksternal dan meningkatkan efisiensi sistem produksi (Altieri, 2018; Gliessman, 2018).

2. Hubungan dengan Ilmu Tanah

Dalam agroekologi, ilmu tanah menjadi dasar penting karena tanah merupakan komponen utama dalam agroekosistem. Agroekologi menekankan pengelolaan tanah secara berkelanjutan melalui peningkatan bahan organik, aktivitas mikroorganisme, dan siklus nutrisi alami. Pendekatan ini sejalan dengan ilmu tanah yang mempelajari sifat fisik, kimia, dan biologi tanah, namun agroekologi lebih menekankan pada pemanfaatan proses alami untuk menjaga kesuburan tanah dalam jangka panjang (FAO, 2018; HLPE, 2019).

3. Hubungan dengan Perlindungan Tanaman

Agroekologi berkontribusi dalam bidang perlindungan tanaman melalui pendekatan pengendalian hama terpadu (PHT) yang berbasis ekologi. Alih-alih menggunakan pestisida kimia secara intensif, agroekologi mendorong pemanfaatan musuh alami, diversifikasi tanaman, dan pengelolaan habitat untuk mengendalikan hama secara alami. Hal ini menunjukkan bahwa agroekologi memperkaya ilmu perlindungan tanaman dengan pendekatan yang lebih ramah lingkungan dan berkelanjutan (Altieri, 2018; Wezel et al., 2020).

4. Hubungan dengan Peternakan

Agroekologi juga berkaitan erat dengan ilmu peternakan, terutama dalam sistem integrasi tanaman dan ternak. Dalam pendekatan ini, limbah ternak dimanfaatkan sebagai pupuk organik, sementara tanaman menyediakan pakan bagi ternak, sehingga tercipta siklus nutrisi yang efisien. Integrasi ini tidak hanya meningkatkan produktivitas, tetapi juga mengurangi limbah dan ketergantungan pada input eksternal (FAO, 2018; HLPE, 2019).

5. Hubungan dengan Sosial Ekonomi Pertanian

Selain aspek biofisik, agroekologi juga berkaitan erat dengan ilmu sosial ekonomi pertanian karena melibatkan kesejahteraan petani, akses terhadap sumber daya, serta sistem pasar. Agroekologi mendorong pemberdayaan petani kecil, penguatan ekonomi lokal, dan pengembangan sistem pangan yang adil dan berkelanjutan. Oleh karena itu, pendekatan ini tidak hanya berfokus pada produksi, tetapi juga pada distribusi dan konsumsi dalam sistem pangan (FAO, 2018; Wezel et al., 2020).

1.5 Peran Agroekologi dalam Pembangunan Pertanian Berkelanjutan

Pembangunan pertanian berkelanjutan menjadi fokus utama dalam menghadapi tantangan global seperti perubahan iklim, degradasi lahan, dan meningkatnya kebutuhan pangan. Dalam hal ini, agroekologi berperan sebagai pendekatan yang mengintegrasikan prinsip ekologi, sosial, dan ekonomi untuk menciptakan sistem pertanian yang produktif, ramah lingkungan, dan berkelanjutan dalam jangka panjang (FAO, 2018; HLPE, 2019).

1. Menjaga Kelestarian Lingkungan

Agroekologi berperan dalam menjaga kelestarian lingkungan melalui pengelolaan sumber daya alam yang lebih ramah lingkungan, seperti mengurangi penggunaan pupuk dan pestisida kimia serta meningkatkan keanekaragaman hayati. Pendekatan ini membantu menjaga kesuburan tanah, kualitas air, dan keseimbangan ekosistem sehingga dampak negatif pertanian terhadap lingkungan dapat diminimalkan (FAO, 2018; Wezel et al., 2020).

Contoh: Penggunaan pupuk organik dan pestisida nabati dalam pertanian organik mampu mengurangi pencemaran tanah dan air dibandingkan penggunaan bahan kimia sintetis.

2. Meningkatkan Ketahanan Pangan

beragam dan stabil, sehingga mampu mengurangi risiko kegagalan panen akibat perubahan iklim atau serangan hama. Diversifikasi tanaman juga memungkinkan penyediaan pangan yang lebih beragam dan bergizi bagi masyarakat (HLPE, 2019; FAO, 2023).

Contoh: Sistem tumpangsari antara padi dan kacang-kacangan dapat meningkatkan hasil panen sekaligus menyediakan sumber protein tambahan bagi masyarakat.

3. Meningkatkan Kesejahteraan Petani

Agroekologi membantu meningkatkan kesejahteraan petani dengan mengurangi ketergantungan pada input eksternal yang mahal, seperti pupuk dan pestisida kimia. Dengan memanfaatkan sumber daya lokal, petani dapat menekan biaya produksi dan meningkatkan pendapatan secara berkelanjutan (FAO, 2018; Wezel et al., 2020).

Contoh: Petani yang menggunakan kompos dari limbah pertanian sendiri dapat mengurangi biaya pembelian pupuk sekaligus meningkatkan kualitas tanah.

4. Menghadapi Perubahan Iklim

Agroekologi berperan dalam mitigasi dan adaptasi terhadap perubahan iklim melalui peningkatan kemampuan sistem pertanian dalam menyimpan karbon, menjaga kelembaban tanah, dan meningkatkan ketahanan terhadap kondisi ekstrem seperti kekeringan atau banjir. Sistem yang beragam dan berbasis ekologi cenderung lebih adaptif terhadap perubahan lingkungan (HLPE, 2019; FAO, 2018).

Contoh: Sistem agroforestri yang menggabungkan tanaman pangan dengan pohon dapat menyerap karbon, mengurangi erosi, dan menjaga kelembaban tanah.

5. Mendukung Keberlanjutan Sosial dan Ekonomi

Agroekologi juga berperan dalam memperkuat aspek sosial dan ekonomi pertanian dengan mendorong pemberdayaan petani kecil, penguatan pasar lokal, dan distribusi sumber daya yang lebih adil. Pendekatan ini menciptakan sistem pangan yang tidak hanya efisien tetapi juga inklusif dan berkeadilan (FAO, 2018; Wezel et al., 2020).

Contoh: Pengembangan pasar lokal untuk produk pertanian organik memungkinkan petani menjual hasil panen dengan harga lebih baik dan meningkatkan kesejahteraan mereka.

1.6 Perbandingan Agroekologi dengan Pertanian Konvensional

Agroekologi dan pertanian konvensional merupakan dua pendekatan yang berbeda dalam pengelolaan sistem pertanian. Pertanian konvensional umumnya berorientasi pada peningkatan produksi melalui penggunaan input eksternal seperti pupuk dan pestisida kimia, sedangkan agroekologi menekankan keberlanjutan dengan memanfaatkan proses alami dalam ekosistem. Perbedaan ini memengaruhi aspek lingkungan, ekonomi, dan sosial dalam sistem pertanian (FAO, 2018; HLPE, 2019).

1. **Penggunaan Input Produksi**

   Pertanian konvensional sangat bergantung pada input eksternal seperti pupuk kimia, pestisida sintetis, dan benih unggul untuk meningkatkan hasil produksi dalam jangka pendek. Sebaliknya, agroekologi lebih mengutamakan penggunaan input alami dan lokal, seperti pupuk organik dan pengendalian hayati, sehingga mengurangi ketergantungan pada bahan kimia (Altieri, 2018; FAO, 2018).

   Contoh: Pertanian konvensional menggunakan pestisida kimia untuk mengendalikan hama, sedangkan agroekologi memanfaatkan musuh alami seperti predator serangga.

2. **Dampak terhadap Lingkungan**

   Pertanian konvensional cenderung memberikan dampak negatif terhadap lingkungan, seperti pencemaran tanah dan air serta penurunan keanekaragaman hayati akibat penggunaan bahan kimia secara intensif. Sebaliknya, agroekologi berfokus pada pelestarian lingkungan melalui peningkatan keanekaragaman hayati, konservasi tanah, dan pengelolaan sumber daya secara berkelanjutan (HLPE, 2019; Wezel et al., 2020).

   Contoh: Penggunaan pupuk kimia secara berlebihan dapat mencemari air tanah, sedangkan penggunaan kompos dalam agroekologi menjaga kualitas tanah dan air.

3. **Produktivitas dan Keberlanjutan**

   Pertanian konvensional sering menghasilkan produktivitas tinggi dalam jangka pendek, tetapi dapat menurunkan kesuburan tanah dan produktivitas dalam

jangka panjang. Agroekologi mungkin tidak selalu memberikan hasil maksimal dalam jangka pendek, tetapi mampu menjaga produktivitas secara stabil dan berkelanjutan dalam jangka panjang (Gliessman, 2018; FAO, 2018).

Contoh: Monokultur dalam pertanian konvensional rentan terhadap serangan hama, sedangkan sistem diversifikasi dalam agroekologi lebih stabil terhadap gangguan.

4. Ketahanan terhadap Perubahan Iklim

Agroekologi memiliki tingkat ketahanan (resilience) yang lebih tinggi terhadap perubahan iklim dibandingkan pertanian konvensional karena sistemnya lebih beragam dan berbasis ekologi. Sementara itu, pertanian konvensional yang bersifat monokultur cenderung lebih rentan terhadap perubahan cuaca ekstrem dan serangan hama (HLPE, 2019; Wezel et al., 2020).

Contoh: Sistem agroforestri lebih tahan terhadap kekeringan dibandingkan lahan monokultur.

5. Aspek Sosial dan Ekonomi

Pertanian konvensional sering kali bergantung pada modal besar dan teknologi tinggi, sehingga kurang menguntungkan bagi petani kecil. Sebaliknya, agroekologi lebih mendukung pemberdayaan petani melalui pemanfaatan sumber daya lokal, pengurangan biaya produksi, dan penguatan ekonomi lokal (FAO, 2018; Wezel et al., 2020).

Contoh: Petani agroekologi dapat memproduksi pupuk sendiri, sehingga mengurangi biaya produksi dibandingkan membeli pupuk kimia.

BAB 2
KONSEP KETAHANAN PANGAN

2.1 Definisi dan Dimensi Ketahanan Pangan

Ketahanan pangan merupakan konsep fundamental dalam pembangunan pertanian dan kesejahteraan masyarakat yang terus berkembang, baik secara konseptual maupun operasional. Secara umum, ketahanan pangan didefinisikan sebagai kondisi terpenuhinya kebutuhan pangan bagi setiap individu yang mencakup aspek ketersediaan, aksesibilitas, kualitas, dan keberlanjutan, sehingga memungkinkan setiap orang hidup sehat, aktif, dan produktif. Dalam konteks kebijakan, ketahanan pangan tidak hanya berkaitan dengan kemampuan produksi pangan, tetapi juga mencerminkan kemampuan sistem pangan dalam menjamin distribusi yang merata dan terjangkau bagi seluruh lapisan masyarakat.

Seiring dengan dinamika sistem pangan global, perubahan kondisi sosial ekonomi, serta meningkatnya tekanan lingkungan, ketahanan pangan dipahami sebagai konsep yang multidimensional dan dinamis. Sejak mulai mendapat perhatian luas pada tahun 1970-an, konsep ini telah berkembang menjadi isu strategis baik di negara berkembang maupun di negara maju (Makombe, 2023). Ketahanan pangan didefinisikan sebagai kondisi ketika seluruh individu, setiap saat, memiliki akses fisik, sosial, dan ekonomi terhadap pangan yang cukup, aman, dan bergizi untuk memenuhi kebutuhan hidup yang aktif dan sehat (FAO *et al.*, 2023).

Dalam perkembangannya, ketahanan pangan tidak dapat direduksi hanya pada aspek ketersediaan pangan semata, melainkan merupakan hasil interaksi berbagai faktor ekonomi, sosial, dan kebijakan publik. Hal ini menunjukkan bahwa ketahanan pangan berkaitan erat dengan pertumbuhan ekonomi, stabilitas harga, serta upaya pengentasan kemiskinan, sehingga memerlukan pendekatan lintas sektor dalam pelaksanaannya (Salasa, 2021). Selain itu, literatur kontemporer juga menekankan pentingnya kualitas dan keberlanjutan, termasuk aspek keamanan pangan dan kecukupan gizi, yang menegaskan bahwa ketahanan pangan tidak hanya berorientasi pada kuantitas, tetapi juga pada kualitas konsumsi serta stabilitas sistem pangan dalam jangka panjang (Abidin, 2024).

Ketahanan pangan juga tidak dapat disederhanakan menjadi persoalan peningkatan produksi pangan semata. Pendekatan yang terlalu berorientasi pada produksi berpotensi mengabaikan aspek akses, distribusi, dan pemanfaatan pangan (Makombe, 2023). Oleh karena itu, pendekatan ketahanan pangan perlu dilakukan secara komprehensif dengan mempertimbangkan seluruh rantai sistem pangan.

Dalam perspektif yang lebih luas, ketahanan pangan merupakan bagian dari sistem pangan (*food system*) yang mencakup produksi, distribusi, konsumsi, hingga pengelolaan limbah pangan. Pendekatan ini menekankan pentingnya interaksi antara aktor, kebijakan, dan teknologi dalam membentuk kinerja sistem pangan (Fróna *et al.*, 2026; Chiera *et al.*, 2025). Dalam konteks ini, ketahanan pangan juga mencerminkan stabilitas sosial, ekonomi, dan politik suatu negara, serta berperan penting dalam menjaga ketahanan ekonomi terhadap berbagai guncangan (Androshchuk *et al.*, 2025).

Secara konseptual, ketahanan pangan memiliki 4 dimensi utama, yaitu ketersediaan (*availability*), akses (*access*), pemanfaatan (*utilization*), dan stabilitas (*stability*), yang saling berkaitan. Namun, perkembangan terbaru memperluas kerangka ini dengan menambahkan dimensi *agency* dan *sustainability* untuk memberikan pemahaman yang lebih komprehensif mengenai peran aktor serta keberlanjutan sistem pangan dalam jangka panjang (Clapp *et al.*, 2025; Chiera *et al.*, 2025).

Pada tingkat lokal, ketahanan pangan juga dipengaruhi oleh kapasitas aktor, peran kelembagaan, serta akses terhadap informasi dan teknologi, termasuk peran kelompok tani dan penyuluhan pertanian (Shaliza *et al.*, 2025a; Shaliza *et al.*, 2025b). Hal ini menunjukkan bahwa ketahanan pangan tidak hanya ditentukan oleh faktor struktural, tetapi juga oleh dinamika sosial dan kelembagaan di tingkat akar rumput. Selain itu, ketahanan pangan perlu dipahami pada berbagai tingkatan, mulai dari individu, rumah tangga, hingga tingkat nasional dan global. Kondisi ketahanan pangan pada tingkat nasional tidak selalu mencerminkan kondisi pada tingkat rumah tangga (Palkovič, 2024). Oleh karena itu, pemahaman ketahanan pangan perlu dilakukan secara berjenjang agar mampu menggambarkan kondisi yang lebih akurat dan komprehensif. Dimensi-dimensi tersebut selanjutnya menjadi dasar dalam perumusan pilar-pilar ketahanan pangan sebagai kerangka pemahaman utama.

2.2 Pilar-Pilar Ketahanan Pangan: Ketersediaan, Akses, Pemanfaatan, dan Stabilitas

Konsep ketahanan pangan secara klasik merujuk pada 4 pilar utama, yaitu ketersediaan (*availability*), akses (*access*), pemanfaatan (*utilization*), dan stabilitas (*stability*) (FAO *et al.*, 2023). Keempat pilar ini saling berkaitan dan membentuk suatu sistem yang utuh, sehingga ketahanan pangan tidak dapat dipahami secara parsial (Makombe, 2023; Sommano *et al.*, 2025). Keterkaitan antarpilar tersebut menunjukkan bahwa gangguan pada satu aspek dapat memengaruhi keseluruhan sistem ketahanan pangan.

Pilar ketersediaan pangan berkaitan dengan keberadaan pangan dalam jumlah yang cukup, baik melalui produksi domestik, cadangan pangan, maupun impor. Dalam konteks ini, kebijakan cadangan pangan menjadi instrumen strategis untuk menjaga stabilitas pasokan dan menghadapi krisis (Agustian *et al.*, 2026). Dengan demikian, ketersediaan pangan tidak hanya ditentukan oleh tingkat produksi, tetapi juga oleh pengelolaan stok dan efektivitas sistem distribusi.

Pilar akses pangan merujuk pada kemampuan individu atau rumah tangga untuk memperoleh pangan, baik secara ekonomi maupun secara fisik. Akses ini dipengaruhi oleh berbagai faktor, termasuk kondisi sosial dan ekonomi, infrastruktur, serta distribusi spasial pasar dan transportasi (Blekking *et al.*, 2026). Selain itu, akses terhadap informasi dan teknologi pertanian juga berperan penting dalam meningkatkan kapasitas petani dalam pengambilan keputusan dan pengelolaan usaha tani (Kusumadinata *et al.*, 2020). Hal ini menunjukkan bahwa akses pangan tidak hanya bersifat fisik dan ekonomi, tetapi juga mencakup dimensi informasi dan kapasitas individu.

Pilar pemanfaatan pangan berkaitan dengan bagaimana pangan dikonsumsi dan dimanfaatkan oleh tubuh, termasuk aspek gizi, keamanan pangan, serta pola konsumsi. Ketidakseimbangan dalam pemanfaatan pangan dapat menyebabkan masalah gizi, meskipun ketersediaan pangan sudah mencukupi (Sommano *et al.*, 2025). Oleh karena itu, pemanfaatan pangan menekankan pentingnya kualitas konsumsi serta pemenuhan kebutuhan gizi masyarakat secara optimal.

Pilar stabilitas pangan menekankan keberlanjutan ketersediaan, akses, dan pemanfaatan pangan dalam menghadapi berbagai guncangan, baik jangka pendek maupun jangka panjang. Faktor-faktor seperti konflik, perubahan iklim, dan krisis

ekonomi dapat mengganggu stabilitas sistem pangan (Androshchuk *et al.*, 2025). Selain itu, risiko dalam sektor pertanian, seperti risiko produksi, pasar, dan lingkungan, juga berkontribusi terhadap ketidakstabilan pangan (Syahputra *et al.*, 2024). Dengan demikian, stabilitas pangan berkaitan erat dengan kemampuan sistem pangan dalam mengelola risiko serta menjaga keberlanjutannya.

Dalam pendekatan awal, ketahanan pangan cenderung difokuskan pada aspek ketersediaan dan keterjangkauan pangan. Namun, pendekatan tersebut dinilai belum memadai karena mengabaikan aspek distribusi serta kemampuan masyarakat untuk mengakses pangan secara merata (Salasa, 2021). Oleh karena itu, konsep ketahanan pangan berkembang dengan memasukkan dimensi pemanfaatan yang mencakup aspek gizi dan keamanan pangan, serta dimensi stabilitas yang menekankan keberlanjutan akses pangan dalam jangka panjang.

Lebih lanjut, pendekatan modern terhadap ketahanan pangan juga mengintegrasikan dimensi kualitas pangan serta resiliensi terhadap perubahan lingkungan. Hal ini tercermin dalam berbagai kerangka pengukuran global yang tidak hanya mempertimbangkan ketersediaan dan akses, tetapi juga kualitas konsumsi serta ketahanan terhadap risiko eksternal seperti perubahan iklim dan krisis global (Tono *et al.*, 2023). Dengan demikian, pilar-pilar ketahanan pangan bersifat dinamis dan terus berkembang seiring meningkatnya kompleksitas tantangan dalam sistem pangan global.

2.3 Indikator dan Pengukuran Ketahanan Pangan

Pengukuran ketahanan pangan merupakan aspek penting untuk memahami kondisi aktual sekaligus merumuskan kebijakan yang tepat. Namun, pengukuran ini menghadapi tantangan karena melibatkan berbagai dimensi dan tingkatan yang saling berkaitan (Makombe, 2023). Kompleksitas tersebut menyebabkan tidak ada satu indikator pun yang mampu menggambarkan ketahanan pangan secara menyeluruh.

Berbagai indikator telah dikembangkan untuk mengukur ketahanan pangan, baik pada tingkat global maupun nasional. Salah satu indikator global yang banyak digunakan adalah Global Food Security Index (GFSI), yang mengintegrasikan dimensi ketersediaan, akses, kualitas, dan keamanan pangan, serta aspek sumber daya dan resiliensi. Namun demikian, indikator ini memiliki keterbatasan dalam menangkap kondisi spesifik wilayah dan konteks lokal (Palkovič, 2024).

Selain itu, pendekatan lain menggunakan indeks komposit yang menggabungkan berbagai indikator pada setiap pilar ketahanan pangan, yang dinilai lebih komprehensif dalam menggambarkan kondisi ketahanan pangan (Khatoon, Rajput dan Khan, 2026). Namun, pengukuran ini menghadapi tantangan karena melibatkan berbagai dimensi dan tingkatan pemahaman yang saling berkaitan. Pada tingkat nasional, pengukuran ketahanan pangan di Indonesia juga dilakukan melalui Food Security and Vulnerability Atlas (FSVA) yang digunakan untuk mengidentifikasi wilayah yang rentan terhadap kerawanan pangan. Instrumen ini memberikan gambaran tentang ketahanan pangan tidak hanya dari sisi produksi, tetapi juga distribusi, konsumsi, dan kerentanan wilayah (Tono *et al.*, 2023).

Meskipun demikian, pengukuran ketahanan pangan masih menghadapi berbagai tantangan, terutama terkait keterbatasan data serta kompleksitas indikator yang digunakan. Beberapa aspek, seperti kualitas pangan, akses ekonomi, dan ketahanan terhadap perubahan iklim, sering kali sulit diukur secara akurat, sehingga diperlukan pendekatan pengukuran yang lebih integratif dan adaptif. Selain indikator berbasis sistem pangan, kapasitas petani, dukungan kelembagaan, serta akses terhadap sumber daya juga menjadi indikator penting, khususnya pada tingkat rumah tangga (Managanta *et al.*, 2022; Sudarko *et al.*, 2020). Hal ini menunjukkan bahwa pengukuran ketahanan pangan tidak hanya bersifat makro, tetapi juga perlu mempertimbangkan dimensi mikro serta aktor yang terlibat di dalamnya.

Ketahanan pangan merupakan konsep multidimensi yang mencakup ketersediaan, akses, pemanfaatan, stabilitas, kualitas, dan keamanan pangan. Makombe menempatkan pengukuran ketahanan pangan pada tingkat mikro, meso, dan makro agar pemahamannya dapat menjangkau rumah tangga, komunitas, hingga wilayah yang lebih luas. Paković memandang Global Food Security Index sebagai kerangka yang berguna untuk membaca keterjangkauan, ketersediaan, kualitas, dan keamanan pangan, meskipun penerapannya tetap perlu memperhatikan konteks lokal. Khatoon memperkuat pemahaman tersebut melalui indeks komposit yang menggabungkan unsur ketersediaan, akses, dan pemanfaatan. Sementara itu, Bleking menekankan pentingnya aspek spasial, distribusi pangan, dan infrastruktur fisik dalam menggambarkan hubungan antara wilayah, akses pangan, dan daya dukung sistem pangan.

Ketahanan pangan juga berkaitan erat dengan tata kelola pangan dan keberlanjutan sumber daya. Agustian menyoroti peran ketersediaan pangan, volume cadangan pangan, dan kebijakan lokal dalam menjaga kesinambungan stok pangan. Fróna memperluas pemahaman tersebut melalui sistem pangan yang berorientasi pada keberlanjutan, terutama melalui perhatian terhadap food waste, efisiensi, dan penggunaan sumber daya. Sommarno menempatkan akses pangan, kualitas pangan, dan keamanan pangan sebagai unsur penting dalam memahami kondisi konsumsi dan gizi masyarakat. Dengan demikian, ketahanan pangan tidak hanya bergantung pada jumlah produksi, tetapi juga pada cara pangan dikelola, disalurkan, dimanfaatkan, dan dipertahankan secara bertanggung jawab agar mampu mendukung kebutuhan masyarakat dalam jangka panjang.

Aspek sosial, ekonomi, dan lingkungan turut membentuk ketahanan pangan secara menyeluruh. Manazanganta menekankan kapasitas petani dan produktivitas sebagai unsur pendukung kemampuan produksi pangan. Sudarko menghubungkan kemandirian dan kapasitas agribisnis dengan daya tahan pangan masyarakat. Kusumadinata memandang komunikasi risiko sebagai sarana penting dalam penyebaran informasi mengenai akses dan kualitas pangan. Saleh menempatkan modal sosial, seperti kepercayaan dan jaringan sosial, sebagai penopang ketahanan ekonomi dan pangan. Kaya menyoroti risiko iklim, curah hujan, dan kekeringan sebagai faktor eksternal yang dapat memengaruhi stabilitas pangan. Sumardjo melengkapi pemahaman ini melalui adaptasi ekologi, yaitu kemampuan masyarakat menyesuaikan diri terhadap perubahan lingkungan yang terus berlangsung.

Dapat dilihat bahwa pengukuran ketahanan pangan mengalami perkembangan dari pendekatan sederhana menuju pendekatan yang lebih kompleks dan multidimensional. Pada awalnya, pengukuran cenderung berfokus pada aspek ketersediaan pangan, terutama dalam bentuk produksi dan cadangan pangan. Namun, pendekatan tersebut tidak lagi memadai untuk menggambarkan kondisi ketahanan pangan secara menyeluruh (Makombe, 2023).

Pendekatan kontemporer menekankan bahwa ketahanan pangan harus diukur melalui kombinasi berbagai indikator yang mencerminkan dimensi ketersediaan, akses, pemanfaatan, dan stabilitas. Hal ini tercermin dalam penggunaan indeks komposit seperti GFSI (Palkovič, 2024) serta pendekatan pembobotan statistik (Khatoon *et al.*, 2026), yang mengintegrasikan berbagai variabel untuk

menghasilkan gambaran yang lebih komprehensif. Lebih lanjut, perkembangan metode pengukuran menunjukkan adanya pergeseran dari pendekatan agregat menuju pendekatan yang lebih kontekstual dan spasial. Penggunaan data spasial dan pendekatan geografis memungkinkan identifikasi ketimpangan akses pangan secara lebih rinci pada tingkat wilayah (Blekking *et al.*, 2026). Pendekatan ini menegaskan bahwa ketahanan pangan bersifat tidak merata dan sangat dipengaruhi oleh kondisi geografis serta infrastruktur.

Indikator sosial dan kapasitas juga semakin mendapat perhatian dalam pengukuran ketahanan pangan, khususnya pada tingkat rumah tangga dan petani. Kapasitas petani, kemandirian, serta dukungan kelembagaan menjadi faktor penting dalam mengelola sumber daya dan menghadapi risiko (Managanta *et al.*, 2022; Sudarko *et al.*, 2020). Di sisi lain, modal sosial dan jaringan juga berperan dalam meningkatkan akses terhadap sumber daya serta ketahanan ekonomi (Saleh *et al.*, 2017).

Dalam konteks modern, indikator ketahanan pangan juga diperluas dengan memasukkan aspek keberlanjutan dan efisiensi sistem pangan, seperti pengurangan limbah pangan serta pengelolaan sumber daya. Hal ini menunjukkan bahwa ketahanan pangan tidak hanya berorientasi pada pemenuhan kebutuhan saat ini, tetapi juga pada keberlanjutan sistem pangan di masa depan (Fróna et al., 2026). Berdasarkan berbagai indikator tersebut, pengukuran ketahanan pangan dapat diklasifikasikan ke dalam beberapa kelompok utama sebagai berikut:

1. Indikator klasik (*core indicators*) mencakup ketersediaan, akses, pemanfaatan, dan stabilitas pangan yang menjadi dasar dalam berbagai kerangka pemahaman global maupun nasional. (Makombe, 2023; Palkovič, 2024).
2. Indikator turunan (*derived indicators*) berkembang untuk menangkap dinamika sistem pangan secara lebih spesifik, seperti akses spasial, cadangan pangan, infrastruktur distribusi, serta efisiensi sistem pangan (*food waste*) (Blekking *et al.*, 2026; Agustian *et al.*, 2026; Fróna *et al.*, 2026).
3. Indikator sosial dan kapasitas (*capacity-based indicators*) menekankan peran aktor dalam sistem pangan, seperti kapasitas petani, kemandirian,

modal sosial, serta akses terhadap informasi (Managanta *et al.*, 2022; Sudarko *et al.*, 2020; Saleh *et al.*, 2017).

Klasifikasi ini menunjukkan bahwa pengukuran ketahanan pangan telah berkembang dari pendekatan yang berorientasi pada ketersediaan menuju pendekatan yang lebih komprehensif, mencakup aspek sistem, kapasitas, dan keberlanjutan. Perkembangan indikator juga menunjukkan bahwa pendekatan pengukuran tidak lagi terbatas pada aspek fisik dan ekonomi, tetapi juga mencakup dimensi informasi, kapasitas aktor, serta aspek kelembagaan. Akses terhadap informasi pertanian dan kualitas komunikasi menjadi faktor penting dalam mendukung pengambilan keputusan petani (Kusumadinata *et al.*, 2020).

Dalam konteks ini, pemanfaatan Teknologi Informasi dan Komunikasi (TIK) menjadi indikator yang semakin relevan dalam ketahanan pangan modern. TIK tidak hanya berfungsi sebagai sarana penyebaran informasi, tetapi juga sebagai alat untuk meningkatkan efisiensi produksi, akses pasar, serta kemampuan beradaptasi terhadap perubahan lingkungan. Dengan demikian, indikator berbasis TIK dapat diposisikan sebagai bagian dari indikator akses informasi dan kapasitas adaptif. Selain itu, peran kelembagaan, khususnya kepemimpinan kelompok tani, juga menjadi faktor kunci dalam memperkuat ketahanan pangan pada tingkat lokal. Kepemimpinan yang efektif mampu mendorong distribusi informasi, meningkatkan partisipasi anggota, serta memperkuat kerja sama dalam kelompok tani. Hal ini menunjukkan bahwa kepemimpinan kelompok berkaitan dengan ketahanan pangan melalui peningkatan kapasitas dan kemandirian petani (Shaliza *et al.*, 2025a; Shaliza *et al.*, 2025b).

Dengan demikian, pengukuran ketahanan pangan ke depan tidak hanya mempertimbangkan indikator klasik, tetapi juga indikator baru yang mencerminkan kapasitas adaptif, akses terhadap informasi, serta peran kelembagaan dan kepemimpinan. Pendekatan ini penting untuk menghasilkan pengukuran yang lebih kontekstual, terutama pada tingkat petani dan rumah tangga.

Selain itu, pengukuran ketahanan pangan juga perlu mempertimbangkan indikator risiko, seperti risiko produksi, harga, dan lingkungan. Pemanfaatan teknologi digital, seperti sensor dan Internet of Things (IoT), memungkinkan pemantauan kondisi lingkungan serta pengambilan keputusan yang lebih akurat, sehingga

berkontribusi pada peningkatan ketahanan sistem pertanian dan pangan (Syahputra *et al.*, 2024).

2.4 Ketahanan Pangan dalam Konteks Global dan Nasional

Ketahanan pangan merupakan isu global yang semakin mendapat perhatian dalam konteks pembangunan berkelanjutan dan upaya pengentasan kelaparan. Peningkatan jumlah penduduk dunia, perubahan iklim, serta dinamika ekonomi global telah menyebabkan kebutuhan pangan terus meningkat secara signifikan. Di sisi lain, kapasitas produksi pangan menghadapi berbagai keterbatasan, seperti degradasi sumber daya alam dan alih fungsi lahan, yang berpotensi mengganggu keseimbangan antara permintaan dan ketersediaan pangan (Abidin, 2024).

Urgensi ketahanan pangan semakin menguat seiring munculnya berbagai tantangan global, seperti gangguan pada rantai pasok, krisis ekonomi, dan ketidakpastian iklim. Bahkan di negara maju, permasalahan seperti *food waste* dan ketimpangan akses pangan masih menjadi isu yang signifikan. Kondisi ini menunjukkan bahwa ketahanan pangan bukan hanya persoalan lokal atau nasional, melainkan isu universal yang dipengaruhi oleh dinamika global yang saling terhubung (Fróna *et al.*, 2026).

Dalam konteks nasional, ketahanan pangan berkaitan erat dengan kebijakan pemerintah, sistem pertanian, dan kapasitas produksi domestik. Sektor pertanian tetap menjadi fondasi penting dalam menjamin ketersediaan pangan, sementara kebijakan pemerintah berperan dalam menjaga keberlanjutan sistem pangan nasional (Androshchuk *et al.*, 2025). Di Indonesia, penguatan ketahanan pangan juga dilakukan melalui kebijakan cadangan pangan dan penguatan kelembagaan petani. Kebijakan tersebut menjadi instrumen penting untuk menjaga stabilitas pangan nasional (Agustian *et al.*, 2026).

Pada tingkat lokal, ketahanan pangan tidak hanya ditentukan oleh kebijakan makro, tetapi juga oleh kekuatan sosial di masyarakat. Dalam hal ini, modal sosial dan kapasitas masyarakat menjadi faktor penting dalam memperkuat ketahanan pangan (Saleh *et al.*, 2017). Hal ini menunjukkan bahwa keberhasilan pembangunan ketahanan pangan bergantung pada keterkaitan antara kebijakan nasional dan kapasitas aktor lokal.

Dalam konteks Indonesia, ketahanan pangan masih menghadapi berbagai tantangan. Secara global, posisi ketahanan pangan Indonesia berada pada kategori menengah, dengan peringkat ke-69 dalam Global Food Security Index. Meskipun secara nasional kondisi ketahanan pangan tergolong cukup baik, masih terdapat sejumlah wilayah yang rentan terhadap kerawanan pangan, terutama di daerah dengan keterbatasan infrastruktur dan akses terhadap sumber daya (Tono *et al.*, 2023).

Selain itu, tekanan global seperti pandemi COVID-19 telah memberikan dampak signifikan terhadap sistem pangan, termasuk gangguan pada rantai pasok, fluktuasi harga, dan penurunan daya beli masyarakat. Kondisi ini menunjukkan bahwa ketahanan pangan tidak hanya dipengaruhi oleh faktor domestik, tetapi juga sangat rentan terhadap perubahan situasi global (Rasman *et al.*, 2023). Dengan demikian, ketahanan pangan nasional perlu dipahami sebagai bagian dari sistem global yang saling terintegrasi.

Oleh karena itu, penguatan ketahanan pangan memerlukan pendekatan yang tidak hanya berfokus pada peningkatan produksi, tetapi juga pada penguatan distribusi, perlindungan bagi kelompok rentan, serta peningkatan kapasitas masyarakat. Pendekatan ini menegaskan pentingnya integrasi antara kebijakan nasional, kondisi lokal, dan dinamika global dalam membangun sistem ketahanan pangan yang berkelanjutan dan tangguh.

2.5 Tantangan Ketahanan Pangan di Era Modern

Ketahanan pangan di era modern menghadapi tantangan yang semakin kompleks akibat perubahan lingkungan, ekonomi, dan sosial. Perubahan iklim, konflik, serta berbagai krisis global meningkatkan kerentanan sistem pangan secara signifikan (Androshchuk *et al.*, 2025; Fróna *et al.*, 2026). Kondisi ini menunjukkan bahwa sistem pangan saat ini berada dalam tekanan multidimensional yang saling terhubung.

Salah satu tantangan utama adalah perubahan iklim yang berdampak langsung pada produktivitas pertanian dan ketersediaan air. Perubahan ini meningkatkan ketidakpastian produksi serta risiko kegagalan panen (Kaya, 2026). Selain itu, urbanisasi dan ketimpangan infrastruktur turut memengaruhi akses terhadap pangan, terutama di wilayah perkotaan. Ketimpangan distribusi dan keterbatasan akses fisik menjadi faktor utama yang memicu kerawanan pangan (Blekking *et al.*,

2026). Hal ini menegaskan bahwa permasalahan ketahanan pangan tidak hanya berkaitan dengan produksi, tetapi juga distribusi dan aksesibilitas.

Di sisi lain, kemampuan adaptasi masyarakat terhadap perubahan lingkungan menjadi faktor kunci dalam menjaga ketahanan pangan. Adaptasi sosial dan ekologi diperlukan untuk menghadapi dinamika perubahan yang semakin cepat (Sumardjo *et al.*, 2019). Kemampuan adaptif ini menjadi penentu penting dalam meningkatkan resiliensi sistem pangan, khususnya pada tingkat lokal.

Tantangan lain yang tidak kalah penting adalah inefisiensi sistem pangan, seperti tingginya *food waste*, yang berdampak pada ketersediaan pangan dan keberlanjutan lingkungan. Pengurangan limbah pangan menjadi salah satu strategi penting untuk meningkatkan efisiensi dan ketahanan sistem pangan (Fróna *et al.*, 2026). Ketahanan pangan juga menghadapi berbagai risiko yang berasal dari ketidakpastian produksi, perubahan iklim, serta fluktuasi harga komoditas pertanian. Fluktuasi harga yang tidak stabil dapat menurunkan daya beli masyarakat dan memengaruhi keterjangkauan pangan, terutama bagi kelompok rentan (Syahputra *et al.*, 2024). Dengan demikian, risiko ekonomi menjadi faktor penting dalam menentukan stabilitas ketahanan pangan.

Di sisi struktural, alih fungsi lahan pertanian menjadi kawasan permukiman dan industri turut mempersempit kapasitas produksi pangan. Kondisi ini diperparah oleh keterbatasan akses petani terhadap teknologi, modal, dan informasi, yang berdampak pada rendahnya produktivitas dan daya saing sektor pertanian (Abidin, 2024). Dalam aspek kebijakan, pembangunan ketahanan pangan juga menghadapi berbagai tantangan dalam pelaksanaannya. Program strategis seperti *food estate*, yang dirancang untuk meningkatkan produksi pangan, masih menghadapi kendala dalam perencanaan, konflik lahan, serta potensi dampak lingkungan (Rasman *et al.*, 2023).

Selain itu, pendekatan kebijakan yang terlalu berfokus pada peningkatan produksi sering kali mengabaikan aspek distribusi dan akses pangan, sehingga belum mampu menjawab persoalan ketahanan pangan secara menyeluruh (Salasa, 2021). Hal ini menunjukkan adanya kesenjangan antara pendekatan kebijakan dan kompleksitas permasalahan di lapangan. Oleh karena itu, diperlukan pendekatan yang lebih komprehensif dan berkelanjutan dalam pembangunan ketahanan pangan. Pendekatan ini tidak hanya berfokus pada peningkatan produksi, tetapi juga mencakup penguatan kapasitas petani, pemerataan distribusi pangan, serta

peningkatan kualitas konsumsi masyarakat. Dengan demikian, ketahanan pangan di era modern harus dipahami sebagai konsep yang kompleks dan multidimensional yang menuntut pendekatan terintegrasi antara aspek produksi, distribusi, kapasitas aktor, serta dinamika global untuk membangun sistem pangan yang berkelanjutan dan resilien.

BAB 3
EKOSISTEM PERTANIAN DAN AGROSISTEM

3.1 Pengertian Ekosistem Pertanian (Agrosistem)

Ekosistem pertanian merupakan salah satu bentuk interaksi antara manusia dan lingkungan yang dirancang untuk memenuhi kebutuhan pangan, serat, serta bahan baku industri. Keberadaan sistem ini tidak hanya mencerminkan aktivitas budidaya semata, tetapi juga menggambarkan hubungan kompleks antara komponen hidup dan tidak hidup yang saling memengaruhi. Dinamika yang terjadi di dalamnya menunjukkan bahwa pertanian bukan sekadar usaha produksi, melainkan suatu sistem ekologis yang memiliki keseimbangan, keteraturan, serta ketergantungan antarunsur yang membentuknya.

3.1.1 Konsep Dasar Ekosistem Pertanian

Ekosistem pertanian atau agrosistem merupakan suatu sistem ekologi yang terbentuk dari interaksi antara organisme hidup seperti tanaman, hewan, dan mikroorganisme dengan faktor lingkungan fisik seperti tanah, air, udara, dan cahaya matahari yang dikelola oleh manusia untuk tujuan produksi. Keunikan agrosistem terletak pada adanya campur tangan manusia secara intensif dalam mengatur komponen dan proses yang terjadi di dalamnya. Tanaman budidaya menjadi komponen utama yang dipelihara, sementara organisme lain seperti gulma, hama, dan patogen sering dianggap sebagai pengganggu yang perlu dikendalikan. Keteraturan dalam pengelolaan ini menjadikan agrosistem memiliki struktur yang lebih sederhana dibandingkan dengan ekosistem alami, tetapi tetap memiliki dinamika yang kompleks.

Produktivitas menjadi fokus utama dalam sistem ini, sehingga berbagai input seperti pupuk, pestisida, dan teknologi digunakan untuk meningkatkan hasil. Interaksi antarkomponen tetap mengikuti prinsip ekologi, termasuk aliran energi dan siklus materi. Pemahaman konsep dasar ini penting agar pengelolaan pertanian tidak merusak keseimbangan lingkungan. Agrosistem juga mencerminkan

hubungan timbal balik antara manusia dan alam yang dijaga agar harmonis dan produktif dalam jangka panjang (Adams, Modi and Kuria, 2025).

Ekosistem pertanian tidak hanya berfungsi sebagai sistem produksi, tetapi juga sebagai sistem ekologis yang memiliki peran penting dalam menjaga keseimbangan lingkungan. Setiap komponen dalam agrosistem memiliki fungsi tertentu yang saling berkaitan dan memengaruhi satu sama lain. Tanaman sebagai produsen utama memanfaatkan energi matahari untuk menghasilkan bahan organik melalui proses fotosintesis. Organisme lain seperti serangga, burung, dan mikroorganisme berperan sebagai konsumen dan dekomposer yang membantu menjaga agar siklus kehidupan tetap berjalan.

Interaksi ini menciptakan jaringan kehidupan yang kompleks meskipun berada dalam sistem yang dikelola manusia. Perubahan pada satu komponen dapat berdampak pada keseluruhan sistem, sehingga pengelolaan yang tidak tepat dapat menyebabkan ketidakseimbangan ekologis. Praktik pertanian yang berlebihan seperti penggunaan bahan kimia secara intensif dapat merusak struktur tanah dan mengurangi keanekaragaman hayati. Pendekatan agroekologi mulai berkembang sebagai solusi untuk mengintegrasikan prinsip ekologi dalam sistem pertanian. Konsep ini menekankan pentingnya memanfaatkan proses alami untuk meningkatkan produktivitas dan keberlanjutan.

3.1.2 Perbedaan Ekosistem Alami dan Agrosistem

Ekosistem alami dan agrosistem memiliki perbedaan mendasar yang terletak pada tingkat campur tangan manusia dalam pengelolaannya. Ekosistem alami terbentuk secara alami tanpa intervensi manusia yang signifikan, sehingga memiliki tingkat keanekaragaman hayati yang tinggi dan struktur yang kompleks. Setiap organisme dalam ekosistem alami memiliki peran tertentu yang saling mendukung dalam menjaga keseimbangan sistem. Sebaliknya, agrosistem dirancang dan dikelola oleh manusia dengan tujuan utama untuk menghasilkan produk pertanian. Keanekaragaman dalam agrosistem cenderung lebih rendah karena hanya beberapa jenis tanaman yang dibudidayakan secara intensif. Kondisi ini menyebabkan sistem menjadi lebih rentan terhadap gangguan seperti serangan hama dan penyakit. Ekosistem alami memiliki mekanisme pengendalian alami yang kuat melalui interaksi antarorganisme, sedangkan dalam agrosistem mekanisme tersebut sering terganggu sehingga memerlukan intervensi tambahan.

Input eksternal seperti pupuk dan pestisida menjadi bagian penting dalam menjaga produktivitas agrosistem. Perbedaan lainnya terletak pada stabilitas sistem, di mana ekosistem alami cenderung lebih stabil dibandingkan dengan agrosistem yang bergantung pada pengelolaan manusia. Pemahaman terhadap perbedaan ini penting dalam mengembangkan sistem pertanian yang lebih berkelanjutan dengan mengadopsi prinsip-prinsip ekosistem alami (Yang, Xiong and Xiao, 2024).

Agrosistem sering mengalami tekanan lingkungan yang lebih besar dibandingkan dengan ekosistem alami karena intensitas pengelolaan yang tinggi dan penggunaan sumber daya yang terus-menerus. Praktik monokultur yang umum dalam pertanian modern menyebabkan penurunan keanekaragaman hayati dan meningkatkan risiko kegagalan panen akibat serangan hama atau perubahan iklim. Ekosistem alami memiliki kemampuan adaptasi yang lebih baik karena adanya variasi genetik dan interaksi kompleks antarspesies. Kondisi ini memungkinkan sistem untuk pulih dari gangguan secara alami tanpa memerlukan intervensi eksternal.

Agrosistem memerlukan pengelolaan yang hati-hati agar tetap produktif tanpa merusak lingkungan. Pendekatan pertanian berkelanjutan berusaha mengurangi kesenjangan antara agrosistem dan ekosistem alami dengan meningkatkan keanekaragaman tanaman, mengurangi penggunaan bahan kimia, dan memanfaatkan proses alami. Integrasi tanaman dan hewan dalam sistem pertanian juga menjadi salah satu strategi untuk meningkatkan efisiensi dan keberlanjutan (de la Riva *et al.*, 2023).

3.1.3 Peran Manusia dalam Pembentukan Agrosistem

Manusia memiliki peran sentral dalam pembentukan dan pengelolaan agrosistem karena seluruh aktivitas dalam sistem ini dirancang untuk memenuhi kebutuhan manusia. Proses domestikasi tanaman dan hewan merupakan langkah awal dalam pembentukan agrosistem yang kemudian berkembang menjadi sistem pertanian yang kompleks. Pemilihan varietas unggul, pengolahan tanah, pengaturan irigasi, serta penggunaan teknologi modern menjadi bagian dari intervensi manusia dalam meningkatkan produktivitas. Peran ini tidak hanya terbatas pada aspek produksi, tetapi juga mencakup pengelolaan sumber daya alam agar tetap tersedia dalam jangka panjang. Keputusan yang diambil oleh manusia dalam mengelola agrosistem sangat menentukan keberlanjutan sistem tersebut. Penggunaan input kimia yang berlebihan dapat meningkatkan hasil dalam jangka pendek, tetapi berpotensi merusak lingkungan dalam jangka panjang. Pendekatan yang lebih

bijaksana diperlukan untuk menyeimbangkan kebutuhan produksi dan konservasi lingkungan. Perkembangan teknologi pertanian memberikan peluang untuk meningkatkan efisiensi dan mengurangi dampak negatif terhadap lingkungan. Sistem pertanian modern mulai mengadopsi konsep pertanian presisi yang memanfaatkan data dan teknologi untuk mengoptimalkan penggunaan sumber daya (Zimmerer *et al.*, 2022).

Peran manusia dalam agrosistem juga mencakup tanggung jawab dalam menjaga keseimbangan ekologis dan keberlanjutan sistem pertanian. Praktik seperti rotasi tanaman, penggunaan pupuk organik, dan pengendalian hama secara hayati menjadi alternatif untuk mengurangi ketergantungan pada bahan kimia. Manusia sebagai pengelola memiliki kemampuan untuk mengarahkan sistem pertanian menuju kondisi yang lebih seimbang dan berkelanjutan. Pendidikan dan penyuluhan kepada petani menjadi kunci dalam meningkatkan pemahaman dan keterampilan dalam mengelola agrosistem secara efektif. Perubahan paradigma dari pertanian konvensional menuju pertanian berkelanjutan menunjukkan bahwa peran manusia tidak hanya sebagai pengguna sumber daya, tetapi juga sebagai penjaga keseimbangan ekosistem. Pendekatan yang holistik dan berbasis ekologi diharapkan dapat menciptakan sistem pertanian yang produktif, efisien, dan mampu bertahan menghadapi berbagai tantangan lingkungan di masa depan.

3.2 Komponen Biotik dan Abiotik dalam Agrosistem

Keberlangsungan sistem pertanian tidak hanya ditentukan oleh teknik budidaya, tetapi juga oleh hubungan kompleks antara makhluk hidup dan lingkungan fisiknya. Setiap unsur memiliki fungsi yang saling terkait dalam menjaga keseimbangan dan produktivitas lahan pertanian. Pemahaman terhadap komponen penyusun agrosistem menjadi dasar penting dalam mengelola sumber daya secara efisien, menjaga stabilitas ekologi, serta meningkatkan hasil pertanian secara berkelanjutan dalam menghadapi perubahan lingkungan yang dinamis.

3.2.1 Komponen Biotik dalam Ekosistem Pertanian

Komponen biotik dalam ekosistem pertanian mencakup seluruh makhluk hidup yang berperan langsung maupun tidak langsung dalam proses produksi dan keberlangsungan sistem tersebut. Tumbuhan budidaya seperti padi, jagung, dan kedelai menjadi produsen utama yang mengubah energi matahari menjadi bahan organik melalui fotosintesis. Keberadaan hewan seperti serangga, burung, dan

mamalia kecil memberikan pengaruh yang beragam, mulai dari membantu penyerbukan hingga menjadi hama yang merusak tanaman. Mikroorganisme tanah seperti bakteri, fungi, dan aktinomiset memainkan peran penting dalam dekomposisi bahan organik serta penyediaan unsur hara yang diperlukan tanaman. Interaksi antara organisme tersebut membentuk jaringan kehidupan yang kompleks dan saling bergantung.

Keseimbangan populasi menjadi faktor penting karena ketidakseimbangan dapat memicu ledakan hama atau menurunnya kesuburan tanah. Pengelolaan komponen biotik yang tepat memungkinkan peningkatan produktivitas tanpa merusak lingkungan. Praktik seperti rotasi tanaman, penggunaan musuh alami, serta pemanfaatan pupuk hayati merupakan contoh strategi yang mendukung keberlanjutan sistem. Keberadaan keanekaragaman hayati dalam komponen biotik juga meningkatkan ketahanan agrosistem terhadap gangguan eksternal seperti perubahan iklim dan serangan organisme pengganggu (Xiong and Lu, 2022).

Peran manusia dalam komponen biotik memiliki posisi yang sangat dominan karena manusia bertindak sebagai pengelola sekaligus pengendali sistem pertanian. Keputusan yang diambil oleh petani terkait jenis tanaman, pola tanam, serta penggunaan input pertanian akan memengaruhi keseimbangan ekosistem secara keseluruhan. Aktivitas seperti penggunaan pestisida kimia secara berlebihan dapat mengganggu keseimbangan populasi organisme, termasuk membunuh musuh alami hama. Pengelolaan yang bijak mendorong terciptanya interaksi harmonis antara berbagai komponen biotik sehingga sistem menjadi lebih stabil dan produktif. Organisme pengganggu seperti gulma, hama, dan penyakit merupakan bagian dari komponen biotik yang sering dianggap merugikan, namun keberadaannya juga menunjukkan dinamika alami dalam ekosistem. Pendekatan pengendalian terpadu menjadi solusi untuk menjaga keseimbangan tanpa merusak lingkungan. Sistem pertanian yang mengintegrasikan berbagai komponen biotik secara seimbang akan menghasilkan ekosistem yang lebih resilien. Peran mikroorganisme sebagai agen dekomposer dan penyedia nutrisi juga semakin diakui dalam praktik pertanian berkelanjutan.

3.2.2 Komponen Abiotik dan Pengaruhnya terhadap Produksi Pertanian

Komponen abiotik dalam agrosistem mencakup faktor-faktor fisik dan kimia yang memengaruhi kehidupan organisme di dalamnya. Tanah menjadi salah satu faktor utama yang menentukan keberhasilan pertanian karena berfungsi sebagai media tumbuh tanaman serta penyedia unsur hara. Struktur, tekstur, dan kandungan bahan organik dalam tanah sangat memengaruhi kemampuan tanaman dalam menyerap air dan nutrisi. Air merupakan komponen penting lainnya yang berperan dalam proses fisiologis tanaman seperti fotosintesis dan transpirasi. Faktor iklim seperti suhu, cahaya matahari, dan kelembapan udara juga memberikan pengaruh signifikan terhadap produktivitas pertanian. Intensitas cahaya yang cukup diperlukan untuk proses fotosintesis, sementara suhu yang sesuai akan mendukung pertumbuhan dan perkembangan tanaman. Unsur hara seperti nitrogen, fosfor, dan kalium menjadi faktor penentu dalam pembentukan biomassa tanaman. Keseimbangan unsur hara dalam tanah harus dijaga agar tanaman dapat tumbuh dengan baik dan menghasilkan panen yang optimal (Godwin *et al.*, 2022).

Pengaruh komponen abiotik terhadap produksi pertanian tidak dapat dipisahkan dari kondisi lingkungan yang terus berubah. Variabilitas iklim seperti perubahan pola curah hujan dan peningkatan suhu global memberikan tantangan besar bagi sistem pertanian. Adaptasi terhadap perubahan tersebut menjadi penting untuk menjaga stabilitas produksi. Teknologi pertanian modern seperti irigasi tetes, penggunaan varietas tahan kekeringan, dan pemupukan berbasis kebutuhan tanaman menjadi solusi dalam menghadapi keterbatasan faktor abiotik. Kondisi tanah yang mengalami degradasi akibat penggunaan bahan kimia berlebihan juga menjadi perhatian serius karena dapat menurunkan produktivitas jangka panjang. Upaya konservasi tanah dan air menjadi langkah penting dalam menjaga keberlanjutan agrosistem.

Praktik seperti penggunaan mulsa, terasering, dan penanaman tanaman penutup tanah membantu menjaga kelembapan serta mencegah erosi. Keterkaitan antara berbagai faktor abiotik menunjukkan bahwa perubahan pada satu faktor dapat memengaruhi keseluruhan sistem. Pemahaman mendalam terhadap karakteristik komponen abiotik memungkinkan pengelolaan yang lebih efektif dan efisien dalam meningkatkan hasil pertanian.

3.2.3 Interaksi antara Komponen Biotik dan Abiotik

Interaksi antara komponen biotik dan abiotik dalam agrosistem membentuk suatu sistem yang dinamis dan saling memengaruhi secara berkelanjutan. Tanaman sebagai komponen biotik sangat bergantung pada kondisi abiotik seperti tanah, air, dan cahaya matahari untuk melakukan proses fotosintesis dan pertumbuhan. Mikroorganisme dalam tanah memanfaatkan bahan organik dan kondisi lingkungan untuk menjalankan proses dekomposisi yang menghasilkan unsur hara bagi tanaman. Hubungan ini menunjukkan adanya keterkaitan yang erat antara unsur hidup dan tak hidup dalam menjaga keseimbangan ekosistem. Perubahan pada salah satu komponen dapat memengaruhi komponen lainnya secara langsung maupun tidak langsung. Kondisi tanah yang miskin nutrisi akan memengaruhi pertumbuhan tanaman dan pada akhirnya berdampak pada populasi organisme lain yang bergantung pada tanaman tersebut. Interaksi ini juga mencakup hubungan simbiosis seperti antara tanaman dan bakteri pengikat nitrogen yang membantu meningkatkan kesuburan tanah. Keberlanjutan agrosistem sangat ditentukan oleh keseimbangan interaksi tersebut.

Pengelolaan interaksi antara komponen biotik dan abiotik menjadi kunci dalam menciptakan sistem pertanian yang produktif dan berkelanjutan. Pendekatan ekologi dalam pertanian menekankan pentingnya memahami hubungan tersebut untuk mengoptimalkan hasil tanpa merusak lingkungan. Praktik seperti agroforestri dan pertanian organik menunjukkan bagaimana interaksi antara komponen biotik dan abiotik dapat dimanfaatkan secara optimal. Penggunaan pupuk organik meningkatkan aktivitas mikroorganisme tanah sekaligus memperbaiki struktur tanah. Keseimbangan antara organisme hidup dan faktor lingkungan menciptakan sistem yang lebih stabil dan tahan terhadap gangguan eksternal. Pemanfaatan teknologi berbasis lingkungan juga membantu dalam memonitor kondisi abiotik seperti kelembapan tanah dan suhu udara untuk mendukung pertumbuhan tanaman. Integrasi antara ilmu pengetahuan dan praktik lapangan menjadi penting dalam mengelola interaksi tersebut. Kesadaran akan pentingnya hubungan antara komponen biotik dan abiotik mendorong terciptanya sistem pertanian yang lebih ramah lingkungan dan berkelanjutan dalam jangka (Belmin *et al.*, 2022).

3.3 Aliran Energi dan Siklus Materi dalam Agrosistem

Agrosistem merupakan suatu sistem yang dinamis dengan interaksi yang kompleks antara komponen hidup dan lingkungan fisiknya. Proses aliran energi dan siklus materi menjadi fondasi utama dalam menjaga keberlangsungan produksi pertanian serta keseimbangan ekologis di dalamnya. Setiap organisme memiliki peran tersendiri dalam mentransfer energi dan mendaur ulang unsur hara, sehingga keberlanjutan sistem sangat bergantung pada keteraturan proses tersebut.

3.3.1 Aliran Energi dalam Rantai dan Jaring Makanan Pertanian

Aliran energi dalam agrosistem dimulai dari sumber utama, yaitu matahari yang menyediakan energi bagi tumbuhan sebagai produsen untuk melakukan fotosintesis. Energi yang ditangkap oleh tanaman kemudian disimpan dalam bentuk senyawa organik yang menjadi dasar bagi kehidupan organisme lain dalam sistem pertanian. Tanaman pangan, tanaman hortikultura, serta tanaman penutup tanah berfungsi sebagai produsen primer yang mengubah energi cahaya menjadi energi kimia. Energi tersebut kemudian berpindah ke konsumen tingkat pertama seperti serangga herbivora, ternak, maupun organisme lain yang memanfaatkan tanaman sebagai sumber makanan.

Proses ini terus berlanjut ke tingkat trofik yang lebih tinggi, termasuk predator dan parasit yang mengendalikan populasi hama. Setiap perpindahan energi selalu diikuti dengan kehilangan energi dalam bentuk panas akibat aktivitas metabolisme, sehingga efisiensi energi menurun pada setiap tingkat trofik. Keadaan ini menjelaskan mengapa jumlah organisme pada tingkat trofik yang lebih tinggi cenderung lebih sedikit daripada produsen. Dalam konteks pertanian, pemahaman mengenai aliran energi sangat penting untuk mengoptimalkan produktivitas dengan meminimalkan kehilangan energi yang tidak perlu, seperti melalui pengelolaan hama terpadu yang menjaga keseimbangan antara organisme menguntungkan dan merugikan (Momesso *et al.*, 2022).

Jaring makanan dalam agrosistem memiliki struktur yang lebih kompleks daripada rantai makanan sederhana karena melibatkan berbagai hubungan makan yang saling berinteraksi. Organisme dalam sistem pertanian tidak hanya bergantung pada satu jenis sumber makanan, melainkan memiliki hubungan yang saling terhubung sehingga membentuk jaringan yang dinamis. Keberadaan musuh alami seperti predator dan parasitoid memainkan peran penting dalam menjaga kestabilan jaring

makanan dengan mengontrol populasi hama. Interaksi ini membantu mencegah terjadinya ledakan populasi organisme tertentu yang dapat merusak tanaman. Selain itu, manusia sebagai pengelola agrosistem turut memengaruhi aliran energi melalui praktik budidaya seperti pemupukan, irigasi, dan penggunaan pestisida. Penggunaan bahan kimia yang berlebihan dapat mengganggu keseimbangan jaring makanan dengan membunuh organisme non-target yang sebenarnya berperan penting dalam sistem. Penerapan sistem pertanian berkelanjutan yang mempertimbangkan keberadaan berbagai organisme dalam jaring makanan dapat meningkatkan produktivitas sekaligus menjaga kesehatan lingkungan (Umunnakwe *et al.*, 2025).

3.3.2 Siklus Nutrien dalam Tanah dan Tanaman

Siklus nutrien dalam agrosistem merupakan proses pergerakan dan perubahan unsur hara yang sangat penting bagi pertumbuhan tanaman dan keberlanjutan sistem pertanian. Unsur hara seperti nitrogen, fosfor, kalium, dan unsur mikro lainnya berperan dalam berbagai proses fisiologis tanaman, termasuk pembentukan jaringan, fotosintesis, dan metabolisme. Tanah berfungsi sebagai media utama penyedia nutrien yang berasal dari pelapukan bahan organik, mineral, serta input eksternal seperti pupuk. Tanaman menyerap nutrien melalui akar dalam bentuk ion yang tersedia di dalam larutan tanah. Setelah diserap, nutrien digunakan untuk mendukung pertumbuhan vegetatif dan generatif tanaman. Ketika tanaman dipanen, sebagian nutrien akan keluar dari sistem, sehingga perlu adanya penggantian melalui pemupukan atau pengembalian residu tanaman ke tanah. Proses ini menunjukkan pentingnya pengelolaan nutrien yang tepat agar tidak terjadi penurunan kesuburan tanah. Kehilangan nutrien dapat terjadi melalui pencucian, erosi, maupun volatilisasi, sehingga strategi pengelolaan seperti penggunaan pupuk organik dan teknik konservasi tanah sangat diperlukan untuk menjaga keseimbangan siklus nutrien dalam agrosistem (Aprillia, Prayoga and Mustikarini, 2025).

Peran bahan organik dalam siklus nutrien sangat signifikan karena menjadi sumber utama unsur hara yang dilepaskan secara bertahap melalui proses dekomposisi. Mikroorganisme tanah seperti bakteri dan fungi berperan dalam menguraikan bahan organik menjadi bentuk yang dapat diserap oleh tanaman. Proses mineralisasi mengubah senyawa kompleks menjadi nutrien sederhana, sedangkan imobilisasi mengikat nutrien dalam biomassa mikroorganisme sehingga tidak

mudah hilang. Interaksi antara tanaman dan mikroorganisme juga terlihat dalam hubungan simbiosis seperti mikoriza dan bakteri penambat nitrogen yang meningkatkan ketersediaan nutrien bagi tanaman. Praktik pertanian yang mendukung keberadaan bahan organik dan mikroorganisme tanah akan meningkatkan efisiensi siklus nutrien serta mengurangi ketergantungan pada pupuk kimia. Penggunaan kompos, pupuk hijau, dan rotasi tanaman merupakan contoh strategi yang dapat memperbaiki struktur tanah sekaligus meningkatkan kandungan nutrien. Pengelolaan siklus nutrien yang baik tidak hanya meningkatkan produktivitas tanaman, tetapi juga menjaga keberlanjutan lingkungan dengan mengurangi dampak negatif terhadap ekosistem sekitar.

3.3.3 Peran Mikroorganisme dalam Daur Materi

Mikroorganisme memiliki peran yang sangat penting dalam daur materi dalam agrosistem karena bertanggung jawab atas proses dekomposisi dan transformasi berbagai senyawa organik dan anorganik. Bakteri, fungi, dan aktinomiset bekerja secara aktif dalam menguraikan sisa-sisa tanaman, kotoran hewan, serta bahan organik lainnya menjadi bentuk yang lebih sederhana. Proses ini menghasilkan nutrien yang dapat digunakan kembali oleh tanaman, sehingga menciptakan siklus yang berkelanjutan. Aktivitas mikroorganisme juga memengaruhi struktur tanah dengan meningkatkan agregasi tanah dan porositas, yang pada akhirnya mendukung pertumbuhan akar dan penyerapan air. Selain itu, beberapa mikroorganisme memiliki kemampuan khusus seperti fiksasi nitrogen dari udara, yang sangat penting dalam menyediakan unsur hara tanpa perlu input eksternal yang besar. Keberadaan mikroorganisme yang beragam dalam tanah menunjukkan tingkat kesehatan tanah yang baik dan berkontribusi pada stabilitas ekosistem pertanian secara keseluruhan (Gumo *et al.*, 2025).

Interaksi antara mikroorganisme dan komponen lain dalam agrosistem menciptakan jaringan yang kompleks dan saling bergantung. Mikroorganisme tidak hanya berperan sebagai pengurai, tetapi juga sebagai agen pengendali hayati yang dapat menekan perkembangan patogen tanaman. Beberapa jenis bakteri dan fungi mampu menghasilkan senyawa yang menghambat pertumbuhan organisme penyebab penyakit, sehingga membantu melindungi tanaman secara alami. Aktivitas mikroorganisme juga dipengaruhi oleh kondisi lingkungan seperti suhu, kelembapan, dan ketersediaan bahan organik. Praktik pertanian yang tidak ramah lingkungan seperti penggunaan pestisida berlebihan dapat mengganggu

keseimbangan mikroorganisme dan mengurangi efektivitas daur materi. Pendekatan pertanian berkelanjutan yang memperhatikan keberadaan mikroorganisme akan memberikan manfaat jangka panjang bagi produktivitas dan kesehatan tanah. Upaya seperti pengurangan bahan kimia sintetis, peningkatan bahan organik, dan penerapan sistem agroekologi menjadi langkah penting dalam menjaga peran mikroorganisme dalam daur materi sehingga agrosistem tetap produktif dan seimbang.

3.4 Keanekaragaman Hayati dalam Ekosistem Pertanian

Keanekaragaman hayati dalam ekosistem pertanian mencerminkan kompleksitas kehidupan yang saling terhubung antara organisme dan lingkungan fisiknya. Variasi genetik, spesies, serta ekosistem membentuk fondasi penting bagi keberlanjutan sistem pertanian. Kehadiran berbagai organisme tidak hanya mendukung produktivitas, tetapi juga menjaga keseimbangan ekologis. Sistem pertanian yang memperhatikan keberagaman hayati cenderung lebih tangguh terhadap gangguan lingkungan, perubahan iklim, serta serangan hama dan penyakit yang terus berkembang.

3.4.1 Jenis Keanekaragaman Hayati dalam Agrosistem

Keanekaragaman hayati dalam agrosistem dapat dipahami melalui tiga tingkatan utama yaitu keanekaragaman genetik, keanekaragaman spesies, dan keanekaragaman ekosistem yang saling berinteraksi membentuk sistem produksi pertanian yang dinamis. Keanekaragaman genetik tercermin dalam variasi varietas tanaman dan ras ternak yang memiliki karakteristik berbeda dalam hal ketahanan terhadap hama, penyakit, serta kondisi lingkungan seperti kekeringan atau kelebihan air. Keanekaragaman spesies terlihat dari keberadaan berbagai jenis tanaman, hewan, serangga, mikroorganisme, dan organisme lain yang hidup dalam satu lahan pertanian. Keanekaragaman ekosistem mencakup variasi lanskap pertanian seperti sawah, ladang, kebun, serta area penyangga seperti hutan kecil atau lahan basah yang berperan sebagai habitat alami.

Setiap tingkatan keanekaragaman memiliki kontribusi yang saling melengkapi dalam menjaga stabilitas sistem pertanian. Variasi genetik memungkinkan adaptasi terhadap perubahan lingkungan, sementara keberagaman spesies menciptakan interaksi ekologis yang kompleks seperti predasi, simbiosis, dan kompetisi yang membantu mengendalikan populasi organisme tertentu. Keanekaragaman

ekosistem memperluas fungsi ekologis dengan menyediakan ruang bagi berbagai proses alami seperti siklus air, penyerbukan, serta perlindungan terhadap erosi tanah. Struktur keanekaragaman tersebut membentuk jaringan kehidupan yang saling terhubung dan tidak dapat dipisahkan dalam konteks pertanian berkelanjutan (Shahmohamadloo *et al.*, 2022).

Keberadaan keanekaragaman hayati dalam agrosistem juga mencerminkan pengaruh praktik pertanian yang diterapkan oleh manusia dalam mengelola lahan. Sistem pertanian monokultur cenderung mengurangi keanekaragaman spesies karena hanya mengandalkan satu jenis tanaman dalam skala luas, sehingga rentan terhadap serangan hama dan perubahan lingkungan. Sistem pertanian polikultur atau tumpangsari menunjukkan tingkat keanekaragaman yang lebih tinggi karena melibatkan berbagai jenis tanaman dalam satu lahan yang sama. Pola ini memungkinkan terciptanya interaksi ekologis yang lebih kompleks dan meningkatkan efisiensi pemanfaatan sumber daya seperti cahaya, air, dan nutrien.

Keanekaragaman hayati juga terlihat pada keberadaan organisme tanah seperti bakteri, jamur, dan cacing yang berperan dalam proses dekomposisi dan peningkatan kesuburan tanah. Kehadiran musuh alami seperti predator dan parasitoid membantu mengendalikan populasi hama secara alami tanpa ketergantungan berlebihan pada pestisida kimia. Integrasi antara tanaman, hewan, dan mikroorganisme menciptakan sistem pertanian yang lebih resilien dan adaptif. Pengelolaan keanekaragaman hayati yang tepat dapat meningkatkan produktivitas sekaligus menjaga keberlanjutan lingkungan dalam jangka panjang.

3.4.2 Pentingnya Keanekaragaman bagi Stabilitas Ekosistem Pertanian

Keanekaragaman hayati memainkan peran krusial dalam menjaga stabilitas ekosistem pertanian melalui berbagai mekanisme ekologis yang saling terkait. Stabilitas ekosistem ditentukan oleh kemampuan sistem untuk mempertahankan fungsi dan struktur meskipun menghadapi gangguan seperti perubahan iklim, serangan hama, atau fluktuasi kondisi lingkungan. Keanekaragaman spesies memungkinkan adanya redundansi fungsional, di mana beberapa organisme memiliki peran yang serupa sehingga jika satu spesies terganggu, spesies lain dapat menggantikan fungsinya. Keberagaman tanaman dalam satu lahan dapat mengurangi risiko kegagalan panen karena tidak semua tanaman memiliki kerentanan yang sama terhadap kondisi tertentu. Interaksi antara organisme seperti

penyerbuk, predator, dan dekomposer menciptakan keseimbangan alami yang mendukung produktivitas pertanian. Keanekaragaman mikroorganisme tanah meningkatkan kualitas tanah melalui proses dekomposisi bahan organik dan siklus nutrien yang efisien. Struktur ekosistem yang beragam juga memperkuat ketahanan terhadap invasi spesies asing yang berpotensi merusak sistem pertanian. Kompleksitas hubungan antarorganisme menciptakan sistem yang lebih stabil dan tidak mudah terganggu oleh perubahan mendadak.

Kontribusi keanekaragaman hayati terhadap stabilitas juga terlihat dalam kemampuannya meningkatkan efisiensi penggunaan sumber daya dalam ekosistem pertanian. Tanaman dengan karakteristik berbeda dapat memanfaatkan cahaya, air, dan nutrien pada lapisan tanah yang berbeda sehingga mengurangi kompetisi langsung dan meningkatkan produktivitas secara keseluruhan. Keanekaragaman juga memperkuat siklus energi dan materi dengan memastikan bahwa setiap komponen dalam ekosistem memiliki peran dalam aliran tersebut.

Organisme pengurai mengembalikan nutrien ke tanah sehingga dapat digunakan kembali oleh tanaman, sementara organisme konsumen membantu mengontrol populasi organisme lain. Sistem pertanian yang kaya akan keanekaragaman hayati cenderung memiliki daya pulih yang lebih tinggi setelah mengalami gangguan, karena banyaknya jalur alternatif dalam jaringan ekologi. Praktik pertanian yang mendukung keanekaragaman seperti rotasi tanaman, agroforestri, dan penggunaan varietas lokal terbukti mampu meningkatkan stabilitas dan keberlanjutan sistem pertanian. Pendekatan tersebut tidak hanya memberikan manfaat ekologis tetapi juga mendukung ketahanan pangan dan kesejahteraan petani dalam jangka panjang (Wang and Caldwell, 2026).

3.4.3 Dampak Praktik Pertanian terhadap Keanekaragaman Hayati

Praktik pertanian memiliki pengaruh yang signifikan terhadap tingkat keanekaragaman hayati dalam suatu agrosistem, baik dalam bentuk peningkatan maupun penurunan. Intensifikasi pertanian yang ditandai dengan penggunaan input kimia seperti pupuk sintetis dan pestisida secara berlebihan sering kali menyebabkan penurunan keanekaragaman spesies, terutama organisme non-target yang memiliki peran penting dalam ekosistem. Penggunaan pestisida dapat membunuh tidak hanya hama tetapi juga musuh alami dan penyerbuk yang berkontribusi terhadap produktivitas tanaman. Konversi lahan alami menjadi lahan pertanian skala besar mengakibatkan hilangnya habitat bagi berbagai spesies dan

mengurangi kompleksitas ekosistem. Sistem monokultur mempersempit variasi genetik dan meningkatkan kerentanan terhadap gangguan lingkungan. Praktik pengolahan tanah yang intensif dapat merusak struktur tanah dan mengurangi populasi mikroorganisme yang berperan dalam kesuburan tanah. Dampak tersebut menunjukkan bahwa pendekatan pertanian yang tidak memperhatikan aspek ekologis dapat mengancam keberlanjutan sistem pertanian itu sendiri. Penurunan keanekaragaman hayati berdampak langsung pada penurunan fungsi ekosistem seperti penyerbukan, pengendalian hama alami, dan siklus nutrien yang efisien.

Pendekatan pertanian berkelanjutan menawarkan solusi untuk meminimalkan dampak negatif tersebut dengan mengintegrasikan prinsip-prinsip ekologi dalam pengelolaan lahan. Praktik seperti agroforestri, pertanian organik, dan konservasi tanah dan air mampu meningkatkan keanekaragaman hayati sekaligus menjaga produktivitas. Penggunaan varietas lokal dan teknik rotasi tanaman membantu mempertahankan keanekaragaman genetik serta mengurangi tekanan terhadap satu jenis tanaman tertentu. Pengelolaan habitat seperti pembuatan jalur hijau atau area penyangga dapat menyediakan tempat hidup bagi berbagai organisme yang mendukung fungsi ekosistem. Pendekatan ini juga mendorong penggunaan musuh alami sebagai pengendali hama sehingga mengurangi ketergantungan pada pestisida kimia. Integrasi antara praktik tradisional dan teknologi modern dapat menciptakan sistem pertanian yang lebih adaptif dan berkelanjutan. Kesadaran akan pentingnya keanekaragaman hayati semakin mendorong perubahan paradigma dalam pertanian menuju sistem yang tidak hanya berorientasi pada produksi tetapi juga pada keseimbangan ekologi dan keberlanjutan jangka panjang (Khan *et al.*, 2026).

3.5 Jasa Ekosistem dan Manfaatnya bagi Pertanian

Ekosistem pertanian merupakan suatu sistem yang tidak hanya berfokus pada produksi pangan, tetapi juga mencerminkan hubungan kompleks antara manusia, lingkungan, serta berbagai komponen hayati dan non-hayati yang saling berinteraksi. Kehadiran jasa ekosistem menjadi elemen penting yang mendukung keberlanjutan sistem ini melalui fungsi-fungsi alami yang sering kali tidak disadari. Pemanfaatan yang tepat terhadap jasa tersebut mampu meningkatkan produktivitas sekaligus menjaga keseimbangan lingkungan dalam jangka panjang.

3.5.1 Konsep dan Jenis Jasa Ekosistem

Jasa ekosistem merupakan manfaat yang diperoleh manusia dari fungsi alami suatu ekosistem, termasuk dalam konteks pertanian yang sangat bergantung pada stabilitas lingkungan. Pemahaman terhadap konsep ini mencakup pengenalan berbagai jenis jasa yang secara langsung maupun tidak langsung mendukung kehidupan manusia, seperti jasa penyediaan berupa hasil panen, jasa pengaturan seperti pengendalian iklim dan hama, jasa budaya yang berkaitan dengan nilai estetika dan tradisi, serta jasa pendukung yang melibatkan proses dasar seperti pembentukan tanah dan siklus nutrien. Setiap jenis jasa memiliki peran yang saling terkait dan tidak dapat dipisahkan, sehingga perubahan pada satu aspek akan memengaruhi keseluruhan sistem pertanian. Keberadaan jasa ekosistem sering kali dianggap sebagai sesuatu yang tersedia secara alami tanpa biaya, padahal fungsi tersebut memiliki nilai ekonomi yang sangat besar jika dihitung secara komprehensif. Kondisi ini mendorong perlunya pendekatan yang lebih holistik dalam memahami pertanian, di mana produksi tidak hanya diukur dari hasil panen, tetapi juga dari kemampuan sistem dalam mempertahankan fungsi ekologisnya. Pemanfaatan jasa ekosistem secara optimal memerlukan pengetahuan mendalam mengenai interaksi antar komponen, sehingga petani dapat mengelola lahan dengan cara yang tidak merusak keseimbangan alam. Pengelolaan yang berbasis pada prinsip ekologi mampu meningkatkan efisiensi penggunaan sumber daya serta mengurangi ketergantungan pada input eksternal seperti pupuk kimia dan pestisida sintetis yang berpotensi merusak lingkungan (van Noordwijk, 2021).

Klasifikasi jasa ekosistem memberikan kerangka kerja yang jelas untuk memahami kontribusi masing-masing fungsi terhadap sistem pertanian. Jasa penyediaan meliputi hasil nyata seperti pangan, air, dan bahan baku yang menjadi kebutuhan utama manusia, sementara jasa pengaturan berperan dalam menjaga stabilitas lingkungan melalui proses alami seperti penyerbukan, pengendalian hama, dan pengaturan siklus air. Jasa budaya mencerminkan nilai sosial dan spiritual yang melekat pada praktik pertanian, termasuk tradisi lokal dan kearifan masyarakat dalam mengelola lahan secara berkelanjutan. Jasa pendukung menjadi dasar bagi seluruh proses tersebut dengan menyediakan kondisi yang memungkinkan ekosistem berfungsi secara optimal, seperti kesuburan tanah dan keberlanjutan siklus biogeokimia. Pemahaman terhadap keempat kategori ini membantu dalam merancang strategi pertanian yang lebih berkelanjutan dan adaptif terhadap

perubahan lingkungan. Integrasi konsep jasa ekosistem ke dalam praktik pertanian modern memungkinkan terciptanya sistem yang tidak hanya produktif tetapi juga resilien terhadap tekanan eksternal seperti perubahan iklim dan degradasi lahan. Pendekatan ini menekankan pentingnya menjaga keseimbangan antara kebutuhan produksi dan konservasi lingkungan, sehingga manfaat yang diperoleh dapat dirasakan secara berkelanjutan oleh generasi mendatang (ZHAO *et al.*, 2024).

3.5.2 Peran Jasa Ekosistem dalam Produktivitas Pertanian

Produktivitas pertanian sangat dipengaruhi oleh keberadaan jasa ekosistem yang berfungsi sebagai penopang utama dalam proses produksi. Penyerbukan oleh serangga, misalnya, merupakan salah satu jasa yang secara langsung meningkatkan hasil tanaman dengan memastikan keberhasilan reproduksi tanaman berbunga. Pengendalian hama secara alami oleh predator seperti burung dan serangga tertentu membantu mengurangi kerusakan tanaman tanpa perlu menggunakan pestisida kimia dalam jumlah besar. Ketersediaan air yang diatur oleh ekosistem melalui siklus hidrologi juga menjadi faktor krusial dalam menentukan keberhasilan pertanian, terutama di daerah yang bergantung pada curah hujan. Kondisi tanah yang subur sebagai hasil dari aktivitas mikroorganisme dan dekomposisi bahan organik mendukung pertumbuhan tanaman secara optimal. Interaksi antara berbagai jasa ini menciptakan sistem yang saling mendukung dan meningkatkan efisiensi produksi secara keseluruhan. Ketergantungan terhadap jasa ekosistem menunjukkan bahwa produktivitas pertanian tidak hanya ditentukan oleh teknologi dan input eksternal, tetapi juga oleh kualitas lingkungan yang dikelola secara berkelanjutan (Kleftodimos *et al.*, 2021).

Pemanfaatan jasa ekosistem secara optimal memerlukan strategi pengelolaan yang mempertimbangkan keseimbangan antara eksploitasi dan konservasi. Praktik seperti agroforestri, rotasi tanaman, dan penggunaan tanaman penutup tanah dapat meningkatkan keberagaman hayati sekaligus memperkuat fungsi ekosistem. Sistem pertanian yang mengadopsi prinsip-prinsip ekologis cenderung lebih tahan terhadap gangguan seperti serangan hama dan perubahan iklim. Keberlanjutan produktivitas sangat bergantung pada kemampuan sistem untuk mempertahankan fungsi-fungsi alami yang mendukung pertumbuhan tanaman. Penggunaan teknologi modern yang dikombinasikan dengan pengetahuan tradisional dapat menciptakan pendekatan yang lebih efektif dalam mengelola jasa ekosistem. Peran petani sebagai pengelola utama lahan menjadi sangat penting dalam menentukan

keberhasilan implementasi strategi ini. Kesadaran akan pentingnya jasa ekosistem perlu ditingkatkan melalui pendidikan dan penyuluhan, sehingga praktik pertanian yang dilakukan selain berorientasi pada hasil jangka pendek, juga keberlanjutan jangka panjang. Integrasi antara aspek ekonomi, sosial, dan lingkungan dalam pengelolaan pertanian akan menghasilkan sistem yang lebih seimbang dan mampu menghadapi berbagai tantangan di masa depan (Uwingabire and Gallai, 2024).

3.5.3 Strategi Pemanfaatan Jasa Ekosistem secara Berkelanjutan

Pemanfaatan jasa ekosistem secara berkelanjutan memerlukan pendekatan yang terencana dan berbasis pada prinsip-prinsip ekologi. Strategi ini mencakup upaya untuk mempertahankan dan meningkatkan fungsi alami ekosistem melalui praktik pertanian yang ramah lingkungan. Penggunaan pupuk organik, pengendalian hama terpadu, serta konservasi tanah dan air menjadi langkah-langkah penting dalam menjaga keseimbangan sistem. Diversifikasi tanaman juga berperan dalam meningkatkan stabilitas ekosistem dengan mengurangi risiko kegagalan panen akibat serangan hama atau perubahan kondisi lingkungan. Pendekatan ini tidak hanya berfokus pada peningkatan produksi, tetapi juga pada pelestarian fungsi ekologis yang mendukung keberlanjutan pertanian. Kolaborasi antara petani, pemerintah, dan lembaga keilmuan menjadi kunci dalam mengembangkan strategi yang efektif dan adaptif terhadap kondisi lokal. Pengelolaan yang berbasis pada pengetahuan ilmiah dan kearifan lokal dapat menciptakan sistem yang lebih resilien dan mampu menghadapi berbagai tantangan lingkungan (Mandal *et al.*, 2025).

Implementasi strategi berkelanjutan membutuhkan dukungan kebijakan yang mendorong praktik pertanian ramah lingkungan serta memberikan insentif bagi petani yang menerapkannya. Monitoring dan evaluasi terhadap kondisi ekosistem perlu dilakukan secara berkala untuk memastikan bahwa praktik yang diterapkan tidak merusak keseimbangan lingkungan. Penggunaan indikator keberlanjutan dapat membantu dalam mengukur efektivitas strategi yang diterapkan. Peran masyarakat dalam menjaga lingkungan juga menjadi faktor penting dalam keberhasilan pengelolaan jasa ekosistem. Kesadaran kolektif mengenai pentingnya menjaga keseimbangan alam akan mendorong terciptanya praktik pertanian yang lebih bertanggung jawab. Pendekatan yang mengintegrasikan aspek ekonomi, sosial, dan lingkungan dalam pengelolaan pertanian akan menghasilkan sistem yang tidak hanya produktif tetapi juga berkelanjutan.

Upaya ini diharapkan mampu menjaga ketersediaan sumber daya alam bagi generasi mendatang serta mendukung ketahanan pangan secara global (Wenzel *et al.*, 2024).

BAB 4
TANAH SEBAGAI FONDASI AGROEKOLOGI

Tanah merupakan komponen fundamental dalam sistem agroekologi karena berfungsi sebagai medium tumbuh tanaman sekaligus pusat interaksi antara faktor fisik, kimia, dan biologis. Dalam perspektif agroekologi, tanah tidak hanya dipandang sebagai sumber hara, tetapi juga sebagai ekosistem hidup yang dinamis, tempat berlangsungnya proses-proses penting seperti dekomposisi bahan organik, siklus hara, dan aktivitas mikroorganisme yang menopang produktivitas pertanian secara berkelanjutan.

Kualitas tanah menjadi penentu utama keberhasilan sistem agroekologi. Tanah yang sehat ditandai oleh struktur yang baik, kandungan bahan organik yang memadai, kapasitas menahan air yang optimal, serta keanekaragaman hayati tanah yang tinggi. Kondisi ini memungkinkan tanaman tumbuh secara optimal sekaligus meningkatkan efisiensi penggunaan input dan ketahanan terhadap tekanan lingkungan, termasuk perubahan iklim (Lal, 2015; Kopittke *at al*., 2025).

Dalam konteks ketahanan pangan, peran tanah menjadi semakin strategis. Degradasi tanah akibat praktik pertanian intensif, erosi, dan pencemaran dapat menurunkan produktivitas lahan dan mengancam keberlanjutan sistem pangan. Oleh karena itu, agroekologi menekankan pentingnya pengelolaan tanah yang berkelanjutan melalui pendekatan konservasi, penggunaan bahan organik, diversifikasi tanaman, serta pengelolaan mikrobiologi tanah.

Dengan demikian, tanah bukan sekadar faktor produksi, melainkan fondasi utama dalam membangun sistem pertanian yang resilien, produktif, dan berkelanjutan. Pendekatan agroekologi menempatkan tanah sebagai pusat dari strategi pengelolaan sumber daya alam untuk mendukung ketahanan pangan jangka panjang.

4.1 Sifat Fisik, Kimia dan Biologi Tanah Pertanian

Dalam sistem pertanian, kinerja tanah ditentukan oleh sifat dasar tanah, yaitu sifat fisik, sifat kimia, dan sifat biologi. Ketiga sifat tersebut tidak berdiri sendiri, melainkan membentuk suatu kesatuan fungsional. Misalnya, kandungan bahan organik (aspek kimia) mempengaruhi pembentukan agregat dan kapasitas menahan air (aspek fisik), sekaligus menjadi sumber energi bagi mikroorganisme (aspek biologi). Oleh sebab itu, pemahaman tentang sifat fisik, kimia, dan biologi tanah menjadi kunci dalam pengelolaan tanah pertanian yang produktif, resilien terhadap perubahan iklim, dan berkelanjutan dalam jangka panjang (Brady and Weil, 2017).

4.1.1 Sifat Fisik Tanah

Sifat fisik tanah berkaitan dengan kondisi struktur dan susunan partikel tanah yang memengaruhi pergerakan air, udara, dan akar tanaman. Beberapa parameter utama meliputi tekstur, struktur, porositas, kepadatan isi (bulk density), dan kapasitas menahan air.

1. **Tekstur tanah** (perbandingan pasir, debu, dan liat) menentukan kemampuan tanah dalam menyimpan air dan hara. Tanah bertekstur halus (liat) memiliki kapasitas simpan air tinggi, tetapi aerasi rendah, sedangkan tanah berpasir memiliki aerasi baik namun daya simpan air rendah.
2. **Struktur tanah** mencerminkan agregasi partikel tanah. Struktur remah yang stabil sangat mendukung infiltrasi air, pertumbuhan akar, dan aktivitas mikroorganisme.
3. **Porositas dan *bulk density*** memengaruhi ketersediaan ruang bagi air dan udara. Tanah dengan bulk density tinggi cenderung padat dan menghambat pertumbuhan akar.
4. **Kapasitas menahan air** sangat penting dalam sistem agroekologi, terutama untuk menghadapi variabilitas iklim.

Dalam agroekologi, perbaikan sifat fisik tanah dilakukan melalui penambahan bahan organik, pengolahan tanah minimum, serta penggunaan tanaman penutup tanah untuk meningkatkan agregasi dan stabilitas struktur tanah.

4.1.2 Sifat Kimia Tanah

Sifat kimia tanah berhubungan dengan ketersediaan unsur hara dan reaksi kimia yang terjadi di dalam tanah. Parameter utama meliputi pH tanah, kapasitas tukar kation (KTK), kejenuhan basa, kandungan bahan organik, dan ketersediaan unsur hara makro maupun mikro.

1. **pH tanah** mempengaruhi kelarutan dan ketersediaan hara. Tanah masam umumnya memiliki keterbatasan unsur hara seperti P, Ca, dan Mg, serta potensi toksisitas Al dan Fe.
2. **Kapasitas Tukar Kation (KTK)** menunjukkan kemampuan tanah menahan dan menyediakan kation hara seperti K^+, Ca^{2+}, dan Mg^{2+}.
3. **Bahan organik tanah** berperan penting dalam meningkatkan KTK, menyediakan hara, dan memperbaiki sifat fisik serta biologi tanah.
4. **Ketersediaan hara** dipengaruhi oleh interaksi kompleks antara mineral tanah, bahan organik, dan aktivitas mikroorganisme.

Pendekatan agroekologi menekankan penggunaan input alami seperti kompos, pupuk hijau, dan pupuk hayati untuk menjaga keseimbangan kimia tanah, serta mengurangi ketergantungan pada pupuk sintetis.

4.1.3 Sifat Biologi Tanah

Sifat biologi tanah mencerminkan aktivitas dan keanekaragaman organisme hidup di dalam tanah, termasuk mikroorganisme (bakteri, fungi), fauna tanah (cacing tanah, nematoda), dan akar tanaman.

1. **Mikroorganisme tanah** berperan dalam dekomposisi bahan organik dan mineralisasi hara.
2. **Biomassa mikroba** merupakan indikator penting kesuburan tanah dan aktivitas biologis.
3. **Keanekaragaman hayati tanah** meningkatkan stabilitas ekosistem dan ketahanan terhadap gangguan lingkungan.
4. **Interaksi tanah–tanaman–mikroba** seperti simbiosis mikoriza dan fiksasi nitrogen oleh bakteri menjadi kunci dalam sistem agroekologi.

Pengelolaan biologi tanah dalam agroekologi dilakukan melalui peningkatan bahan organik, rotasi tanaman, diversifikasi sistem tanam, serta pengurangan penggunaan pestisida kimia yang dapat merusak kehidupan tanah.

Integrasi Sifat Tanah dalam Agroekologi

Ketiga sifat dasar tanah tersebut tidak berdiri sendiri, melainkan saling berkaitan. Misalnya, peningkatan bahan organik tidak hanya memperbaiki sifat kimia (menambah hara), tetapi juga sifat fisik (struktur tanah) dan biologi (aktivitas mikroba). Oleh karena itu, pengelolaan tanah dalam agroekologi harus dilakukan secara holistik.

Tanah yang memiliki keseimbangan sifat fisik, kimia, dan biologi akan mampu:

a. Mendukung produktivitas tanaman secara optimal
b. Meningkatkan efisiensi penggunaan air dan hara
c. Menekan degradasi lahan
d. Meningkatkan ketahanan terhadap perubahan iklim

Dengan demikian, pemahaman mendalam tentang sifat-sifat tanah menjadi landasan penting dalam merancang sistem agroekologi yang berkelanjutan dan mendukung ketahanan pangan.

4.2 Organisme Tanah dan Peranannya dalam Kesuburan

Organisme tanah adalah semua makhluk hidup yang hidup seluruh atau sebagian siklus hidupnya di dalam tanah atau pada permukaan tanah (serasah dan lapisan organik permukaan), baik sebagai dekomposer, simbion, herbivor, predator, maupun parasit.

Secara fungsional, organisme tanah membentuk komunitas biologis bawah permukaan yang saling berinteraksi melalui proses makan-memakan, simbiosis, kompetisi, dan transformasi senyawa organik maupun anorganik. Keseluruhan interaksi ini membentuk *soil food web,* yang sangat menentukan keberlanjutan fungsi tanah dalam sistem pertanian. Menurut Ingham (2000) menegaskan bahwa organisme tanah sangat penting bagi produktivitas pertanian karena mempengaruhi struktur tanah, erosi, ketersediaan air, perlindungan tanaman dari hama/penyakit, dekomposisi, dan daur hara. Selanjutnya FAO (2015), menjelaskan bahwa organisme tanah merupakan penggerak utama siklus hara, dinamika bahan organik,

sekuestrasi karbon, pengaturan struktur fisik tanah, rezim air, efisiensi serapan hara, dan kesehatan tanaman.

4.2.1 Keanekaragaman Organisme Tanah

Tanah dalam perspektif agroekologi merupakan ekosistem hidup yang dihuni oleh beragam organisme, mulai dari mikroorganisme hingga fauna makro. Organisme tanah berperan penting dalam menjaga dan meningkatkan kesuburan tanah melalui berbagai proses biologis yang mendukung siklus hara, pembentukan struktur tanah, dan kesehatan tanaman. Keberadaan dan aktivitas organisme tanah menjadi indikator utama kualitas tanah dalam sistem pertanian berkelanjutan.

Organisme tanah dapat dikelompokkan berdasarkan ukuran dan fungsinya menjadi tiga kategori utama:

1. **Mikroorganisme Tanah**

   Meliputi bakteri, fungi (jamur), aktinomiset, dan alga. Mikroorganisme ini merupakan komponen paling aktif dalam proses biokimia tanah.

   a. Bakteri berperan dalam dekomposisi bahan organik dan siklus nitrogen (misalnya fiksasi nitrogen oleh *Rhizobium* dan nitrifikasi oleh *Nitrosomonas* dan *Nitrobacter*).

   b. Fungi berperan dalam dekomposisi bahan organik kompleks seperti lignin serta membentuk simbiosis mikoriza dengan akar tanaman.

   c. Aktinomiset berfungsi dalam dekomposisi senyawa organik resisten dan menghasilkan senyawa antibiotik alami.

2. **Mesofauna Tanah**

   Meliputi organisme berukuran sedang seperti nematoda dan arthropoda kecil (tungau/ mites dan collembola).

   a. Nematoda berperan dalam rantai makanan tanah dan pengendalian populasi mikroorganisme.

   b. Collembola dan tungau (*mites*) membantu fragmentasi bahan organik dan mempercepat proses dekomposisi.

3. Makrofauna Tanah

Meliputi organisme besar seperti cacing tanah, rayap, dan semut.

a. Cacing tanah dikenal sebagai "insinyur ekosistem" karena mampu memperbaiki struktur tanah, meningkatkan aerasi, dan mempercepat siklus hara.

b. Rayap berperan dalam dekomposisi bahan organik kasar dan redistribusi bahan organik serta memindahkan partikel halus di dalam tanah. Selain itu, membentuk lorong dan gundukan, mengubah distribusi agregat dan unsur hara.

c. Semut membuat sarang dan terowongan, memindahkan partikel tanah ke permukaan, meningkatkan sirkulasi udara dan infiltrasi air.

4.2.2 Peranan Organisme Tanah dalam Kesuburan Tanah

Organisme tanah memberikan kontribusi signifikan terhadap kesuburan tanah melalui berbagai mekanisme berikut:

1. Dekomposisi Bahan Organik

Bahan organik segar (jerami, pupuk kandang, akar mati, kompos, mulsa) tidak langsung tersedia bagi tanaman. Organisme tanahlah yang memulai dan melanjutkan proses dekomposisi. Mikroorganisme menguraikan bahan organik menjadi senyawa sederhana yang dapat diserap tanaman. Proses ini menghasilkan unsur hara penting seperti nitrogen (N), fosfor (P), dan sulfur (S).

2. Mendorong Mineralisasi dan Siklus Hara

Peranan organisme tanah dalam proses mineralisasi dan siklus hara merupakan kunci utama dalam menjaga kesuburan tanah, terutama dalam sistem agroekologi yang menekankan keberlanjutan. Mineralisasi adalah proses biologis di mana bahan organik kompleks diuraikan oleh mikroorganisme tanah menjadi bentuk anorganik sederhana yang tersedia bagi tanaman. Proses ini didominasi oleh aktivitas bakteri, fungi, dan aktinomiset yang menghasilkan enzim-enzim ekstraseluler untuk memecah senyawa seperti protein, selulosa, dan lignin menjadi unsur hara. Organisme tanah memainkan peran kunci dalam siklus biogeokimia (siklus hara) melalui:

a. Fiksasi nitrogen oleh bakteri simbiotik dan non-simbiotik
b. Nitrifikasi dan denitrifikasi dalam siklus nitrogen
c. Pelarutan fosfat oleh mikroorganisme pelarut P

FAO (2015), menegaskan bahwa cacing tanah, rayap dan semut penting dalam bio-turbasi dan membantu mempertahankan struktur tanah. Bioturbasi adalah proses pengadukan dan redistribusi partikel tanah, bahan organik, serta pori-pori tanah yang terjadi akibat aktivitas organisme tanah, terutama fauna makro seperti cacing tanah, rayap, dan semut. Proses ini berperan penting dalam pembentukan struktur tanah, peningkatan porositas, aerasi, infiltrasi air, pencampuran bahan organik, dan percepatan siklus hara, sehingga berkontribusi nyata terhadap peningkatan kualitas dan kesuburan tanah.

3. Pembentukan dan Stabilitas Struktur Tanah

Eksudat mikroba dan aktivitas fauna tanah membantu pembentukan agregat tanah yang stabil. Struktur tanah yang baik meningkatkan infiltrasi air, aerasi, dan penetrasi akar.

4. Peningkatan Ketersediaan Hara

Mikoriza meningkatkan penyerapan fosfor dan unsur mikro oleh tanaman. Selain itu, mikroorganisme tertentu menghasilkan hormon pertumbuhan tanaman (*plant growth-promoting rhizobacteria*/PGPR).

5. Pengendalian Hayati

Peranan organisme tanah sebagai pengendali hayati merupakan komponen penting dalam menjaga kesehatan tanah dan tanaman dalam sistem agroekologi. Tanah yang kaya akan keanekaragaman hayati umumnya memiliki kemampuan alami untuk menekan perkembangan organisme patogen melalui berbagai mekanisme biologis. Mikroorganisme seperti bakteri, fungi, dan aktinomiset dapat bertindak sebagai agen antagonis yang menghambat pertumbuhan patogen melalui kompetisi ruang dan nutrisi, produksi senyawa antibiotik, predasi serta mekanisme parasitisme.

4.2.3 Organisme Tanah sebagai Indikator Kesuburan

Keanekaragaman dan aktivitas organisme tanah sering digunakan sebagai indikator biologis kesuburan tanah. Tanah yang sehat umumnya memiliki:

a. Biomassa mikroba yang tinggi
b. Aktivitas enzim tanah yang aktif
c. Populasi fauna tanah yang beragam

Sebaliknya, degradasi tanah akibat penggunaan bahan kimia berlebihan, erosi, atau kehilangan bahan organik akan menurunkan aktivitas biologis tanah.

4.2.4 Pengelolaan Organisme Tanah dalam Agroekologi

Pendekatan agroekologi menekankan pengelolaan organisme tanah secara alami untuk meningkatkan kesuburan tanah, antara lain melalui:

a. Penambahan bahan organik (kompos, pupuk kandang, pupuk hijau)
b. Diversifikasi tanaman melalui rotasi dan tumpangsari
c. Pengurangan penggunaan pestisida dan pupuk kimia sintetis
d. Pengolahan tanah konservatif (*minimum tillage*)
e. Pemanfaatan pupuk hayati dan biostimulan

Pengelolaan ini bertujuan untuk menciptakan keseimbangan biologis tanah yang mendukung produktivitas tanaman dan keberlanjutan sistem pertanian.

4.2.5 Peran dalam Ketahanan Pangan

Dalam konteks ketahanan pangan, organisme tanah berkontribusi pada peningkatan produktivitas dan stabilitas hasil pertanian. Tanah yang kaya akan kehidupan biologis mampu:

a. Menyediakan hara secara berkelanjutan
b. Meningkatkan efisiensi penggunaan input
c. Mengurangi ketergantungan pada pupuk kimia
d. Meningkatkan ketahanan tanaman terhadap stres biotik dan abiotik

Dengan demikian, organisme tanah merupakan fondasi biologis kesuburan tanah pertanian. Melalui proses dekomposisi, mineralisasi, fiksasi nitrogen, pelarutan unsur hara, pembentukan agregat, bioturbasi, dan pengendalian hayati, biota tanah menghubungkan dinamika bahan organik dengan ketersediaan hara, stabilitas struktur, kesehatan akar, dan produktivitas tanaman. Oleh sebab itu, dalam perspektif agroekologi, tanah yang subur bukan sekadar tanah yang kaya unsur hara, melainkan tanah yang hidup, aktif secara biologis, dan mampu menopang fungsi ekosistem secara berkelanjutan.

4.3 Siklus Hara Nitrogen, Fosfor dan Kalium Tanah

Siklus hara adalah proses perputaran dan transformasi unsur-unsur hara esensial di dalam sistem tanah–tanaman–lingkungan, yang melibatkan perpindahan hara dari bentuk tidak tersedia menjadi tersedia bagi tanaman, serta sebaliknya. Proses ini berlangsung secara terus-menerus melalui interaksi antara komponen biotik (tanaman, mikroorganisme, fauna tanah) dan abiotik (tanah, air, udara). Dengan demikian, siklus hara merupakan proses dinamis yang mengatur transformasi, pergerakan, dan ketersediaan unsur hara di dalam tanah. Dalam sistem agroekologi, pemahaman tentang siklus nitrogen (N), fosfor (P), dan kalium (K) menjadi sangat penting karena ketiga unsur ini merupakan hara makro esensial yang paling menentukan produktivitas tanaman. Proses-proses dalam siklus hara melibatkan interaksi kompleks antara komponen tanah, tanaman, mikroorganisme, serta faktor lingkungan.

4.3.1 Siklus Nitrogen (N)

Nitrogen merupakan unsur hara utama yang sangat dibutuhkan tanaman untuk pembentukan protein, klorofil, dan asam nukleat. Siklus nitrogen di dalam tanah melibatkan beberapa tahapan utama:

1. **Fiksasi Nitrogen:** Nitrogen atmosfer (N_2) diubah menjadi bentuk amonia (NH_3) oleh mikroorganisme penambat nitrogen, baik yang bersimbiosis (misalnya *Rhizobium* pada legum) maupun yang hidup bebas (*Azotobacter*, *Clostridium*).
2. **Amonifikasi (Mineralisasi):** Bahan organik yang mengandung nitrogen diuraikan oleh mikroorganisme menjadi amonium (NH_4^+).

3. **Nitrifikasi:** Amonium dioksidasi menjadi nitrit (NO_2^-) oleh *Nitrosomonas*, kemudian menjadi nitrat (NO_3^-) oleh *Nitrobacter*. Nitrat merupakan bentuk nitrogen yang paling mudah diserap tanaman, tetapi juga rentan tercuci.
4. **Denitrifikasi:** Nitrat direduksi kembali menjadi gas nitrogen (N_2 atau N_2O) oleh bakteri anaerob, terutama pada kondisi tanah jenuh air.
5. **Imobilisasi:** Sebagian nitrogen anorganik diserap kembali oleh mikroorganisme untuk membentuk biomassa, sehingga sementara tidak tersedia bagi tanaman.

Siklus nitrogen sangat dinamis dan rentan kehilangan melalui pencucian dan volatilisasi, sehingga pengelolaannya dalam agroekologi menekankan efisiensi melalui penggunaan bahan organik, tanaman legum, dan pengelolaan air.

4.3.2 Siklus Fosfor (P)

Fosfor berperan penting dalam transfer energi (ATP), pembentukan DNA, dan perkembangan akar. Berbeda dengan nitrogen, siklus fosfor tidak melibatkan fase gas dan lebih banyak dikendalikan oleh proses kimia dan biologis di dalam tanah.

1. **Pelapukan Mineral:** Fosfor berasal dari pelapukan mineral seperti apatit yang melepaskan ion fosfat ($H_2PO_4^-$ dan HPO_4^{2-}) ke dalam larutan tanah.
2. **Mineralisasi dan Imobilisasi:** Fosfor organik diuraikan oleh mikroorganisme menjadi fosfat anorganik (mineralisasi), sedangkan mikroorganisme juga dapat mengikat fosfor dalam biomassa (imobilisasi).
3. **Fiksasi Fosfor:** Fosfat mudah terikat oleh mineral tanah, terutama oksida Fe dan Al pada tanah masam serta Ca pada tanah alkalis, sehingga menjadi tidak tersedia bagi tanaman.
4. **Pelarutan Fosfat:** Mikroorganisme pelarut fosfat (phosphate-solubilizing microorganisms) menghasilkan asam organik yang dapat melarutkan fosfat terikat.
5. **Serapan Tanaman:** Tanaman menyerap fosfor dalam bentuk ortofosfat, seringkali dibantu oleh asosiasi mikoriza yang meningkatkan efisiensi penyerapan.

Dalam agroekologi, pengelolaan fosfor dilakukan melalui peningkatan bahan organik, penggunaan pupuk hayati, dan pengelolaan pH tanah untuk mengurangi fiksasi.

4.3.3 Siklus Kalium (K)

Kalium berfungsi dalam pengaturan osmotik, aktivasi enzim, dan peningkatan ketahanan tanaman terhadap stres. Siklus kalium relatif lebih sederhana dibandingkan nitrogen dan fosfor karena tidak mengalami transformasi biologis yang kompleks.

1. **Sumber Kalium:** Kalium berasal dari pelapukan mineral primer (seperti feldspar dan mika) dan mineral sekunder dalam tanah.
2. **Bentuk Kalium dalam Tanah:** Kalium terdapat dalam empat bentuk utama:
   a. Kalium larutan (K^+): tersedia langsung bagi tanaman
   b. Kalium dapat dipertukarkan: terikat lemah pada koloid tanah
   c. Kalium terfiksasi: terjebak dalam struktur mineral liat
   d. Kalium struktural: bagian dari mineral primer
3. **Pertukaran dan Keseimbangan:** Kalium dalam tanah berada dalam keseimbangan dinamis antara berbagai bentuk tersebut. Tanaman menyerap K^+ dari larutan tanah, yang kemudian digantikan oleh bentuk lain melalui proses pertukaran.
4. **Kehilangan Kalium:** Kalium dapat hilang melalui pencucian, terutama pada tanah berpasir dengan kapasitas tukar kation rendah.

Dalam sistem agroekologi, pengelolaan kalium dilakukan melalui pemanfaatan bahan organik, pengembalian residu tanaman, dan penggunaan pupuk alami untuk menjaga keseimbangan K dalam tanah.

4.4 Degradasi Tanah dan Dampaknya terhadap Ketahanan Pangan

Degradasi tanah merupakan proses penurunan kualitas tanah yang mengakibatkan berkurangnya kapasitas tanah dalam menjalankan fungsi ekologis dan produktifnya. Degradasi ini dapat terjadi akibat faktor alami maupun aktivitas manusia, seperti praktik pertanian intensif, deforestasi, penggunaan bahan kimia

berlebihan, dan pengelolaan lahan yang tidak berkelanjutan. Dalam konteks agroekologi, degradasi tanah dipandang sebagai ancaman serius karena melemahkan fondasi utama sistem pertanian. Secara umum, degradasi tanah dapat dibedakan menjadi tiga jenis utama, yaitu degradasi fisik, kimia, dan biologi.

Degradasi fisik berkaitan dengan kerusakan sifat fisik tanah, seperti struktur, porositas, dan kapasitas infiltrasi. Contohnya adalah pemadatan tanah akibat penggunaan alat berat, erosi oleh air dan angin, serta pengerakan permukaan (crusting). Kondisi ini menyebabkan akar sulit berkembang dan menghambat pergerakan air serta udara dalam tanah.

Degradasi kimia terjadi akibat perubahan komposisi kimia tanah yang merugikan, seperti penurunan unsur hara, peningkatan kemasaman (asidifikasi), salinisasi, serta akumulasi bahan pencemar (misalnya logam berat atau residu pestisida). Dampaknya adalah menurunnya ketersediaan hara dan terganggunya pertumbuhan tanaman.

Degradasi biologi berkaitan dengan menurunnya aktivitas dan keanekaragaman organisme tanah, termasuk mikroba dan fauna tanah. Hal ini sering disebabkan oleh rendahnya bahan organik, penggunaan bahan kimia berlebihan, atau gangguan lingkungan. Akibatnya, proses penting seperti dekomposisi bahan organik dan siklus hara menjadi terganggu.

Secara keseluruhan, ketiga jenis degradasi ini saling berinteraksi dan mempercepat penurunan kualitas tanah, sehingga memerlukan pengelolaan terpadu melalui konservasi tanah, penambahan bahan organik, serta praktik pertanian berkelanjutan.

Degradasi tanah disebabkan oleh kombinasi faktor alami dan aktivitas manusia yang saling berinteraksi. Faktor alami meliputi **iklim**, terutama curah hujan tinggi yang memicu erosi dan pencucian hara, serta kekeringan yang menurunkan aktivitas biologis tanah. **Topografi** juga berperan penting, dimana kemiringan lereng meningkatkan aliran permukaan dan mempercepat hilangnya lapisan tanah atas. Selain itu, sifat intrinsik tanah seperti tekstur kasar, struktur lemah, kapasitas tukar kation (KTK) rendah, dan kandungan bahan organik yang rendah menjadikan tanah lebih rentan terhadap degradasi.

Di sisi lain, faktor antropogenik merupakan penyebab utama degradasi tanah di banyak wilayah tropika. Praktik penggunaan lahan yang tidak sesuai seperti deforestasi, pertanian intensif tanpa konservasi, dan pengolahan tanah berlebihan mempercepat kerusakan struktur tanah dan erosi. Pengelolaan input yang tidak bijak, seperti penggunaan pupuk dan pestisida secara berlebihan, dapat menyebabkan penurunan kualitas kimia tanah, termasuk asidifikasi, salinisasi, dan pencemaran. Selain itu, aktivitas non-pertanian seperti pertambangan, urbanisasi, dan pembuangan limbah turut memperparah degradasi tanah. Penurunan kandungan bahan organik akibat minimnya pengembalian biomassa ke tanah juga menjadi faktor kunci yang melemahkan fungsi fisik, kimia, dan biologi tanah.

Secara keseluruhan, degradasi tanah terjadi akibat tekanan berkelanjutan terhadap sistem tanah tanpa diimbangi dengan praktik pengelolaan yang berkelanjutan, sehingga diperlukan pendekatan konservasi dan restorasi tanah untuk menjaga produktivitas lahan dan keberlanjutan ekosistem.

Degradasi tanah berdampak langsung terhadap ketahanan pangan karena menurunkan kemampuan tanah dalam mendukung produksi pertanian. Kerusakan sifat fisik tanah, seperti erosi dan pemadatan, menyebabkan berkurangnya kedalaman efektif tanah, daya simpan air, serta pertumbuhan akar tanaman (Gruver, 2013). Dari sisi kimia, penurunan kandungan unsur hara dan bahan organik, serta meningkatnya kemasaman atau salinitas, mengakibatkan rendahnya ketersediaan hara bagi tanaman. Sementara itu, degradasi biologi mengurangi aktivitas mikroorganisme tanah yang berperan dalam siklus hara.

Akumulasi dampak tersebut menyebabkan penurunan produktivitas lahan, meningkatnya kebutuhan input (pupuk dan air), serta ketidakstabilan hasil panen. Dalam jangka panjang, degradasi tanah dapat mempersempit luas lahan produktif dan meningkatkan kerentanan sistem pertanian terhadap perubahan iklim. Akibatnya, ketersediaan pangan menjadi terganggu, biaya produksi meningkat, dan akses masyarakat terhadap pangan yang cukup dan berkualitas semakin terancam. Oleh karena itu, pengelolaan tanah secara berkelanjutan menjadi kunci dalam menjaga ketahanan pangan.

4.5 Strategi Pemulihan dan Konservasi Kesuburan Tanah

Strategi pemulihan degradasi tanah dilakukan melalui pendekatan terpadu yang menitikberatkan pada perbaikan sifat fisik, kimia, dan biologi tanah secara simultan. Upaya ini meliputi penerapan teknik konservasi seperti pengendalian erosi, pengolahan tanah minimum, dan penggunaan tanaman penutup tanah untuk memperbaiki struktur dan meningkatkan retensi air. Dari aspek kimia, dilakukan pemupukan berimbang berbasis uji tanah serta penggunaan amelioran seperti kapur pada tanah masam dan penambahan bahan organik untuk meningkatkan ketersediaan hara dan kapasitas tukar kation. Sementara itu, pemulihan aspek biologi dilakukan melalui peningkatan kandungan bahan organik dan pemanfaatan mikroorganisme tanah yang berperan dalam siklus hara. Secara keseluruhan, strategi ini harus disesuaikan dengan kondisi spesifik lokasi dan dilakukan secara berkelanjutan agar fungsi tanah dapat pulih dan produktivitas lahan tetap terjaga (Lal, 2015; Rodriquez and Hamoud, 2024).

Pemulihan dan konservasi kesuburan tanah merupakan upaya terintegrasi untuk mengembalikan dan mempertahankan kapasitas tanah dalam menyediakan unsur hara, air, serta lingkungan yang mendukung pertumbuhan tanaman secara berkelanjutan. Strategi ini menjadi semakin penting seiring meningkatnya tekanan terhadap sumber daya lahan akibat intensifikasi pertanian, degradasi tanah, dan perubahan iklim.

Pendekatan pemulihan kesuburan tanah umumnya difokuskan pada perbaikan sifat fisik, kimia, dan biologi tanah secara simultan. Dari aspek fisik, upaya yang dilakukan meliputi pengendalian erosi melalui teknik konservasi seperti terasering, penanaman tanaman penutup tanah (*cover crops*), dan pengolahan tanah minimum (*minimum tillage*). Praktik-praktik ini bertujuan untuk meningkatkan stabilitas agregat tanah, memperbaiki porositas, serta meningkatkan kapasitas infiltrasi dan retensi air.

Dari sisi kimia, pemulihan kesuburan tanah dilakukan melalui pengelolaan hara yang berimbang dan efisien. Penerapan pemupukan berimbang berbasis uji tanah menjadi kunci dalam mengoptimalkan ketersediaan unsur hara sekaligus meminimalkan kehilangan hara ke lingkungan. Selain itu, penggunaan amelioran seperti kapur pertanian atau dolomit diperlukan pada tanah masam untuk menurunkan toksisitas aluminium dan meningkatkan pH tanah. Penambahan bahan organik, baik dalam bentuk pupuk kandang, kompos, maupun biochar, juga

berperan penting dalam meningkatkan kapasitas tukar kation (KTK) serta ketersediaan hara makro dan mikro.

Aspek biologi tanah juga menjadi komponen penting dalam strategi pemulihan kesuburan. Peningkatan kandungan bahan organik akan mendorong aktivitas mikroorganisme tanah yang berperan dalam dekomposisi bahan organik dan siklus hara. Penggunaan pupuk hayati *(biofertilizer*) dan inokulan mikroba dapat mempercepat proses biologis yang mendukung ketersediaan hara, seperti fiksasi nitrogen dan pelarutan fosfat.

Selain itu, konservasi kesuburan tanah menekankan pada praktik pengelolaan lahan yang berkelanjutan, seperti rotasi tanaman, agroforestri, dan sistem pertanian terpadu. Praktik ini tidak hanya menjaga keseimbangan hara tanah, tetapi juga meningkatkan keanekaragaman hayati dan resiliensi agroekosistem terhadap gangguan lingkungan. Pendekatan berbasis lanskap dan partisipasi petani juga diperlukan untuk memastikan keberlanjutan implementasi strategi konservasi tanah dalam jangka panjang.

Secara keseluruhan, strategi pemulihan dan konservasi kesuburan tanah harus dilakukan secara terpadu dan berbasis pada kondisi spesifik lokasi (*site-specific management*). Integrasi antara teknologi, praktik agronomis, dan kebijakan pengelolaan lahan menjadi kunci dalam menjaga produktivitas tanah sekaligus mendukung ketahanan pangan dan keberlanjutan lingkungan.

Tanah sebagai fondasi utama dalam sistem agroekologi, tidak hanya berfungsi sebagai media tumbuh, tetapi juga sebagai sistem hidup yang mengatur siklus hara, dinamika air, serta interaksi biotik yang menentukan keberlanjutan produksi pertanian. Kualitas tanah yang terjaga akan mendukung produktivitas yang stabil, efisiensi penggunaan input, dan ketahanan terhadap tekanan lingkungan, termasuk perubahan iklim. Oleh karena itu, pengelolaan tanah harus dilakukan secara bijaksana melalui pendekatan konservasi, peningkatan kandungan bahan organik, dan pemanfaatan proses biologis alami. Dengan demikian, tanah tidak sekadar dipandang sebagai sumber daya yang dieksploitasi, melainkan sebagai aset ekologis yang harus dilindungi dan dipulihkan demi keberlanjutan agroekosistem dan ketahanan pangan di masa depan.

BAB 5
KEANEKARAGAMAN HAYATI AGROSISTEM

5.1 Konsep Biodiversitas dalam Sistem Pertanian

Keanekaragam hayati (*biological-diversity* atau *biodiversity*) bagian dari sumber daya alam (SDA) yang begitu penting untuk kelangsungan hidup seluruh makhluk hidup (hewan, tumbuhan, dan mikroorganisme) dengan berbagai tingkat ragam, variasi maupun frekuensi termasuk ragam genetik dan ekosistem di bumi (Kusumana, 2015). Hasil evolusi dari beberapa milyaran tahun lalu merupakan keanekaragaman yang terbentuk saat ini dengan campur tangan manusia, dimana hal ini manusia menjadi bagian terpadu dalam pembentukan jaringan kehidupan. Menurut (Kusumana, C., 2015) bagian terbesar dari jumlah total spesies 2,1 juta merupakan organisme kecil yakni serangga, diyakini di dunia terdapat kurang lebih 13 juta spesies. Sedangkan perkiraan dari *UN Environment Programme* (UNEP) terdapat 9-15 juta spesies yang menduduki bumi (Mora, *et al*., 2011). Biodiversitas dalam sistem pertanian merujuk pada variasi dan keberagaman spesises tumbuhan di bumi ini, termasuk ragam genetik disetiap spesies, ragam berbagai spesies, serta ragam di antara ekosistem tumbuhan. Konsep ini mencakup semua jenis tumbuhan, baik yang dikenal secara ilmiah maupun yang belum teridentifikasi, serta hubungan mereka dengan lingkungan dan spesies lain.

Tiga tingkatan keanekaragaman hayati berdasarkan (Purvis and Hector, 2000) ,yaitu:

1. **Keanekaragaman spesies**

   Merupakan ragam dari seluruh spesies yang ada di bumi salah satunya berupa mikroorganisme eukariot (bakteri, protista) dan spesies dengan jumlah sel banyak (tumbuhan, jamur). dalam setiap spesies terkandung perbedaan genetik seperti contoh terbentuknya varietas tanaman. Penyusun materi genetik sangat menentukan keunikan setiap spesies. Karakteristik lain yang menentukan keanekaragaman spesies bisa berasal dari perbedaan ekosistem (gurun, hutan,

lahan basah, dan sebagainya). Jumlah spesis tumbuhan yang berbeda dalam suatu area tertentu. Keanekaragaman spesies penting untuk menjaga keseimbangan ekosistem dan fungsi ekologis.



Pisang Raja (*Musa acuminata* x Musa balbisiana)

Asal: Jawa Barat



Acuminata (*Musa acuminata* Colla var. *Acuminata*)

Asal: Papua



Alasensis ((*Musa acuminata* Colla var. *Alasensis* Nasution)

Asal: Aceh Tenggara

Gambar 5.1: Keragaman Spesies Tanaman Pisang (Ifah, *et al*., 2025)

2. Keanekaragaman genetic

merupakan ragam materi genetik dalam setiap spesies, bisa terdapat disetiap populasi dalam perbedaan wilayah, ataupun setiap individu dalam populasi yang sama. Ragam genetik disetiap tanaman dalam satu spesies, termasuk perbedaan genetik diantara individu sangat penting untuk ketahanan tumbuhan terhadap penyakit, hama, dan perubahan iklim. Sebagi contoh varietas pisang yang berbeda-beda, seperti pada varietas unggul dan lokal menunjukkan perbedaan genetik yang mempengaruhi ketahanan terhadap penyakit, rasa maupun bentuk. Berikut Gambar 5.2 salah satu contoh keragaman genetik dari tanaman piang yang dapat ditampilkan perbedaanya pada bagian buahnya, ragam genetik buah pisang sangat melimpah dan unik, di Indonesia sendiri terdapat kebun plasma nutfah piasng terbesar di Asia Tenggara yang terletak di Yogyakarta, kebun tersebut digunakan sebagai sumber galur murni untuk program pemuliaan tanaman (Ifah, *et al*., 2025)



Gambar 5.2: Keragaman Genetik Buah Pisang

3. Keanekaragaman ekosistem

merupakan ragam komunitas biologi dengan lingkungan yang berdeda-beda. Ekosistem di dalam sistem pertanian merupakan kelompok tumbuhan dengan interaksinya msing-masing yang terdapat pada wilayah tertentu. Acuannya terdapat interaksi dari berbagai spesies yang hidup secara bersama di lingkungan yang sama, sebagai contohnya terdapat dua hutan dalam suatu daerah, spesies, komunitas dan habitat akan menunjukkan perbedaan satu dengan yang lainnya. Kekayaan biosfer akan tetap terjaga dalam suatu wilayah asal dengan komponen ekosistem, komunitas alami dan habitat dengan ahli ekologi menyebutnya sebagai konservasi in-situ. Pada Gambar 5.3 menunjukkan ragam ekosistem (agroforestri dan lahan sawah) yang ditanami dengan spesies tanaman yang sama.



Padi Gogo di Lahan Hutan Jati Padi Gamagora di Lahan Sawah

Gambar 5.3: Keragaman Ekosistem Tanaman Padi

5.2 Keanekaragaman Genetik Tanaman Pangan

Keanekaragaman benih dan tanaman lokal merupakan kunci ketahanan pangan Indonesia. Saat ini sangat minim sekali sumber benih pangan yang berkualitas tinggi, hal ini ini menjadikan hasil tanaman pangan dengan kuantitas masih tergolong rendah. Lahan sangat diperlukan untuk memperoleh sumber kebutuhan benih yang wajib dimiliki oleh lembaga perbenihan dan perusahaan tanaman pangan. Pada program penanaman terutama untuk tanaman pangan kebutuhan benih belum bisa tercukupi dengan baik, sehingga perlu adanya penyediaan benih berkualitas untuk jangka pendek, kemudian untuk jangka panjang perlu adanya pengembangan benih melalui program pemuliaan tanaman dan pengelolaan sumber daya genetik. Peningkatan produktivitas dapat ditingkatkan dengan penggunaan benih yang berkualitas sehingga dapat berdampak pada pendapatan. Berikut Gambar 5.4 merupakan ragam benih spesies tanaman padi lokal.



Gambar 5.4: Ragam benih lokal (*nationalgeographic*)

Konservasi plasma nutfah bukan sekedar isu akademis, tetapi juga menyangkut masa depan pangan. Ditengah perubahan iklim dan tergerusnya kearifan lokal, keterlibatan komunitas dalam menjaga sumber daya genetik menjadi semakin mendesak. Koperasi Benih Kita Indonesia (KOBETA) diprakarsai oleh dua jaringan, yaitu komunitas Benih Lokal Berdaulat (BLB) berupa kumpulan pegiat yang beranggotakan aktivis-aktivis dan jaringan Desa Mandiri Tanpa Korupsi (DMTK). Benih lokal tersebut merupakan benih yang tumbuh secara alami di alam yang membentuk varian yang sangat banyak/ keanekaragaman spesies maupun

genetik. Keanekaragaman hayati di Indonesia menduduki tingkat terbesar di dunia, dalam hal ini Indonesia kaya dengan ragam genetika yang begitu melimpah.

Benih lokal yang begitu beragam menjadikan benih menjadi unggul karena dirakit melalui program pemuliaan tanaman. Jalur *ex-situ* cenderung lebih teknis, sedangkan jalur *in-situ* melibatkan partisipasi petani melalui hubungan antara petani, benih dan tradisi.

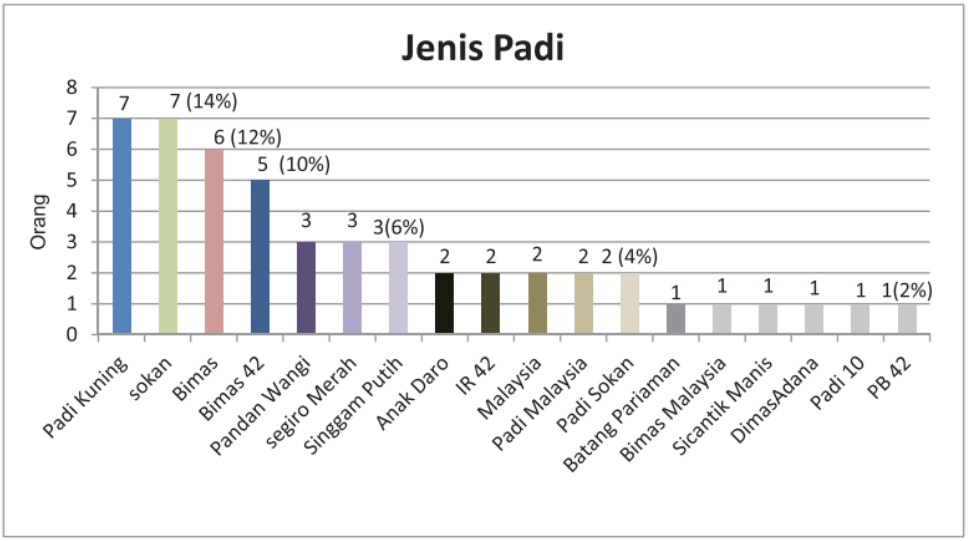
Undang-undang Nomor 18 mengenai pangan bisa didapatkan dari berbagai jenis dan sumber yang didapatkan. Berbagai tanaman pangan yang kaya akan sumber karbohidrat, lemak, dan protein, diantaranya: 1) kelompok serealia (penghasil karbohidrat dan protein, 2) kelompok polong semusim (penghasil protein dan lemak), dan 3) kelompok umbi-umbian (penghasil karbohidrat).



Gambar 5.5: Tiga Komoditas Utama Tanaman Pangan (Padi, Jagung, Kedelai)

Sumber daya lahir varietas unggul tahan penyakit, berdaya hasil tinggi, dan mampu beradaptasi dengan perubahan ilkim. Keanekaragaman genetik tanaman sangat vital. Pengertian Sumber Daya Genetik (SDG) memiliki peranan yang begitu melekat, terutama dalam bidang pemuliaan tanaman. Terlebih ancaman perubahan iklim global menjadikan masalah utama sehingga dapat mempengaruhi jumlah sediaan ragam genetik. Kondisi iklim yang tidak menentu ini seperti halnya bencana alam dan pemanasan global menjadi masalah utama buruknya pertumbuhan dan hasil pada tanaman. Didalam upaya pemenuhan kebutuhan pangan secara nasional tidak lepas dari penggunaan varietas-varietas tanaman

unggulan. Seperti halnya sumber varietas genetik dari padi lokal sangat banyak digunakan oleh petani, namun untuk berbagai komoditas lain belum dimanfaatkan secara optimal demi mendukung program pemuliaan tanaman. Menurut (Marlina, *et al*., 2023) SDG padi di wilayah Singingi menunjukkan bahwa varietas beras kuning dan sokan merupakan varietas padi yang paling banyak ditanam oleh petani, masing-masing sebesar 14%, sedangkan varietas bimas sebesar 12%. Padi yang diperoleh dari proses budidaya di wilayah tersebut dikenal memiliki aroma yang harum, warna putih, serta tekstur tidak lengket atau pera. Berikut Gambar 5.6 ditampilkan beberapa varietas padi yang ditanam petani di Kuantan Singingi.



Gambar 5.6: Presentase Varietas Padi di Kuantan Singingi (Marlina, *et al*., 2023)

Salah satu ragam tanaman yang tidak kalah pentingnya adalah sorgum, tanaman yang kaya akan karbohidrat ini masih satu keluarga dengan padi dan jagung, masuk dalam kategori serealia. Sorgum ini diyakini memiliki keunggulan karena daya adaptasi yang cukup baik seperti adaptasi luas, toleran terhadap cekaman air, tahan terhadap HPT, dan menunjukkan produktivitas tinggi. Menurut (Munthe, *et al*., 2024) dalam pembahasan berjudul Keragaman Genetik dan Heritabilitas Karakter Tinggi Tanaman dan Jumlah Daun Beberapa Genotipe Sorgum, ragam genetik tampak pada karakter tinggi tanaman, dengan taksiran nilai heritabilitas berada pada kategori tinggi, yaitu 0,67–0,93.



Variabel pengamatan	Sumber keragaman				
	Ragam genetik (σ^2_g)	Ragam fenotip (σ^2_e)	Ragam lingkungan (σ^2_f)	Heritabilitas (h^2)	Kriteria
*2 MST					
Tinggi tanaman	7,40	3,58	10,98	0,67	Tinggi
Jumlah daun	0,00	0,05	0,05	0,04	Rendah
*3 MST					
Tinggi tanaman	29,56	6,82	36,38	0,81	Tinggi
Jumlah daun	0,00	0,05	0,05	0,04	Rendah
*4 MST					
Tinggi tanaman	101,12	11,55	112,67	0,90	Tinggi
Jumlah daun	0,03	0,10	0,13	0,24	Sedang
*5 MST					
Tinggi tanaman	223,31	18,10	241,41	0,93	Tinggi
Jumlah daun	0,12	0,29	0,40	0,29	Sedang
*6 MST					
Tinggi tanaman	515,52	47,81	563,33	0,92	Tinggi
Jumlah daun	0,03	0,31	0,34	0,08	Rendah

Gambar 5.7: Tanaman Sorgum Kriteria Heritabilitas (Munthe, *et al*., 2024)

5.3 Keanekaragaman Serangga, Polinator dan Musuh Alami

Keanekaragaman serangga, polinator, dan musuh alami sangat krusial bagi keseimbangan ekosistem pertanian, dengan peran aktif dalam penyerbukan dan pengendalian hama hayati. Kelimpahan mereka dipengaruhi oleh ketersediaan pakan, habitat, dan musim, dengan keanekaragaman tertinggi sering ditemukan pada area agroforestri. Tipe pegunungan, ketinggian dan tutupan yang merupakan karakteristik dari lahan perkebunan berperan utama dalam membentuk komunitas berbagai serangga. Baik secara ekologis, seperti contohnya tanaman perkebunan kopi justru keanekaragaman serangga tergolong tinggi (Rasiska and Khairullah, 2017). Fungsi penting serangga di suatu ekosistem selain sebagai hama adalah polinator yang memberikan dampak positif seperti meminimalisir jumlah hama dan dekomposer bahan organik yang sangat dipengaruhi oleh perubahan lingkungan (Morcatty, *et al*., 2022); (Rahman, *et al.,* 2024).

Menurut (Utari, *et al.*, 2024) ragam serangga beserta fungsinya di perkebunan kopi Kabupaten Bandung menunjukkan bahwa kawasan perkebunan kopi memiliki potensi sebagai ruang pelestarian keanekaragaman serangga. Meskipun kelompok herbivora lebih dominan, keberadaan serangga polinator, musuh alami, dan dekomposer tetap berperan penting dalam menjaga keseimbangan ekosistem serta mendukung produktivitas pertanian.

Pada tanaman pangan, keanekaragaman serangga polinator dan musuh alami juga dapat dilihat dari (Anita, *et al*., 2022) mengenai lama mekar bunga refugia terhadap keragaman populasi musuh alami dan hama pada tanaman padi. Lama mekar

bunga berpengaruh terhadap jumlah kunjungan dan keragaman arthropoda pada petak pengamatan. Zinnia elegans yang mekar sepanjang hari menunjukkan jumlah kunjungan arthropoda paling tinggi, yaitu sebesar 63%.Selain bermanfaat sebagai pengendalian hama pada tanaman pangan, tanaman tersebut juga terbukti dapat meningkatkan keragaman tanaman di agroekosistem sehingga berdampak pada kelimpahan dan keragaman predator entomofaga. Tanaman refugia merupakan suatu mikro habitat yang menyediakan tempat berlindung sementara bagi musuh alami hama, seperti predator dan parasitoid, serta membari keuntungan terhadap interaksi biotik ekosistem seperti polinator. peningkatan keragaman tanaman disekitar tanaman utama akan meningkatkan adanya kontrol biologi serangga hama oleh musuh alami yang hidup pada tanaman refugia.

5.4 Peran Mikrobioma Tanah dalam Produktivitas Lahan

Mikrobioma merupakan kumpulan dadi berbagai macam mikroorganisme, fungi, virus, bakteri, protozoa, dan organisme lainnya (Laia and Lase, 2025). Mikrobioma diyakini dapat meningkatkan jumlah nutrisi dalam media tanam, memperbaiki sifat fisik tanah, tahan terhadap hama penyakit tanaman dan cekaman biotik maupun abiotik. Peran mikrobioma tanah memberikan manfaat besar bagi tanaman karena dapat mendukung pertumbuhan, produktivitas, serta ketahanan tanaman terhadap tekanan biotik dan abiotik. Di dalam (Laia and Lase, 2025), peran mikrobioma tanah dalam meningkatkan produktivitas dan ketahanan tanaman menunjukkan bahwa mikroba yang terkandung di dalam media tanam mampu memperbaiki kualitas media serta membantu pengendalian penyakit secara lebih terarah. Pada intinya produksi pada tanaman di lahan marginal dapat dilanjutkan dan ditingkatkan secara berkala dan berkelanjutan dengan syarat pengurangan penggunaan bahan kimia sintetis, perbuatan pencemaran lingkungan, dan mendukung penuh operasi ketahanan pangan.

5.5 Konservasi Biodiversitas sebagai Strategi Ketahanan Pangan

Sumber ketahanan pangan di dunia berasal dari keanekaragaman hayati berserta komponen-komponennya. Keberlanjutan menjadikan manusia dapat melanjukan proses kehidupannya setiap waktu dengan memanfaatkan sumber daya alam (SDA), dalam hal ini menunjukkan pentingnya konservasi, sedangkan efektivitas dapat dicapai apabila disertai dengan peraturan-peraturan yang ditetapkan. Tanpa

adanya peraturan legal untuk mencegah minimnya keanekaragaman hayati, sumber daya alam akan mengalami penurunan yang signifikan sehingga nilai kebermanfaatnannya akan hilang.

Keanekaragaman hayati dapat dipandang sebagai fondasi ketahanan pangan karena manusia bergantung untuk mendapatkan sumber pangan. Secara eksplisit CBD (Konvensi mengenai keanekaragaman hayati) fokus terhadap jasa ekosistem, nilai potensial pada sumber pangan saat ini ada pada kekayaan ekosistem disertai dengan keanekaragaman spesies dan genetik. Sebagai sumber pangan terbaru maupun alternatifnya terbukti dapat didedikasikan untuk beradaptasi pada perubahan iklim saat ini dan masa mendatang, secara jelasnya bahwa keanekaragaman hayati menyediakan solusi bagi permasalahan pangan.

Tujuan utama dari konservasi keanekaragaman hayati ada pada pencegahan kepunahan, dimana pencegahan tersebut fondasinya ada pada konservasi tingkat spesies, sedangkan konservasi keanekaragaman hayati juga harus dilaksanakan di tingkat ekosistem, spesies, dan genetik. Perlindungan ekosistem saat ini banyak terkendala dengan lahan untuk kebutuhan ekonomi pembangunan sehingga terkendala dalam melindungi tipe-tipe ekosistem (kawasan konservasi). beberapa ancaman dalam konservasi spesies yakni tingkat kepunahan. Konservasi di tingkat genetik berperan untuk menghindari pencurian (*biopiracy*), baik berupa materi genetik, termasuk informasi di dalamnya dan asal-usulnya yang diperoleh dari konsisi in-situ dan ex-situ. Tanaman pangan yang saat ini tidak bisa bertahan dengan kondisi iklim yang berubah. Penemuan-penemuan vairetas-varietas baru tanaman pangan sangat bergantung pada keanekaragaman genetik tumbuhan. Varietas tanaman pangan yang bernilai tinggi saat ini merupakan hasil dari konservasi genetik yang efektif. Oleh karena itu, konservasi keragaman genetik menjadi sangat penting (Samedi, 2021)

BAB 6
SISTEM PERTANIAN BERKELANJUTAN

6.1 Konsep dan Prinsip Pertanian Berkelanjutan

Pertanian berkelanjutan adalah suatu proses yang mengoptimalkan pemanfaatan sumber daya pertanian untuk memenuhi kebutuhan dan kesejahteraan masyarakat saat ini sambil mempertahankan kebutuhan dan kesejahteraan generasi yang akan datang (Parmila *et al.,* 2022). Pertanian berkelanjutan memfokuskan pendekatan dalam pengelolaan sistem pertanian yang bertujuan memenuhi kebutuhan pangan dan pemanfaatan sumber daya alam secara bijaksana tanpa menimbulkan kerusakan terhadap aspek lingkungan, sosial, maupun ekonomi. Pendekatan diarahkan untuk mewujudkan ketahanan pangan dalam jangka panjang sekaligus meningkatkan kesejahteraan serta kualitas hidup petani dan masyarakat pedesaan.

Adanya permasalahan global seperti perubahan iklim, degradasi lahan, eksploitasi sumber daya alam, dan ketimpangan akses terhadap teknologi dan pasar telah mengancam keberlanjutan sistem pertanian tradisional. Oleh karena itu, pengembangan pertanian berkelanjutan menjadi kebutuhan mendesak dalam rangka mewujudkan ketahanan ekonomi lokal dan keberlanjutan ekosistem jangka panjang (Putri *et al.*, 2025)

Melalui Undang-Undang Nomor 12 Tahun 1992 tentang Sistem Budidaya Tanaman yang digantikan oleh Undang-Undang Nomor 22 Tahun 2019 menjadi Sistem Budidaya Pertanian Berkelanjutan, ditegaskan bahwa prinsip pembangunan berkelanjutan harus terus dikembangkan dalam sektor pertanian melalui penerapan sistem budidaya yang tepat. Hal ini bertujuan untuk mewujudkan kedaulatan pangan dengan tetap memperhatikan kapasitas daya dukung ekosistem, serta upaya mitigasi dan adaptasi terhadap perubahan iklim. Dengan demikian, diharapkan tercipta sistem pertanian yang lebih maju, efisien, tangguh, dan berkelanjutan.

Prinsip-prinsip pertanian berkelanjutan mencakup beberapa aspek penting yang saling berkaitan dalam mewujudkan sistem pertanian yang tangguh dan berdaya saing. Pertama, prinsip ekologi menekankan pentingnya menjaga keseimbangan dan keberlanjutan ekosistem, sehingga praktik pertanian tidak hanya berorientasi

pada produktivitas, tetapi juga ramah lingkungan dan mampu mendukung kehidupan dalam jangka panjang. Kedua, prinsip ekonomi menggarisbawahi bahwa pertanian berkelanjutan harus mampu memberikan keuntungan finansial, efisien dalam pemanfaatan sumber daya, serta menjamin kesejahteraan petani dan keadilan dalam rantai nilai pertanian. Ketiga, prinsip keadilan berfokus pada terciptanya keseimbangan sosial dan ekonomi melalui distribusi sumber daya yang merata, pemenuhan hak-hak yang setara, serta perlindungan terhadap kelompok rentan. Keempat, prinsip manusiawi menitikberatkan pada kesejahteraan manusia dengan memastikan bahwa program pertanian tidak hanya menguntungkan secara ekonomi dan ramah lingkungan, tetapi juga menghormati hak asasi manusia. Terakhir, prinsip keluwesan menekankan kemampuan sistem pertanian untuk beradaptasi terhadap berbagai perubahan dan tantangan, seperti perubahan iklim, dinamika pasar, dan perkembangan teknologi, sehingga tetap produktif dan efisien dalam berbagai kondisi (Florentina, 2024)

6.2 Pertanian Organik : Filosofi dan Praktik

Pertanian organik berkembang sebagai bentuk respons terhadap berbagai dampak negatif dari sistem pertanian konvensional yang diperkenalkan melalui Revolusi Hijau. Kesadaran masyarakat akan risiko dan dampak negatif penggunaan bahan kimia sintetis dalam praktik pertanian semakin meningkat. Konsumen kini lebih selektif dalam memilih bahan pangan yang tidak hanya aman bagi kesehatan, tetapi juga ramah terhadap lingkungan. Tren gaya hidup sehat dengan pendekatan *back to nature* semakin berkembang, menggantikan pola lama yang bergantung pada input non-alami seperti pupuk anorganik, pestisida sintetis, dan hormon pertumbuhan dalam sistem produksi pertanian.

Pertanian Organik adalah sistem produksi yang menjaga kesehatan tanah, ekosistem, dan manusia. Sistem ini bergantung pada proses ekologis, keanekaragaman hayati, dan siklus yang disesuaikan dengan kondisi lokal, bukan pada penggunaan input yang berdampak buruk. Pertanian Organik menggabungkan tradisi, inovasi, dan ilmu pengetahuan untuk memberi manfaat bagi lingkungan bersama dan mempromosikan hubungan yang adil serta kualitas hidup yang baik bagi semua pihak yang terlibat (IFOAM, 2008).

Filosofi yang mendasari pertanian organik dapat dibagi menjadi (Prawata, 2026) :

1. **"*Feeding the Soil that Feeds the Plants*":** memberi makan tanah agar tanah mampu menyehatkan tanaman. Pendekatan ini menitikberatkan pada peningkatan kesuburan tanah secara alami sehingga tanah berfungsi optimal sebagai penyedia unsur hara, bukan dengan langsung memberikan nutrisi sintetis kepada tanaman.
2. **Kesehatan holistik (*health*):** dalam pertanian organik menekankan pentingnya menjaga dan meningkatkan kesehatan secara menyeluruh, mencakup sistem tanah, tanaman, hewan, hingga manusia sebagai satu kesatuan ekosistem.
3. **Prinsip ekologi (*ecology*):** menggarisbawahi bahwa praktik pertanian harus selaras dengan proses alami dan siklus ekosistem, serta memanfaatkan mekanisme alam sebagai dasar pengelolaan.
4. **Keadilan (*fairness*):** mengandung makna bahwa sistem pertanian harus mampu menciptakan hubungan yang adil, baik bagi manusia maupun organisme lain, termasuk dalam pemanfaatan sumber daya dan keberlanjutan lingkungan.
5. **Kepedulian (*care*):** mencerminkan perlunya pengelolaan pertanian yang dilakukan secara bijaksana, penuh kehati-hatian, dan bertanggung jawab demi menjaga keseimbangan lingkungan serta kesejahteraan generasi saat ini dan masa depan.
6. **Kemandirian:** petani menekankan upaya untuk meminimalkan ketergantungan terhadap input eksternal berbasis kimia, dengan lebih mengoptimalkan penggunaan potensi sumber daya setempat yang ada di lingkungan sekitar.

Pertanian organik merupakan sistem budidaya yang menekankan keselarasan dengan proses alami melalui penerapan berbagai praktik ramah lingkungan. Dalam implementasinya, pertanian organik dapat diwujudkan melalui penerapan berbagai praktik budidaya yang mengedepankan prinsip keberlanjutan, seperti (Panday, *et al.,* 2024):

1. **Pengelolaan Kesuburan Tanah:** Pertanian organik menitikberatkan pada upaya memperbaiki dan menjaga kesehatan tanah dengan pendekatan alami. Penerapannya mencakup penggunaan bahan organik seperti kompos, pupuk kandang, serta pupuk hijau sebagai sumber hara. Selain itu, rotasi tanaman dan penanaman tanaman penutup berperan penting dalam memperbaiki struktur tanah, meningkatkan aktivitas mikroorganisme, serta mempertahankan keseimbangan unsur hara di dalam tanah.
2. **Keanekaragaman dan Rotasi Tanaman:** Sistem penanaman yang beragam merupakan hal mendasar dalam pertanian organik. Petani menerapkan rotasi tanaman, tumpang sari, dan polikultur untuk mengurangi wabah hama, meningkatkan nutrisi tanah, dan memperkuat ketahanan ekosistem. Strategi-strategi ini memutus siklus hama dan penyakit secara alami.
3. **Pengendalian Organisme Penggangu Tanaman Secara Biologis:** Pertanian organik menggunakan metode pengendalian hayati seperti predator alami, parasitoid, dan agen mikroba, daripada pestisida sintetis. Selain itu, pestisida nabati dan ekstrak tumbuhan juga digunakan. Varietas tahan hama dan pengelolaan habitat adalah strategi pencegahan yang paling penting.
4. **Penggunaan Input Organik:** Sistem pertanian organik mengandalkan pupuk alami dan bahan baku yang berasal dari tumbuhan, hewan, atau mineral. Pupuk sintetis, herbisida, dan organisme hasil rekayasa genetika tidak diperbolehkan. Pengelolaan nutrisi didasarkan pada daur ulang sumber daya pertanian.
5. **Pengendalian Gulma:** Gulma dikendalikan melalui metode mekanis dan budidaya, seperti pemupukan, penyiangan manual, rotasi tanaman, dan penggunaan tanaman penutup. Pendekatan-pendekatan ini menurunkan ketergantungan pada herbisida kimia.
6. **Integrasi Ternak:** Dalam banyak sistem pertanian organik, ternak diintegrasikan ke dalam program pertanian. Kotoran hewan berkontribusi terhadap kesuburan tanah, sementara ternak dipelihara dalam kondisi yang memperhatikan kesejahteraan hewan, dengan pakan organik, serta tanpa penggunaan hormon pertumbuhan atau antibiotik secara rutin.

7. **Keberlanjutan Lingkungan:** Pertanian organik mempromosikan keanekaragaman hayati, mengurangi polusi, dan melestarikan sumber daya air. Pertanian organik meningkatkan jasa ekosistem seperti penyerbukan dan pengendalian hama alami, yang berkontribusi pada ketahanan iklim.
8. **Sertifikasi dan Standar: P**ertanian organik mengikuti standar dan sistem sertifikasi yang ketat untuk memastikan kepatuhan. Standar-standar ini mengatur produksi, pengolahan, dan pelabelan untuk menjamin bahwa produk memenuhi kriteria organik.

6.3 Pertanian Regeneratif dan Pemulihan Ekosistem

Degradasi lahan pertanian mencerminkan kualitas relasi antara manusia dan alam. Apabila pengelolaan lahan dilakukan tanpa memperhatikan prinsip keberlanjutan, maka dampak negatifnya pada akhirnya akan dirasakan oleh manusia sendiri. Oleh karena itu, diperlukan penerapan sistem pertanian yang berbasis ekologi dan berwawasan lingkungan, sehingga lahan tetap mampu berproduksi secara optimal, baik untuk kebutuhan saat ini maupun bagi generasi mendatang. Praktik pertanian modern yang berkembang saat ini juga telah menimbulkan berbagai dampak lingkungan, salah satunya peningkatan emisi gas rumah kaca yang mencapai sekitar 25% secara global, yang turut memperparah perubahan iklim. Kondisi ini menjadikan jejak karbon dari sektor pertanian sebagai tantangan bersama yang perlu segera diatasi. Selama hampir satu abad terakhir, pertumbuhan populasi dunia serta dominasi sistem ekonomi kapitalistik telah mendorong intensifikasi produksi pertanian secara besar-besaran. Untuk memenuhi kebutuhan pangan global, pola pengelolaan lahan pun cenderung bergeser ke arah yang kurang berkelanjutan, sehingga berpotensi merusak keseimbangan ekosistem (Sabang, 2025). Pertanian konvensional juga menyebabkan penurunan kesehatan tanah, penurunan produktivitas tanah dalam jangka panjang yang akhirnya mengancam ketahanan pangan.

Pertanian regeneratif merupakan suatu pendekatan yang diarahkan untuk memulihkan kondisi ekosistem pertanian, khususnya kesuburan tanah, sekaligus menjaga kelestarian lingkungan dan meningkatkan ketahanan terhadap perubahan iklim. Pendekatan ini mengintegrasikan berbagai praktik pertanian dan prinsip ekologi, seperti rotasi tanaman, pemanfaatan kompos, pengurangan penggunaan input sintetis, hingga penerapan agroforestri. Penerapan praktik-praktik berkelanjutan tersebut mampu meningkatkan keanekaragaman hayati serta

memperbaiki lahan yang telah mengalami degradasi. Dampaknya, kualitas tanah menjadi lebih baik dan sumber daya air lebih terjaga. Kondisi ini berkontribusi pada peningkatan produktivitas dan keuntungan usaha tani, sekaligus membantu petani menjaga kestabilan hasil panen. Secara umum, pertanian regeneratif berupaya menekan dampak negatif terhadap lingkungan dengan mengedepankan pendekatan berbasis proses alami yang mendukung fungsi tanah. Penekanan pada kesehatan tanah juga berperan dalam mitigasi perubahan iklim, salah satunya melalui peningkatan kemampuan tanah dalam menyimpan karbon (Deiss, 2025).

Tidak terdapat satu pendekatan atau solusi yang bersifat universal dalam penerapan pertanian regeneratif. Petani dapat memilih dan mengombinasikan berbagai praktik budidaya yang disesuaikan dengan kondisi lingkungan, sumber daya, serta kebutuhan spesifik yang mereka miliki. Pertanian regeneratif menggambarkan sistem pertanian yang berdampak positif terhadap lingkungan. Praktik regeneratif dapat memulihkan dan melindungi kesehatan tanah, yang merupakan dasar untuk produksi tanaman yang berkelanjutan. Metode pertanian regeneratif mencakup beberapa praktik penting, antara lain (Eratani, 2025):

1. **Pemulihan Kualitas Tanah:** Dengan menekan penggunaan bahan kimia sintetis serta menerapkan metode budidaya organik, kondisi tanah dapat diperbaiki kembali. Berdasarkan The World Bank, praktik pertanian yang tepat mampu meningkatkan produktivitas hingga 79% pada lahan yang telah mengalami degradasi.
2. **Efisiensi dan Konservasi Air:** Penerapan sistem irigasi hemat air, seperti irigasi tetes, dapat menurunkan penggunaan air hingga sekitar 40% dibandingkan cara konvensional. Selain itu, pendekatan pertanian regeneratif juga mengedepankan pengelolaan air yang lebih bijak untuk mencegah pemborosan.
3. **Peningkatan Biodiversitas:** Diversifikasi tanaman dalam satu lahan berkontribusi pada terbentuknya ekosistem yang lebih stabil dan adaptif terhadap perubahan iklim. Menurut UN Environment Programme, peningkatan keanekaragaman hayati di lahan pertanian dapat menekan risiko kegagalan panen.

4. **Penyerapan Karbon:** Pemanfaatan tanaman penutup tanah serta sistem agroforestri (integrasi pohon dengan tanaman budidaya) berperan dalam menyerap karbon dioksida dari atmosfer. Project Drawdown menyatakan bahwa agroforestri memiliki potensi menyerap hingga 22 gigaton CO_2 pada tahun 2050.

Salah satu contoh penerapan konsep pertanian regeneratif dapat ditemukan di Peru dan Bolivia, di mana sekitar 85% perkebunan kopi dikelola oleh petani kecil dengan luas lahan kurang dari 2 hektar. Inisiatif yang dikenal sebagai proyek "Café Correcto" hadir sebagai solusi bagi petani kopi dalam menghadapi tantangan perubahan iklim global, sekaligus menjaga keberlanjutan produksi dan kualitas hasil kopi. Tanaman kopi sendiri tergolong sangat rentan terhadap perubahan iklim karena produktivitasnya sangat dipengaruhi oleh fluktuasi curah hujan dan suhu. Melalui dukungan pendanaan dari Uni Eropa, proyek "Café Correcto" mengimplementasikan teknik agroforestri yang tidak hanya meningkatkan produktivitas dan nilai ekonomi kopi, tetapi juga mendorong diversifikasi tanaman serta memperbaiki kesuburan tanah. Proyek ini turut memperluas sumber pendapatan petani melalui gerakan alternatif seperti budidaya lebah dan pengembangan produk berbasis ekonomi sirkular. Upaya lain yang dilakukan adalah berbagi pengetahuan dengan koperasi guna memperkuat posisi tawar petani dalam rantai pasar kopi, serta memperkokoh organisasi kopi dalam melakukan advokasi. Advokasi tersebut mencakup perbaikan regulasi terkait formalisasi tenaga kerja, peningkatan akses layanan kesehatan, serta penyediaan jaminan asuransi bagi para petani (Sabang, 2025).

Di dalam negeri sendiri aplikasi pertanian regeneratif dapat ditemukan di daerah Lampung Timur. Di Lampung Timur, pertanian regeneratif sedang berkembang, petani mulai menggunakan metode seperti agroforestry dan penanaman penutup untuk meningkatkan kesuburan tanah. Beberapa kelompok petani di daerah tersebut juga bekerja sama dengan organisasi non pemerintah untuk mendapatkan pelatihan dan akses ke praktik berkelanjutan. Tantangan seperti kurangnya pengetahuan dan dukungan kebijakan masih menjadi hambatan, meskipun ada kemajuan. Pertanian regeneratif mulai digunakan di Lampung Timur untuk meningkatkan keberlanjutan dan kesuburan tanah. Untuk meningkatkan kualitas tanah, petani lokal menggunakan metode seperti agroforestry dan penggunaan pupuk organik, tetapi masih ada masalah seperti kurangnya pengetahuan dan ketersediaan pasar. Salah satu tantangan utama dalam pengembangan pertanian

regeneratif saat ini adalah terbatasnya dukungan kebijakan serta akses pendidikan bagi petani. Di samping itu, kendala pembiayaan dan keterbatasan infrastruktur turut menghambat penerapan praktik tersebut. Faktor lain yang juga berpengaruh adalah ketidakpastian iklim dan meningkatnya kejadian cuaca ekstrem, yang dapat memengaruhi efektivitas pendekatan regeneratif (Novita, 2024).

6.4 Pertanian Konservasi: Zero Tillage dan Minimal Pengolahan Tanah

Dalam empat dekade terakhir, dunia telah kehilangan sekitar sepertiga lahan subur, setara dengan kurang lebih 430 juta hektar. Untuk mengatasi kondisi tersebut, pertanian konservasi hadir sebagai pendekatan yang tidak hanya mampu menekan laju kerusakan, tetapi juga memulihkan lahan yang telah terdegradasi. Sistem ini menekankan pengolahan tanah seminimal mungkin (bahkan tanpa olah tanah), mempertahankan penutup tanah secara permanen, serta menerapkan keberagaman jenis tanaman. Melalui penerapan prinsip-prinsip tersebut, pertanian konservasi mampu meningkatkan keanekaragaman hayati serta mengoptimalkan proses biologis alami, baik di atas maupun di bawah permukaan tanah.

Dampaknya, efisiensi pemanfaatan air dan unsur hara menjadi lebih baik, sehingga mendukung produktivitas tanaman yang lebih tinggi dan berkelanjutan. Pertanian Konservasi adalah konsep yang mendukung pengelolaan lahan berkelanjutan, pelestarian lingkungan, serta adaptasi dan mitigasi perubahan iklim (FAO, 2022).

Pertanian konservasi berfokus pada pelestarian sumber daya lahan, air, dan hayati, dengan tujuan mencapai produksi yang berkelanjutan dan menguntungkan. Inti dari pertanian konservasi adalah melawan degradasi tanah, terutama erosi, yang merupakan ancaman global terhadap ketahanan pangan. Erosi, yang disebabkan oleh angin dan air, dapat menghilangkan lapisan tanah atas yang paling subur, merusak lahan sehat dan menurunkan hasil panen secara drastis.

Pertanian konservasi bertumpu pada tiga prinsip utama yang berperan penting dalam menjaga kualitas dan keberlanjutan tanah. Ketiga prinsip itu antara lain (Sari, 2023) :

1. **Intervensi tanah seminimal mungkin (*minimum tillage*):** Berbeda dengan sistem pertanian konvensional yang sering melakukan pembajakan intensif, pendekatan ini menghindari pengolahan tanah berlebihan karena dapat merusak struktur tanah, mempercepat hilangnya bahan organik, serta

meningkatkan risiko erosi. Dalam praktik pertanian konservasi pilihan tanpa olah tanah (zero tillage) atau minimal pengolahan tanah akan menjaga struktur agregat tanah, meningkatkan infiltrasi air, dan menekan aliran permukaan (run-off). Zero tillage merupakan suatu metode dalam sistem pertanian yang tidak melibatkan aktivitas pengolahan tanah seperti mencangkul, menggali, atau membajak sebelum penanaman. Pendekatan ini bertujuan untuk meminimalkan gangguan terhadap struktur tanah serta menjaga keseimbangan ekosistem mikroorganisme yang hidup di dalamnya. Dalam penerapannya, zero tillage menggunakan peralatan khusus seperti seeder atau planter yang memungkinkan benih ditanam langsung ke dalam tanah tanpa harus mengolah lapisan permukaan. Penanaman dilakukan melalui sisa tanaman sebelumnya atau mulsa organik yang menutupi tanah. Cara ini terbukti mampu meningkatkan kualitas dan kesehatan tanah sekaligus mengurangi risiko erosi. Keunggulan utama sistem ini adalah menjaga struktur tanah tetap stabil, menekan terjadinya erosi, serta mempertahankan kualitas tanah. Tanah yang tidak mengalami gangguan cenderung memiliki kepadatan yang lebih ideal sehingga memperbaiki sistem drainase dan aerasi. Selain itu, kondisi ini juga mendukung keberlangsungan mikroorganisme dan biota tanah lain yang berperan penting dalam menjaga kesuburan tanah.

2. **Penutupan tanah secara permanen:** Permukaan lahan selalu dilindungi oleh residu tanaman atau tanaman penutup tanah. Lapisan ini berfungsi seperti mulsa alami yang mampu menjaga tanah dari paparan langsung air hujan dan hembusan angin, sehingga erosi dapat diminimalkan dan suhu tanah lebih stabil. Selain itu, bahan organik dari sisa tanaman secara bertahap terdekomposisi menjadi sumber hara, seperti kompos atau pupuk hijau alami.
3. **Diversifikasi tanaman melalui rotasi atau asosiasi:** Sistem ini menekankan pentingnya variasi jenis tanaman, terutama melalui rotasi yang terencana. Tujuannya adalah memutus siklus hama dan penyakit sekaligus menjaga keseimbangan unsur hara dalam tanah. Diversifikasi tersebut juga berkontribusi dalam membentuk ekosistem pertanian yang lebih stabil, resilien, dan sehat.

Pertanian konservasi dengan prinsip olah tanah minimum memberikan manfaat penting bagi keberlanjutan pertanian dan lingkungan. Dengan gangguan tanah yang rendah, struktur dan kesuburan tanah tetap terjaga, erosi dapat ditekan, serta kelembapan tanah lebih stabil sehingga kebutuhan air berkurang. Selain itu, biaya produksi lebih efisien karena penggunaan alat dan tenaga kerja menurun, serta keanekaragaman hayati tanah tetap terpelihara. Oleh karena itu, sistem ini menjadi solusi efektif untuk mendukung pertanian berkelanjutan dan dapat diterapkan pada berbagai kondisi lahan di Indonesia.

6.5 Indikator Keberlanjutan dalam Sistem Pertanian

Pertanian berkelanjutan merupakan penerapan konsep pembangunan berkelanjutan dalam sektor pertanian. Penilaian terhadap keberlanjutan pertanian sangat penting untuk memperoleh gambaran kondisi terkini, mengenali arah perkembangan, menetapkan sasaran, memantau capaian, serta membandingkan kinerja antarwilayah. Di Indonesia, pembahasan mengenai keberlanjutan pertanian masih lebih banyak difokuskan pada skala usaha tani atau tingkat lokal (Mucharam, *et al.,* 2022).

Para peneliti telah banyak mengkaji penyusunan seperangkat indikator untuk menilai keberlanjutan pertanian. Pemilihan indikator yang tepat sangat menentukan tingkat ketepatan dan ketelitian dalam mengukur konsep tersebut, sekaligus memberikan gambaran yang representatif tentang kondisi pertanian berkelanjutan. Jika jumlah variabel yang digunakan terlalu sedikit atau hanya terfokus pada indikator tertentu, maka indikator komposit menjadi kurang peka dan tidak cukup mewakili kondisi sebenarnya. Sebaliknya, penggunaan variabel atau indikator yang terlalu banyak dapat menimbulkan kendala dalam proses pengumpulan data, validasi, dan penafsiran informasi. Oleh karena itu, penentuan set indikator yang tepat menjadi aspek yang sangat krusial. Konsep keberlanjutan bersifat multidimensi sehingga tidak dapat diukur secara langsung dengan satu pendekatan saja. Konsep ini tidak hanya mencakup aspek ekonomi, tetapi juga melibatkan dimensi lingkungan dan sosial yang saling berkaitan serta memerlukan keseimbangan di antara ketiganya. Dalam menilai keberlanjutan pertanian, diperlukan seperangkat indikator yang dikelompokkan ke dalam tiga dimensi utama, yaitu: (Fajar, 2019; Bathaei dan Štreimikiene, 2023)

1. **Dimensi Ekonomi:** Indikator pada dimensi ini meliputi tingkat pendapatan petani, hasil atau produktivitas lahan, besarnya biaya produksi, tingkat efisiensi usaha tani, kemudahan akses ke pasar, kemampuan bersaing, serta pertumbuhan dan stabilitas ekonomi petani. Dimensi ekonomi berfokus pada pemeliharaan mata pencaharian petani, peningkatan produktivitas, dan dinamika pasar yang mendorong praktik-praktik berkelanjutan.
2. **Dimensi Sosial:** Dimensi sosial diukur melalui indikator seperti tingkat kemiskinan, pemerataan kesejahteraan, kondisi kehidupan petani, keadilan sosial, kesehatan masyarakat, tingkat pendidikan petani, keterlibatan masyarakat, serta upaya pelestarian budaya lokal. Dimensi ini menekankan kesejahteraan pekerja/petani serta dampak sosial yang lebih luas seperti keamanan pangan dan kontribusi terhadap lapangan kerja.
3. **Dimensi Lingkungan:** Indikator lingkungan mencakup kondisi dan kualitas tanah, tingkat keanekaragaman hayati, pemanfaatan air secara berkelanjutan, ketahanan ekosistem, pengelolaan limbah, emisi gas rumah kaca, aktivitas konservasi sumber daya alam, serta kondisi kesehatan lingkungan secara keseluruhan. Dimensi ini mencerminkan perlunya mengelola sumber daya secara berkelanjutan, mengurangi polusi dan emisi, serta menjaga fungsi-fungsi ekologi yang sangat penting bagi pertanian.

Pada tahap pengembangan berikutnya, pengukuran tingkat keberlanjutan (*sustainability level*) perlu diperluas dengan menambahkan dua pilar utama, yaitu (Saputro, *et al.,* 2024) :

1. **Dimensi Teknologi:** Indikator pada dimensi ini mencakup ketersediaan teknologi, kemudahan akses terhadap teknologi, tingkat pemanfaatan teknologi dalam kesibukan usahatani, serta penggunaan teknologi dalam proses pengolahan, pengemasan, hingga pemasaran hasil pertanian.
2. **Dimensi Kelembagaan:** Dimensi kelembagaan diukur melalui indikator seperti partisipasi petani dalam kelompok tani, keterlibatan dalam koperasi, akses terhadap lembaga keuangan, serta kemudahan memperoleh layanan pelatihan dan aksi penyuluhan.

BAB 7
AGROFORESTRI DAN SISTEM PERTANIAN TERPADU

Agroforestri dan sistem pertanian terpadu merupakan strategi penting dalam agroekologi yang menggabungkan berbagai komponen produksi ke dalam satu sistem yang saling berinteraksi. Pendekatan ini tidak hanya bertujuan meningkatkan hasil pangan, tetapi juga mengoptimalkan pemanfaatan sumber daya alam, meningkatkan kesejahteraan petani, serta mendukung kelestarian lingkungan. Dalam upaya memperkuat ketahanan pangan, sistem terpadu mampu menjaga kestabilan produksi sekaligus mendorong keberagaman sumber pangan dan pendapatan pada tingkat rumah tangga petani.

Berbeda dengan bab sebelumnya yang menekankan prinsip keberlanjutan dan komponen ekosistem, bab ini berfokus pada struktur dan model integrasi sistem produksi yang melibatkan tanaman, pohon, ternak, dan perikanan. Selain itu, bab ini juga membahas berbagai praktik agroforestri dan sistem terpadu yang berkembang di Indonesia sebagai bentuk adaptasi terhadap kondisi lingkungan tropis dan kearifan lokal masyarakat.

7.1 Definisi dan Tipologi Agroforestri

Agroforestri merupakan suatu sistem pemanfaatan lahan yang memadukan pohon berkayu dengan tanaman pertanian dan/atau ternak dalam satu kesatuan pengelolaan, baik diterapkan secara simultan maupun bergiliran. Sistem ini dikembangkan untuk memberikan manfaat ekologis dan ekonomi secara bersamaan melalui interaksi yang saling mendukung antar komponen di dalamnya (Bhandari *et al.*, 2025; Manono & Mwami, 2026).

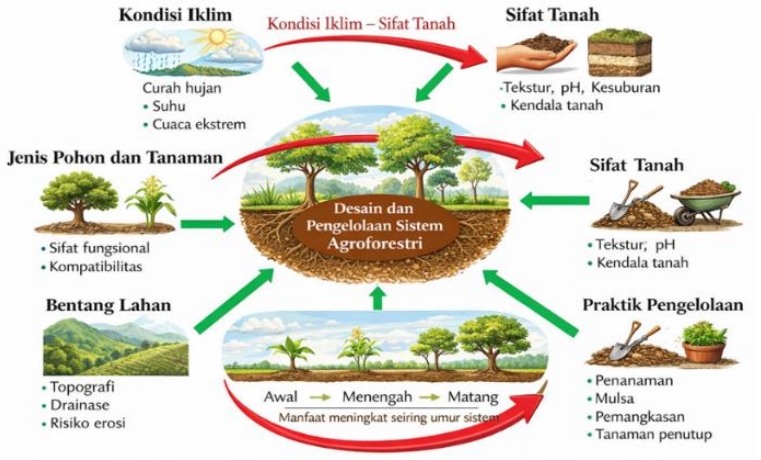
Secara konseptual, agroforestri berbeda dari sistem monokultur karena menekankan keberagaman struktur vegetasi dalam ruang dan waktu. Keberadaan pohon dalam sistem pertanian memberikan berbagai fungsi penting, seperti melindungi tanah, meningkatkan kualitas tanah melalui bahan organik, serta

menciptakan kondisi mikroklimat yang lebih stabil bagi tanaman budidaya (Ntawuruhunga *et al.*, 2023; Zeratsion *et al.*, 2024).

Desain dan pengelolaan agroforestri dipengaruhi oleh berbagai faktor yang saling berkaitan, antara lain kondisi iklim, sifat tanah, pemilihan jenis tanaman, bentuk bentang lahan, serta praktik pengelolaan oleh petani. Interaksi faktor-faktor tersebut menentukan keberhasilan sistem agroforestri dalam jangka panjang (van Noordwijk, Ekadinata, *et al.*, 2020a).

Tipologi agroforestri dapat dibedakan berdasarkan kombinasi komponen dalam sistem dan tujuan pengelolaannya. Setiap tipe memiliki karakteristik tersendiri dalam hal struktur vegetasi, pola pengelolaan, serta manfaat ekologis dan ekonomis yang dihasilkan (Atapattu *et al.*, 2024).

Pemilihan tipe agroforestri perlu mempertimbangkan faktor lingkungan seperti iklim, tanah, dan topografi, serta faktor sosial ekonomi seperti kebutuhan pangan dan ketersediaan sumber daya (Gambar 7.1). Dalam praktiknya, petani dapat mengembangkan sistem yang fleksibel dan adaptif terhadap kondisi lokal sehingga produksi dapat ditingkatkan tanpa mengabaikan keberlanjutan sumber daya alam (Tropenbos, 2023).



Gambar 7.1: Faktor-faktor yang mempengaruhi desain dan pengelolaan sistem agroforestri

Gambar 7.1 menunjukkan bahwa desain dan pengelolaan sistem agroforestri dipengaruhi oleh interaksi berbagai faktor, antara lain kondisi iklim, sifat tanah, pemilihan jenis tanaman, karakteristik bentang lahan, serta praktik pengelolaan oleh petani. Interaksi antar faktor tersebut sangat menentukan keberhasilan sistem agroforestri dalam jangka panjang (van Noordwijk, Ekadinata, *et al.*, 2020).

Tipologi agroforestri diklasifikasikan berdasarkan kombinasi komponen dan tujuan pengelolaannya Tabel 7.1). Setiap tipe memiliki karakteristik berbeda dalam struktur vegetasi, pola pengelolaan, serta manfaat ekologis dan ekonomis yang dihasilkan (Atapattu *et al.*, 2024).

Tabel 7.1: Tipologi Sistem Agroforestri Berdasarkan Komponen Penyusunnya

Tipe Agroforestri	Komponen Utama	Deskripsi Sistem	Contoh Penerapan	Keunggulan Utama
Agrisilvi-kultur	Tanaman pertanian + pohon kehutanan	Sistem yang menggabungkan tanaman semusim atau tanaman pangan dengan tanaman berkayu dalam satu lahan	Jagung dengan sengon; padi gogo dengan jati	Meningkatkan efisiensi penggunaan lahan dan menyediakan hasil jangka pendek dan jangka panjang
Silvopastura	Pohon kehutanan + ternak	Sistem yang memadukan tanaman berkayu dengan usaha peternakan	Pohon lamtoro dengan sapi atau kambing	Menyediakan naungan ternak dan meningkatkan ketersediaan pakan alami
Agrosilvo-pastura	Tanaman pertanian + pohon + ternak	Sistem terpadu yang memadukan tanaman pangan, pohon, dan ternak dalam satu kesatuan produksi.	Jagung, pohon buah, dan kambing dalam satu lahan	Meningkatkan diversifikasi produksi dan siklus nutrisi alami
Agroforestri Pekarangan	Tanaman pangan + buah + tanaman obat + pohon	Sistem agroforestri tradisional yang dikembangkan di sekitar rumah	Pekarangan dengan kelapa, pisang, cabai, dan tanaman obat	Mendukung ketahanan pangan rumah tangga dan diversifikasi pangan
Agroforestri Multistrata	Tanaman berlapis vertikal	Sistem yang meniru struktur hutan alami dengan beberapa lapisan vegetasi	Kopi di bawah naungan pohon penaung	Meningkatkan konservasi tanah dan keanekaragaman hayati

Tipe Agroforestri	Komponen Utama	Deskripsi Sistem	Contoh Penerapan	Keunggulan Utama
Alley Cropping	Tanaman semusim + barisan pohon	Tanaman semusim dibudidayakan di sela-sela barisan pohon dengan jarak tanam tertentu	Jagung di antara barisan gliricidia	Penambahan bahan organik membantu mengendalikan erosi tanah sekaligus meningkatkan kualitas kesuburan tanah

Pemilihan tipe agroforestri perlu mempertimbangkan faktor lingkungan, seperti iklim, tanah, dan topografi, serta faktor sosial ekonomi, seperti kebutuhan pangan dan ketersediaan sumber daya. Dalam praktiknya, petani sering mengembangkan sistem yang fleksibel dan adaptif terhadap kondisi lokal, sehingga produksi dapat dioptimalkan tanpa mengabaikan keberlanjutan sumber daya alam.

Pengetahuan tentang beragam tipologi agroforestri merupakan tahapan krusial dalam menentukan sistem yang tepat sesuai dengan karakteristik lingkungan dan kebutuhan produksi di suatu wilayah. Selain itu, penerapan pendekatan lanskap dalam agroforestri memberikan peluang untuk mengintegrasikan berbagai komponen produksi secara lebih sistematis dan berkelanjutan (van Noordwijk *et al.*, 2020b; Tropenbos, 2023).

7.1.1 Agrisilvikultur

Agrisilvikultur didefinisikan sebagai sistem agroforestri yang mengintegrasikan tanaman pertanian dengan tanaman berkayu dalam satu sistem pengelolaan lahan. Sistem ini banyak diterapkan pada lahan kering maupun hutan rakyat, terutama pada tahap awal perkembangan pohon ketika ruang di antara barisan pohon masih dapat dimanfaatkan untuk penanaman tanaman semusim.

Ciri utama sistem ini adalah pemanfaatan ruang secara vertikal dan temporal. Tanaman semusim memberikan hasil dalam jangka pendek, sedangkan pohon berkayu menghasilkan manfaat dalam jangka menengah hingga panjang. Seiring pertumbuhan pohon dan meningkatnya naungan, jenis tanaman semusim perlu disesuaikan dengan kondisi cahaya yang tersedia. Dari aspek lingkungan, sistem agrisilvikultur mendukung peningkatan kesuburan tanah sekaligus menekan risiko erosi melalui akumulasi bahan organik yang berasal dari serasah daun (Ntawuruhunga *et al.*, 2023). Di Indonesia, praktik ini banyak diterapkan dalam

bentuk kombinasi tanaman jagung atau kacang tanah dengan pohon sengon (*Falcataria moluccana*) maupun jati (*Tectona grandis*).

7.1.2 Silvopastura

Silvopastura didefinisikan sebagai sistem agroforestri yang mengombinasikan tanaman berkayu dengan usaha peternakan dalam satu sistem pengelolaan lahan. Dalam praktiknya, pohon berperan sebagai penyedia tempat berteduh serta sumber pakan tambahan bagi ternak. Keberadaan pohon membantu mengurangi stres panas pada ternak, terutama di wilayah tropis, sehingga ternak dapat tumbuh lebih optimal. Selain itu, kotoran ternak dapat dimanfaatkan sebagai pupuk organik yang mendukung pertumbuhan vegetasi dan meningkatkan kesuburan tanah.

Dari sisi lingkungan, sistem silvopastura berperan dalam menjaga stabilitas tanah serta mengurangi degradasi lahan akibat aktivitas penggembalaan. Contoh penerapan di Indonesia antara lain penggunaan pohon lamtoro (*Leucaena leucocephala*) sebagai penaung bagi ternak kambing atau sapi.

7.1.3 Agrosilvopastura

Agrosilvopastura didefinisikan sebagai sistem agroforestri yang menyatukan tanaman pertanian, tanaman berkayu, serta ternak dalam satu sistem produksi yang saling mendukung. Sinergi antara ketiga komponen tersebut memungkinkan terjadinya daur hara alami yang berkontribusi pada peningkatan efisiensi pemanfaatan sumber daya.

Dalam sistem ini, residu tanaman dapat dimanfaatkan sebagai pakan ternak, sedangkan kotoran ternak digunakan sebagai pupuk organik bagi tanaman. Hubungan timbal balik tersebut membantu mengurangi limbah pertanian sekaligus meningkatkan kesuburan tanah dan produktivitas lahan (Dos Reis *et al.*, 2025). Sebagai contoh di Indonesia, sistem ini diterapkan melalui integrasi tanaman jagung, pohon buah-buahan, dan ternak kambing dalam satu kawasan lahan yang dikelola secara terintegrasi.

7.1.4 Agroforestri Pekarangan

Agroforestri pekarangan didefinisikan sebagai sistem agroforestri tradisional yang berkembang di area sekitar tempat tinggal petani. Sistem ini mengombinasikan berbagai jenis tanaman, termasuk tanaman pangan, buah-buahan, tanaman obat, serta tanaman berkayu, dalam satu bidang lahan dengan luas yang terbatas.

Tanaman disusun secara bertingkat sesuai dengan kebutuhan cahaya, sehingga pemanfaatan ruang menjadi lebih efisien. Susunan ini memungkinkan berbagai jenis tanaman tumbuh secara optimal dalam satu kawasan. Selain itu, sistem pekarangan berperan penting dalam mendukung ketahanan pangan rumah tangga serta menyediakan bahan pangan dan obat tradisional. Contoh penerapan dapat ditemukan pada pekarangan tradisional di wilayah Jawa dan Bali yang memadukan tanaman seperti kelapa, pisang, pepaya, dan berbagai tanaman obat.

7.1.5 Agroforestri Multistrata

Agroforestri multistrata merupakan sistem yang meniru struktur vegetasi hutan alami melalui beberapa lapisan tanaman. Tanaman berkayu ditempatkan pada lapisan atas, sedangkan tanaman yang toleran terhadap naungan berada pada lapisan tengah dan bawah.

Struktur berlapis ini menciptakan kondisi mikroklimat yang lebih stabil serta membantu menjaga kelembapan tanah. Selain itu, sistem multistrata berperan dalam konservasi tanah dan air serta mendukung peningkatan keanekaragaman hayati. Sistem ini banyak diterapkan pada tanaman perkebunan yang memerlukan naungan, seperti kopi atau kakao (Martini *et al.*, 2020). Contoh penerapan di Indonesia adalah budidaya kopi (*Coffea* spp.) di bawah pohon penaung seperti lamtoro (*Leucaena leucocephala*) atau dadap (*Erythrina* spp.).

7.1.6 *Alley Cropping*

Alley cropping didefinisikan sebagai sistem agroforestri yang mengintegrasikan tanaman semusim dengan deretan pohon yang ditanam secara paralel. Dalam sistem ini, tanaman semusim dibudidayakan di ruang antarbarisan pohon yang berfungsi melindungi tanah serta menjadi sumber bahan organik.

Pengelolaan pohon dilakukan melalui pemangkasan secara berkala, sehingga menghasilkan biomassa yang dapat dimanfaatkan sebagai mulsa atau bahan organik. Praktik ini membantu mengurangi erosi serta meningkatkan kesuburan tanah. Di Indonesia, praktik ini dapat dijumpai pada penggunaan gliricidia (*Gliricidia sepium*) sebagai tanaman pagar yang dikombinasikan dengan tanaman jagung dalam satu sistem budidaya.

7.2 Manfaat Ekologis dan Ekonomis Agroforestri

Agroforestri merupakan pendekatan pengelolaan lahan yang memberikan manfaat ekologis dan ekonomis secara simultan melalui integrasi pohon dan tanaman dalam satu sistem produksi. Interaksi antar komponen dalam sistem ini meningkatkan efisiensi pemanfaatan sumber daya sekaligus mendukung stabilitas produksi dalam jangka panjang. Dibandingkan sistem monokultur, agroforestri menekankan diversifikasi komponen produksi yang mampu meningkatkan ketahanan terhadap perubahan lingkungan serta mengurangi risiko produksi (Ntawuruhunga *et al.*, 2023; Zeratsion *et al.*, 2024; Bhandari *et al*., 2025).

7.2.1 Manfaat ekologis Agroforestri

Secara ekologis, agroforestri berperan penting dalam meningkatkan kualitas sumber daya lahan dan menjaga keseimbangan lingkungan. Penambahan bahan organik dari serasah pohon memperbaiki struktur tanah, meningkatkan kapasitas tanah menyimpan air, serta mendukung ketersediaan unsur hara bagi tanaman. Tajuk pohon membantu mengurangi dampak langsung air hujan, sedangkan sistem akar memperkuat struktur tanah dan mengurangi kehilangan unsur hara akibat limpasan (Zeratsion *et al.*, 2024 ; Manono and Mwami, 2026).



Gambar 7.2: Struktur vertikal sistem agroforestri multistrata

Selain itu, keberadaan pohon meningkatkan kemampuan tanah menyerap air hujan, menjaga ketersediaan air tanah, serta mendukung keanekaragaman organisme yang berperan dalam keseimbangan ekosistem. Dalam konteks perubahan iklim, pohon dalam sistem agroforestri juga berfungsi sebagai penyerap karbon yang membantu mengurangi emisi gas rumah kaca (van Noordwijk *et al.*, 2020a; Kassa, 2022 ; Ntawuruhunga *et al.*, 2023).

7.2.2 Manfaat ekonomis Agroforestri

Dari sisi ekonomi, agroforestri meningkatkan stabilitas pendapatan melalui diversifikasi komoditas dalam satu sistem produksi. Petani dapat memperoleh berbagai hasil seperti tanaman pangan, buah, dan kayu secara bersamaan, sehingga risiko kerugian akibat ketergantungan pada satu komoditas dapat dikurangi (van Noordwijk *et al.*, 2020b ; Tropenbos, 2023).

Selain itu, agroforestri meningkatkan efisiensi penggunaan lahan melalui pemanfaatan ruang secara vertikal dan horizontal, sehingga produktivitas total dapat meningkat tanpa perlu memperluas areal pertanian. Pemanfaatan bahan organik lokal juga membantu menekan biaya produksi, terutama dalam penggunaan pupuk, serta mendukung stabilitas pendapatan dalam jangka pendek maupun panjang (Atapattu *et al.*, 2024 ; Zeratsion *et al.*, 2024).

7.2.3 Integrasi Manfaat Ekologis dan Ekonomis dalam Ketahanan Pangan

Keunggulan agroforestri terletak pada kemampuannya mengintegrasikan manfaat ekologis dan ekonomis dalam satu sistem produksi yang berkelanjutan. Peningkatan kualitas tanah dan ketersediaan air secara langsung mendukung produktivitas tanaman, sementara diversifikasi komoditas membantu menjaga stabilitas produksi dan pendapatan dalam jangka panjang.

Secara keseluruhan, agroforestri berperan penting dalam mendukung keberlanjutan sumber daya alam serta meningkatkan ketahanan pangan melalui penyediaan pangan yang beragam dan berkelanjutan (van Noordwijk *et al.*, 2020b; Ntawuruhunga *et al.*, 2023).

7.3 Sistem Pertanian Terpadu Tanaman–Ternak

Sistem pertanian terpadu tanaman–ternak merupakan pendekatan pengelolaan lahan yang mengintegrasikan budidaya tanaman dan pemeliharaan ternak dalam satu sistem produksi yang saling mendukung. Integrasi ini memungkinkan pemanfaatan sumber daya secara lebih efisien serta mengurangi limbah pertanian melalui daur hara yang berkelanjutan (Sekaran *et al.*, 2021; Mabhaudhi, Chibarabada & Sikka, 2023).

Berbeda dengan sistem konvensional yang memisahkan usaha tanaman dan peternakan, sistem terpadu memanfaatkan hubungan timbal balik antara kedua komponen. Residu tanaman dimanfaatkan sebagai pakan ternak, sedangkan kotoran ternak diolah menjadi pupuk organik yang dikembalikan ke lahan, sehingga kebutuhan input eksternal dapat dikurangi dan produktivitas sistem meningkat (Dos Reis *et al.*, 2025).

Selain meningkatkan efisiensi pemanfaatan sumber daya, sistem tanaman–ternak juga membuka peluang diversifikasi usaha. Produksi tanaman dan produk hewani dapat berlangsung secara bersamaan, sehingga meningkatkan stabilitas produksi dan pendapatan rumah tangga petani (Akter *et al.*, 2025).

7.3.1 Konsep dan Komponen Sistem Tanaman–Ternak

Konsep dasar sistem tanaman–ternak berlandaskan pada pemanfaatan hubungan alami antara tanaman dan ternak dalam satu siklus produksi. Tanaman menghasilkan residu organik yang dapat dimanfaatkan sebagai pakan ternak, sedangkan ternak menghasilkan pupuk organik yang mendukung pertumbuhan tanaman. Siklus ini memungkinkan pemanfaatan unsur hara secara optimal serta mengurangi ketergantungan pada input eksternal (Garrett *et al.*, 2017; Sekaran *et al.*, 2021).



Gambar 7.3: Siklus Nutrisi dalam Sistem Tanaman–Ternak

Sistem tanaman–ternak terdiri atas tiga komponen utama, yaitu tanaman, ternak, dan limbah organik. Tanaman berfungsi sebagai sumber pangan sekaligus penyedia bahan pakan, sedangkan ternak menghasilkan produk hewani dan pupuk organik. Limbah organik berperan sebagai penghubung yang memungkinkan unsur hara digunakan kembali dalam sistem produksi (Reddy, 2016).

7.3.2 Manfaat Sistem Tanaman–Ternak

Sistem tanaman–ternak memberikan berbagai manfaat ekologis dan ekonomis yang mendukung keberlanjutan pertanian. Pemanfaatan pupuk organik dari kotoran ternak membantu meningkatkan kualitas tanah serta mendukung aktivitas mikroorganisme yang berperan dalam penyediaan unsur hara. Selain itu, pemanfaatan residu tanaman sebagai pakan ternak membantu mengurangi limbah pertanian dan menekan pencemaran lingkungan (Garrett *et al.*, 2017; Sekaran *et al.*, 2021; Dos Reis *et al.*, 2025).

Dari sisi ekonomi, sistem ini meningkatkan stabilitas pendapatan melalui diversifikasi hasil produksi. Petani dapat memperoleh produk tanaman dan ternak secara bersamaan, sementara pemanfaatan limbah sebagai input produksi membantu menekan biaya, terutama dalam penyediaan pupuk dan pakan. Produk ternak seperti susu, daging, dan telur juga memberikan nilai tambah yang mendukung peningkatan pendapatan rumah tangga petani (Akter *et al.*, 2025; Alderkamp *et al.*, 2025).

7.3.3 Contoh Penerapan Sistem Tanaman–Ternak

Di Indonesia, sistem tanaman–ternak telah diterapkan pada berbagai kondisi agroekologi. Salah satu contoh yang umum adalah integrasi padi dengan ternak sapi pada lahan sawah, di mana jerami dimanfaatkan sebagai pakan ternak dan kotoran ternak digunakan sebagai pupuk kandang pada musim tanam berikutnya (Sekaran *et al.*, 2021).

Selain itu, integrasi tanaman jagung dengan ternak kambing pada lahan kering juga banyak dilakukan. Residu tanaman dimanfaatkan sebagai pakan, sedangkan pupuk kandang digunakan untuk meningkatkan kesuburan tanah dan produktivitas lahan (Dos Reis *et al.*, 2025).

7.4 Sistem Pertanian Terpadu Tanaman–Ikan (Minapadi)

Sistem pertanian terpadu tanaman–ikan, atau minapadi, merupakan integrasi antara budidaya padi dan pemeliharaan ikan dalam satu unit lahan sawah. Sistem ini telah lama diterapkan di berbagai wilayah Asia sebagai strategi untuk meningkatkan produktivitas lahan dan efisiensi pemanfaatan sumber daya (Sathoria & Roy, 2022; Fernandez-Zatrate *et al.*, 2025).

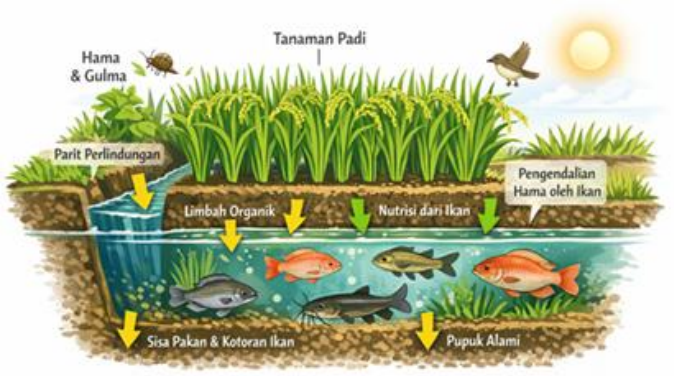
Dalam sistem minapadi, lahan sawah berfungsi sebagai tempat tumbuh padi sekaligus habitat ikan. Ikan berperan dalam mengendalikan organisme pengganggu tanaman secara alami, memanfaatkan bahan organik dalam air, serta menghasilkan nutrisi tambahan yang mendukung pertumbuhan padi (Bhattacharya, 2024). Selain itu, keberadaan ikan membantu meningkatkan aerasi tanah dan mempercepat dekomposisi bahan organik, sehingga meningkatkan efisiensi penggunaan unsur hara dalam sistem produksi (Yifan *et al.*, 2023; Fernandez-Zatrate *et al.*, 2025).

7.4.1 Konsep, Komponen, dan Manfaat Sistem Minapadi

Konsep dasar sistem minapadi berfokus pada pemanfaatan lahan sawah secara simultan untuk produksi padi dan ikan. Sawah biasanya dilengkapi dengan parit atau kolam kecil di bagian tepi sebagai tempat perlindungan ikan, sedangkan pengaturan kedalaman air menjadi faktor penting untuk mendukung pertumbuhan padi dan kelangsungan hidup ikan (Sathoria & Roy, 2022; Bhattacharya, 2024).

Sistem minapadi terdiri atas empat komponen utama, yaitu tanaman padi, ikan, air, dan struktur fisik sawah (Gambar 7.4). Tanaman padi berperan sebagai komponen utama produksi, sedangkan ikan berfungsi sebagai komponen pendukung yang

meningkatkan efisiensi sistem. Jenis ikan yang umum digunakan antara lain ikan nila (*Oreochromis niloticus*), ikan mas (*Cyprinus carpio*), dan ikan lele (*Clarias* spp.), karena memiliki kemampuan adaptasi yang baik terhadap kondisi sawah (Yifan *et al.*, 2023).



Gambar 7.4: Skema Sistem Minapadi

Dari sisi ekologis, sistem minapadi membantu mengurangi penggunaan pestisida melalui pengendalian organisme pengganggu tanaman secara alami serta meningkatkan ketersediaan unsur hara melalui aktivitas ikan. Pemanfaatan satu sumber air untuk dua aktivitas produksi juga meningkatkan efisiensi penggunaan air dan mendukung keseimbangan ekosistem (Bhattacharya, 2024; Chen *et al.*, 2025; Wiratno, *et al.*, 2025).

Dari sisi ekonomi, integrasi padi dan ikan memungkinkan petani memperoleh dua komoditas dari satu lahan, sehingga meningkatkan pendapatan serta mengurangi risiko kerugian akibat kegagalan panen. Diversifikasi hasil panen ini mendukung peningkatan produktivitas lahan secara berkelanjutan tanpa perlu memperluas areal pertanian (Sathoria and Roy, 2022; Yifan *et al.*, 2023).

7.4.5 Contoh Penerapan Sistem Minapadi di Indonesia

Di Indonesia, sistem minapadi telah diterapkan di berbagai wilayah dengan dukungan program pemerintah dan lembaga pendamping pertanian. Contoh penerapan dapat ditemukan di wilayah Jawa Barat dan Jawa Tengah, di mana petani membudidayakan padi dan ikan secara bersamaan dalam satu lahan sawah (Tropenbos, 2023). Pada beberapa daerah, sistem ini juga dikombinasikan dengan budidaya ikan lokal bernilai ekonomi tinggi, sehingga meningkatkan produktivitas

lahan sekaligus mendukung ketahanan pangan rumah tangga (Fernandez-Zatrate *et al.*, 2025).

7.5 Agroforestri Berbasis Kearifan Lokal Nusantara

Agroforestri berbasis kearifan lokal merupakan sistem pengelolaan lahan yang berkembang dari pengalaman masyarakat dalam memanfaatkan sumber daya alam secara berkelanjutan melalui adaptasi terhadap kondisi lingkungan setempat, seperti iklim, tanah, dan topografi (van Noordwijk *et al.*, 2020a; Tropenbos, 2023).

Di Indonesia, praktik agroforestri tradisional telah lama menjadi bagian penting dalam sistem pertanian masyarakat. Sistem ini umumnya mengombinasikan tanaman pangan, tanaman perkebunan, dan tanaman berkayu dalam satu lahan terpadu yang berfungsi sebagai sumber pangan dan pendapatan sekaligus menjaga keseimbangan ekologi dan keberlanjutan sumber daya alam (Martini *et al.*, 2020; Ntawuruhunga *et al.*, 2023).

Kearifan lokal dalam agroforestri mencakup teknik budidaya serta nilai sosial budaya yang diwariskan secara turun-temurun, sehingga memungkinkan pengelolaan lahan yang adaptif terhadap perubahan lingkungan. Berbagai sistem seperti pekarangan tradisional, kebun campuran, talun, dan kebun hutan menunjukkan kemampuan masyarakat dalam menyesuaikan praktik agroforestri dengan kondisi lokal (van Noordwijk *et al.*, 2020b).



Gambar 7.5: Contoh Sistem Agroforestri Tradisional Nusantara

7.5.1 Sistem Pekarangan Tradisional

Sistem pekarangan tradisional termasuk salah satu praktik agroforestri yang banyak berkembang di berbagai wilayah Indonesia. Sistem ini memanfaatkan area di sekitar rumah untuk menanam beragam jenis tanaman, seperti buah-buahan, sayuran, tanaman obat, serta tanaman berkayu, yang diatur dalam pola bertingkat (Vira *et al.*, 2015).

Tanaman berukuran besar, seperti kelapa dan mangga, biasanya ditempatkan pada lapisan atas, sedangkan tanaman berukuran sedang, seperti pisang dan pepaya, berada pada lapisan tengah. Tanaman sayuran dan tanaman obat umumnya ditanam pada lapisan bawah, sehingga pemanfaatan ruang menjadi lebih optimal (Martini *et al.*, 2020). Sistem pekarangan berperan penting dalam menyediakan sumber pangan harian serta mendukung ketahanan pangan rumah tangga (Tropenbos, 2023).

7.5.2 Kebun Campuran (*Mixed Garden Systems*)

Kebun campuran merupakan sistem agroforestri tradisional yang banyak ditemukan di wilayah Sumatera, Kalimantan, dan Sulawesi. Sistem ini menggabungkan tanaman perkebunan, tanaman buah, dan tanaman kayu dalam satu lahan dengan struktur vegetasi yang menyerupai hutan alami (van Noordwijk, Ekadinata, *et al.*, 2020a).

Tanaman berkayu seperti durian (*Durio zibethinus*), karet (*Hevea brasiliensis*), dan kelapa (*Cocos nucifera*) umumnya menjadi komponen utama, sedangkan tanaman seperti kopi (*Coffea* spp.) atau kakao (*Theobroma cacao*) ditempatkan pada lapisan bawah (Martini *et al.*, 2020).

Dari sisi ekologis, kebun campuran membantu menjaga kesuburan tanah serta mengurangi risiko erosi. Dari sisi ekonomi, sistem ini memberikan berbagai hasil seperti buah, getah, dan kayu, sehingga meningkatkan stabilitas pendapatan petani (Ntawuruhunga *et al.*, 2023; Tropenbos, 2023).

7.5.3 Sistem Talun dan Kebun Hutan

Sistem talun termasuk praktik agroforestri tradisional yang berkembang di daerah Jawa Barat. Sistem ini mengombinasikan tanaman pangan dengan tanaman berkayu dalam pola rotasi pengelolaan lahan, sehingga membentuk struktur vegetasi yang menyerupai hutan sekunder (van Noordwijk *et al.*, 2020a).

Selain sistem talun, kebun hutan juga berkembang di beberapa wilayah Sumatera dan Kalimantan. Sistem ini umumnya dimanfaatkan untuk menghasilkan produk hutan non-kayu, seperti damar (*Shorea* spp.) dan rotan (*Calamus* spp.), yang memiliki nilai ekonomi bagi masyarakat setempat (Martini *et al.*, 2020).

Kedua sistem tersebut menunjukkan upaya masyarakat dalam menjaga keseimbangan antara usaha produksi dan konservasi sumber daya alam, sehingga mendukung keberlanjutan pemanfaatan lahan dalam jangka panjang (Ntawuruhunga *et al.*, 2023).

7.5.4 Peran Kearifan Lokal dalam Ketahanan Pangan

Kearifan lokal dalam agroforestri memiliki peran penting dalam mendukung ketahanan pangan, terutama pada tingkat rumah tangga. Keberagaman tanaman dalam satu lahan memungkinkan ketersediaan pangan yang lebih beragam sepanjang tahun, sekaligus membantu menjaga keseimbangan nutrisi dalam pola konsumsi masyarakat (Tropenbos, 2023; Bhandari *et al.*, 2025).

Selain itu, sistem agroforestri tradisional mampu menjaga stabilitas produksi pangan karena memiliki kemampuan beradaptasi terhadap perubahan lingkungan. Pengetahuan lokal yang diwariskan secara turun-temurun membantu masyarakat mengelola lahan secara fleksibel sesuai kondisi alam setempat (Vira *et al.*, 2015; van Noordwijk *et al.*, 2020b).

7.5.5 Integrasi Pengetahuan Lokal dan Teknologi Modern

Pengembangan agroforestri di masa depan memerlukan integrasi antara pengetahuan lokal dan teknologi modern. Pengetahuan lokal menjadi dasar pengelolaan lahan yang adaptif terhadap kondisi lingkungan, sedangkan teknologi modern berperan dalam meningkatkan efisiensi produksi dan pengelolaan sistem (Atapattu *et al.*, 2024).

Penerapan teknologi tepat guna, seperti pengolahan pupuk organik dan pemantauan kondisi lahan, dapat meningkatkan produktivitas tanpa mengabaikan prinsip keberlanjutan (Ntawuruhunga *et al.*, 2023). Selain itu, kolaborasi antara petani, peneliti, dan penyuluh pertanian menjadi kunci dalam mengembangkan sistem agroforestri yang inovatif dan berkelanjutan (Tropenbos, 2023).

BAB 8
POLIKULTUR, TUMPANGSARI, DAN ROTASI TANAMAN

8.1 Konsep Monokultur versus Polikultur dalam Agroekologi

Istilah monokultur dalam bidang pertanian dan biologi seringkali digunakan untuk mendefinisikan suatu kondisi budidaya tanaman sejenis dalam suatu luasan lahan, bahkan dapat juga menggambarkan budidaya tanaman sejenis tanpa jeda dengan tanaman lain. Sebab itulah monokultur dapat terjadi dalam bahasan ruang maupun waktu (Jatav *et al.*, 2026). Berdasarkan pandangan agroekologi, monokultur dianggap sebagai "kehampaan ekologis", sebuah istilah yang sering digunakan oleh para ahli ekologi yang menggambarkan suatu kondisi dimana kompleksitas ekologi pada suatu wilayah dihilangkan (Fath, 2019). Monokultur lebih memprioritaskan efisiensi jangka pendek dan penerapan mekanisasi dengan mengorbankan kesehatan sistem. Penanaman satu jenis tanaman di area yang luas menyebabkan keseimbangan alami ekosistem dihilangkan. Berkurangnya biodiversitas ini menciptakan lingkungan nyaman bagaikan „pesta makan“ bagi hama dan patogen tertentu, sehingga pada akhirnya memerlukan penggunaan pestisida sintetis dalam jumlah besar. Lebih lanjut lagi, monokultur sering menyebabkan penurunan performa tanah karena struktur akar dan kebutuhan nutrisi yang sama terus-menerus dibebankan pada tanah tahun demi tahun, sehingga memaksa ketergantungan pada pupuk kimia eksternal untuk mempertahankan hasil panen (Belete and Yadete, 2023).

Monokultur sangat populer dikalangan tanaman pangan, industri, bahkan perkebunan karena tingginya permintaan konsumen dunia. Budidaya tanaman secara monokultur dianggap efisien karena hanya menggunakan pupuk sejenis, efisien waktu proses dan tenaga kerja, serta memudahkan mekanisasi seragam hingga proses panen dan sortasi. Monokultur secara cepat mampu memenuhi segera permintaan pasar karena waktu panen yang lebih terkontrol dan rantai distribusi yang seragam. Hingga saat ini praktik budidaya secara monokultur masih menjadi solusi cepat meski layanan ekologis yang akan dikorbankan (Kaur *et al.*,

2024). Monokultur meniadakan rantai makanan dengan memutus berbagai jaring makanan yang mungkin ada dalam ekosistem sawah, ladang, maupun kebun. Tidak ada mahkluk hidup lain yang boleh ada kecuali tanaman yang dibudidayakan, sehingga itulah yang disebut sebagai kehampaan ekologis. Karena sistem interaksi biotik dihilangkan maka sistem tersebut akan menjadi rentan untuk dimasuki oleh entitas lain dari luar sistem seperti hama dan muncul berbagai penyakit. Hal tersebut diakibatkan oleh tidak adanya rantai makanan yang menahan populasi hama dan menurunnya imunitas tanaman budidaya. Pupuk sintetis yang menjadi solusi cepat untuk meningkatkan pertumbuhan dan kualitas tanaman harus dibayar mahal dengan penurunan kualitas tanah yang semakin lama tertumpuk kristal garam residu pupuk dan semakin mengeras. Pemberian pestisida, herbisida, fungisida, atau racun sintetis lain juga berujung pada kematian biota tanah yang selama ini menjaga rizosfer dan mendukung penyerapan hara oleh akar serta imunitas tanaman. Hama dan penyakit yang muncul seolah „berpesta“ dengan makanan mewah karena semakin resisten dan berkembang biak tanpa kontrol biologis. Meskipun produktivitas monokultur sangat tinggi, secara bertahap dalam jangka tahunan akan terlihat penurunan (Elouattassi *et al.*, 2023; Kaur *et al.*, 2024).

Polikutur dapat diartikan sebagai budidaya tanaman lebih dari satu jenis pada tempat yang sama dalam waktu yang bersamaan atau berbeda. Praktik polikultur biasanya berupa tumpangsari, tumpang gilir, atau agroforestri. Bahkan hanya sekedar memberikan tanaman sela sudah memenuhi konsep polikultur. Tanaman yang digunakan dalam budidaya polikultur dapat berupa tanaman yang sama-sama dimanfaatkan sebagai sumber pangan, sebagai pakan, diambil kayunya, atau sekedar peneduh. Sistem polikultur memberikan perlindungan tanaman dalam menghadapi stres biotik dan linkungan. Produktivitas tanaman secara polikultur tidak terlihat secara cepat namun lebih stabil jika dibandingkan dengan monokultur yang akan semakin menurun dalam jangka panjang (Otieno, 2025).

Polikultur menjawab berbagai masalah dalam monokultur dengan menghadirkan keseimbangan ekologis yang tetap dikontrrol oleh manusia. Tanaman budidaya sebagai fokus utama perhatian tetap berada dalam jaring makanan namun hama dan penyakit diluar sistem akan sulit untuk masuk dan mendominasi. Inilah yang disebut sebagai agroekosistem mikro. Secara langsung, predator akan banyak hadir dalam sistem sehingga flora dan fauna pengganggu tanaman budidaya lebih terkontrol populasinya (Vikas and Ranjan, 2024). Terjaganya agroekosistem mikro membuat penggunaan pupuk dan pestisida sintetis semakin menurun atau bahkan

tidak diperlukan, yang pada akhirnya akan menguatkan sistem imun tanaman. Tanaman yang kuat akan resisten terhadapa berbagai cekaman lingkungan, termasuk perubahan iklim (Elouattassi *et al.*, 2023). Perubahan iklim merupakan hal yang tidak mungkin dihindari bagi tanaman budidaya sehingga berbagai usaha telah dilakukan oleh ilmuan pemulia untuk mecari bibit unggul yang tahan hama, tahan kering, tahan banjir, atau tahan terhadap kondisi miskin hara dengan berbagai rekayasa genetika dan perkawinan silang. Namun usaha-usaha tersebut baru akan terbukti jika tanaman budidaya benar-benar mampu hidup di lahan yang kompleksitas ekologisnya tinggi dengan tidak mengurangi kualitas dan kuantitas produksinya. Pada beberapa wilayah Afrika, sistem tumpang sari "dorong-tarik" telah diterapkan. Sistem ini melibatkan penanaman jagung dan sorgum yang ditumpangi rumput pakan ternak dan desmodium, sejenis legum pengikat nitrogen. Desmodium mampu mengusir hama penggerek batang dari jagung dan sorgum sekaligus menyediakan nitrogen bagi tanah. Strategi agroekologis ini meningkatkan pengendalian hama dan kesuburan tanah (Khan *et al.*, 2014). Pada wilayah Brasil, yang iklimnya tropis seperti di Indonesia, petani yang menerapkan pertanian tanpa pengolahan tanah telah mengadopsi penanaman tanaman penutup dan mulsa sisa tanaman untuk memperbaiki struktur tanah dan mengurangi erosi. Praktik-praktik ini meningkatkan infiltrasi air, mengurangi penguapan tanah, dan meningkatkan kesehatan tanah secara keseluruhan, sehingga memungkinkan adaptasi terhadap pola curah hujan yang berfluktuasi (Ofstehage and Nehring, 2021).

8.2 Prinsip dan Manfaat Sistem Tumpangsari

8.2.1 Sistem Tumpangsari

Tumpangsari, dikenal secara internasional dengan istilah *intercropping*, adalah praktik pertanian tradisional namun berbasis ilmiah yang kuat di mana dua atau lebih spesies tanaman ditanam secara bersamaan di lahan yang sama (Otieno, 2025). Konsep dasarnya bergantung pada komplementaritas, yaitu dengan memilih tanaman dengan kebiasaan pertumbuhan, struktur akar, atau kebutuhan nutrisi yang berbeda, petani dapat memaksimalkan penggunaan sumber daya yang tersedia seperti sinar matahari, air, dan nutrisi tanah. Misalnya, pasangan umum melibatkan tanaman serealia tinggi yang menyukai sinar matahari seperti jagung dengan tanaman polong-polongan yang tumbuh rendah dan mampu mengikat nitrogen seperti kedelai atau kacang tanah (Adam *et al.*, 2025).

Sebelum istilah tumpangsari muncul ke permukaan sebagai solusi berkelanjutan atas kekurangan monokultur, sistem budidaya ini telah lama diterapkan di beberapa wilayah negara di dunia. Tiongkok memiliki salah satu sejarah tumpangsari terpanjang yang terdokumentasi, yang dipraktikkan selama ribuan tahun di hampir setiap provinsi. Sistem tradisional yang umum meliputi gandum yang ditanam bersama kacang faba atau jagung yang dipasangkan dengan kacang tanah (Hu *et al.*, 2024). Di India, sistem tumpangsari digunakan secara luas di daerah tadah hujan. Misalnya pada sistem berbasis padi sering mengintegrasikan tanaman polong-polongan seperti fenugreek atau buncis untuk meningkatkan kualitas tanah dan pendapatan (Srinivasan, 2025).

Sistem Milpa yang berasal dari Meksiko dan Mesoamerika adalah salah satu sistem tumpang sari tradisional paling terkenal di dunia. Sistem ini biasanya menggabungkan jagung, kacang-kacangan, dan labu yang sering disebut "tiga bersaudari", telah menopang kehidupan masyarakat sejak sekitar 300 tahun SM (Fonteyne *et al.*, 2023). Sistem tersebut sama dengan sistem yang telah digunakan oleh nenek moyang masyarakat Nusa Tenggara Timur untuk beradaptasi pada iklim kering Pulau Timor. Sistem ini dikenal dengan nama Salome (satu lobang rame-rame), umumnya menggunakan tanaman jagung, kacang-kacangan, dan labu (Nendissa *et al.*, 2025). Di wilayah Guatemala dan Kolumbia, sebagian besar kacang-kacangan pokok (70–90%) secara tradisional ditanam berdampingan dengan jagung atau kentang (Williams, 2017; Lopez-Ridaura *et al.*, 2021).

Di Tanzania dan Ethiopia, serealia seperti jagung atau sorgum secara tradisional ditanam tumpang sari dengan tanaman polong-polongan seperti kacang gude, kacang panjang, atau kacang biasa (Kinyua *et al.*, 2023; Otieno, 2025). Sebagian besar petani di Malawi menerapkan sistem tanam tumpangsari. Melaui sistem ini dapat dicapat intensifikasi ekologis, karena menyediakan cara yang layak secara ekonomi untuk meningkatkan fiksasi nitrogen biologis (BNF) di lahan pertanian skala kecil, sekaligus memastikan tercapainya berbagai target panen biji-bijian dalam konteks lingkungan yang berbeda. Sistem rotasi kacang tanah/kacang gude-jagung memenuhi berbagai tujuan, termasuk biomassa kacang gude yang tinggi, biji kacang tanah yang menguntungkan, dan hasil jagung yang tinggi sepanjang tahun rotasi (Gwenambira-Mwika, 2021). Secara historis, di wilayah Italia, Spanyol, dan Perancis, ada sistem *Coltura Promiscua* yang melibatkan penanaman tanaman merambat dan pohon buah-buahan bersamaan dengan biji-bijian dan penggembalaan ternak. Meskipun telah banyak ditinggalkan saat ini, polikultur ini

merupakan budidaya standar hingga pertengahan abad ke-20 (Ferrario, 2021). Di Indonesia, selain tumpangsari jagung dan legum, juga melakukan polikultur agroforestri, seperti misalnya dalam budidaya kopi dan kakao (Nuryati *et al.*, 2022).

8.2.2 Manfaat Tumpangsari

Perjalanan waktu telah membuat penerapan tumpangsari semakin berkembang. Konsep keseimbangan ekologi dan keberlanjutan mulai menjadi sorotan utama ilmuwan dunia yang masuk dalam ranah pertanian. Budidaya tumpangsari kuno mulai dikaji kembali untuk melihat lebih banyak manfaat yang dapat dijadikan referensi bagi tumpangsari modern. Meskipun tidak terlalu banyak perubahan akan terlihat dalam program agronomisnya, namun modernisasi teknologi yang masuk ke dalam sistem serta multidisiplin yang ikut mengulasnya menjadikan tumpangsari sebagai fokus bahasan yang selalu menarik. Kebutuhan masyarakat dunia akan pangan, sandang, dan papan menjadikan pertanian sebagai sektor yang tidak mungkin berhenti diulas.

Tumpangsari hingga saat ini memberikan banyak manfaat sebagaimana yang telah dikaji oleh beberapa peneliti, sebagai berikut:

1. **Peningkatan efisiensi lahan**

   Pengukuran efisiensi lahan dapat menggunakan Rasio Ekuivalen Lahan (LER). Nilai LER yang lebih besar dari 1,0 menunjukkan bahwa tumpangsari lebih produktif daripada menanam setiap tanaman secara terpisah dalam monokultur. Observasi tumpangsari legum dan gandum, salah satunya meneliti tentang LER. Observasi tersebut mengevaluasi bagaimana pasokan N memengaruhi tumpang sari kacang faba (*Vicia faba* L.) dan kacang polong (*Pisum sativum* L.) dengan gandum pada berbagai kepadatan tanaman dan tingkat N. LER terbukti lebih tinggi pada perlakuan tumpangsari, terutama pada kondisi N terbatas. Disimpulkan bahwa pada tumpang sari gandum dengan legum, penghambatan fiksasi N_2 yang disebabkan oleh N tanah secara efektif berkurang, serta terjadi transfer N yang signifikan dari legum ke gandum, dengan kedua proses tersebut berkontribusi pada peningkatan LER (Salinas-Roco *et al.*, 2024). Uraian pada lahan semi-arid Prairi Kanada menunjukkan bahwa nilai LER pada tumpangsari kacang polong-kanola, buncis-rami, dan kacang faba-rami lebih produktif dibandingkan ketika ditanam sebagai tanaman monokultur. Namun, hanya LER

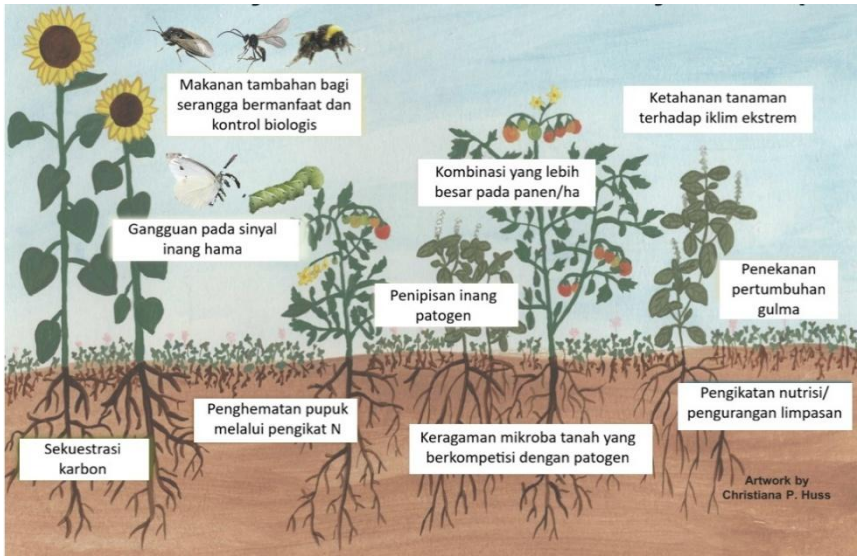
kacang polong-kanola yang secara signifikan lebih tinggi dari satu (p=0,087) (McAuley et al., 2025).

2. **Kesuburan dan kesehatan tanah:**

   Memasukkan tanaman polong-polongan ke dalam sistem tumpangsari memungkinkan fiksasi nitrogen biologis, dimana tanaman mengubah nitrogen atmosfer menjadi bentuk yang dapat digunakan oleh tanaman itu sendiri dan tanaman di sekitarnya, sehingga mengurangi kebutuhan akan pupuk sintetis. Tumpang sari meningkatkan penggunaan air dan meningkatkan infiltrasi dengan mencegat tetesan air hujan sebelum menyentuh permukaan tanah, meminimalkan erosi tanah yang merupakan masalah lingkungan serius dan sekaligus mengancam ketahanan pangan dan gizi manusia. Tumpang sari mengurangi limpasan, pH tanah, meningkatkan kapasitas pertukaran kation dan bahan organik tanah. Tumpang sari juga meningkatkan kualitas dan kesuburan tanah melalui peningkatan aktivitas enzimatik di dalam tanah. Tumpang sari meningkatkan ketersediaan dan penyerapan nutrisi oleh tanaman dan akhirnya meningkatkan hasil panen (Dugassa, 2023).

3. **Manajemen hama dan penyakit**

   Ladang yang beragam seringkali memiliki serangan hama yang lebih rendah karena campuran fisik tanaman dapat membingungkan serangga atau menyediakan habitat bagi spesies predator yang bermanfaat. Kontrol biologis yang masuk dalam sistem tumpangsari memberikan tanaman budidaya kesempatan untuk tumbuh dan meningkatkan sistem imun. Akar tanaman yang tidak terinfeksi mampu menyerap hara, air, dan mineral dengan lebih baik. Daun yang tidak habis dimakan hama mampu berfotosintesis dan respirasi dengan optimal. Batang yang kokoh tanpa serangan penyakit mampu menopang tanaman, memberikan ruang bagi dedauan dan cabang baru untuk tumbuh dan melindungi jalur tansportasi fotosintat dan air dari stres lingkungan. Sebagian besar eksplorasi menunjukkan manfaat yang jelas dari tumpang sari untuk pengendalian gulma, patogen, hama serangga, hasil panen relatif, dan profitabilitas kotor (Huss et al., 2022).



Gambar 8.1: Layanan ekosistem yang diberikan oleh sistem tumpangsari (Huss et al., 2022)

1. Stabilitas ekonomi

Produksi berbagai komoditas di satu lahan membantu petani mengurangi risiko kerugian finansial total jika satu tanaman gagal panen karena cuaca atau fluktuasi harga pasar. Selain nilai agronomisnya, nilai ekonomi total dari sistem tumpangsari perlu dikaji sejauh mungkin, meskipun profitabilitas tumpangsari tidak dapat dinilai tanpa mempertimbangkan tanaman spesifik yang ditanam. Terlepas dari pertimbangan terkait hasil panen dan keuntungan yang diperoleh, faktor-faktor lain yang berpotensi memengaruhi model tumpangsari yang digunakan oleh petani juga perlu dipertimbangkan, misalnya ketersediaan mesin yang sesuai (untuk memanen tanaman campuran dan memisahkan biji-bijian), serta keterampilan petani. Dengan demikian, evaluasi keuntungan sistem tumpangsari yang menyangkut hasil panen, keuntungan, dan lingkungan harus mempertimbangkan biaya yang terkait. Perhitungan margin laba kotor bersih, rasio keuntungan, dan ukuran "ekuivalen kepastian" dapat digunakan untuk mengukur berbagai perbedaan spesifik dalam biaya dan manfaat antara sistem tumpangsari dan monokultur, termasuk keterkaitannya dengan risiko ekonomi dan penilaian sistem usaha tani. (Weih et al., 2022).

2. Ketahanan iklim

Budidaya tanaman dengan tumpngsari lebih baik dalam mempertahankan kelembapan tanah dan menekan pertumbuhan gulma, sehingga lebih mudah beradaptasi dengan kondisi cuaca ekstrem jika dibandingkan dengan monokultur. Beberapa eksplorasi secara konsisten menunjukkan bahwa mengintegrasikan tanaman legum ke dalam sistem pertanian meningkatkan kesehatan tanah dengan mengurangi kepadatan curah hujan, memecah lapisan tanah yang keras, mengurangi erosi, meningkatkan bahan organik tanah, dan mengikat nitrogen atmosfer (~125 kg N/ha/musim) sehingga mengurangi kebutuhan pupuk N anorganik. Hal ini meningkatkan hasil panen sebesar 30–35% (dalam hal hasil panen setara tanaman utama) dan produktivitas lahan per satuan luas dan waktu, mengurangi total kehilangan hasil panen, serta mendorong keanekaragaman hayati. Selain itu, efisiensi penggunaan air juga meningkat sebesar 20–25% dan efisiensi penggunaan nutrisi meningkat sebesar 25–30%. Lebih lanjut, tumpangsari tanaman legum mengurangi kehilangan hasil panen akibat hama dan penyakit sebesar 20–25% dibandingkan dengan sistem penanaman tunggal. Praktik ini memperkuat ketahanan tanaman melalui proses ekologis seperti *bio-littering, bio-ploughing, bio-irrigation*, dan *bio-pumping* (4B), yang sangat penting dalam usaha menghadapi variabilitas iklim (Adam *et al.*, 2025; Akchaya *et al.*, 2025).

8.3 Rotasi Tanaman sebagai Strategi Pengelolaan Lahan

Rotasi tanaman merupakan bentuk budidaya dimana tanaman yang berbeda di area yang sama dalam waktu yang berbeda. Rotasi tanaman adalah metode pertanian yang bertujuan untuk meningkatkan kesehatan tanah dan mengurangi kemungkinan hama dan penyakit dengan cara mengganti tanaman yang memiliki kebiasaan pertumbuhan dan kebutuhan nutrisi yang berbeda (Bowie, 2024). Strategi pengelolaan lahan dengan rotasi tanaman lebih difokuskan pada kesehatan lahan, bukan pada kuantitas produksi. Berbeda dengan tumpang gilir, rotasi tanaman dilakukan bergantian antar musim.

8.3.1 Penyeimbangan Nutrisi

Rotasi tanaman yang strategis menggabungkan tanaman yang membutuhkan banyak nutrisi (seperti jagung) dengan tanaman yang bersifat memulihkan nutrisi (seperti kacang-kacangan). Kacang-kacangan mengikat nitrogen atmosfer dan secara alami mengisi kembali tanah serta mengurangi ketergantungan pada pupuk N sintetis. Tanaman penutup tanah atau hijauan dari famili Legum dan peningkatan panjang/kompleksitas rotasi tanaman meningkatkan keseimbangan P dan K pada sistem organik. Aplikasi pupuk berdasarkan uji tanah pada sistem konvensional mengurangi kadar P tanah yang tinggi sambil mempertahankan hasil panen (White et al., 2021).

8.3.2 Gangguan Biologis

Rotasi yang melibatkan famili berbeda membantu mencegah penumpukan hama, penyakit, dan gulma yang spesifik terhadap inang. Melalui penghilangan sumber makanan hama atau gulma selama satu tahun atau lebih, petani dapat mengurangi populasi hama. Rotasi tanaman dengan famili beragam mampu untuk memutus siklus penyakit dalam profil tanah. Infeksi oleh patogen mudah terjadi di lahan monokultur. Tanpa rotasi, infeksi semacam itu dapat berkembang biak di tanah dan menyebar lebih cepat, menyebabkan wabah penyakit tanaman menjadi lebih parah. Metode pertanian monokultur dapat berfungsi sebagai tanaman inang bagi penyakit untuk berkembang. Siklus patogen akan terganggu oleh rotasi yang menghasilkan pertumbuhan tanaman yang termasuk dalam famili yang berbeda, karena patogen tidak dapat menginfeksi tanaman yang termasuk dalam famili yang berbeda. Akibatnya, populasi patogen di tanah menurun dengan cepat. Sebagai contoh, periode rotasi tanaman beragam selama tujuh tahun, yang meliputi tiga tahun alfalfa, dua tahun cabai, dan dua tahun kapas sebelum kembali ke alfalfa. Alfalfa, cabai, dan kapas adalah tiga tanaman yang sesuai dengan berbagai macam tanaman (Shah *et al.*, 2021).

8.3.3 Optimalisasi Struktur Tanah

Penanaman tanaman yang berakar dalam secara bergantian (misalnya, alfalfa atau wortel) dengan tanaman berakar dangkal (misalnya, biji-bijian kecil) membantu mengurangi pemadatan lapisan tanah bawah, meningkatkan infiltrasi air, dan meningkatkan kandungan bahan organik tanah. Penerapan rotasi tanaman yang beragam, seperti tanaman penutup yang ditanam di antara kedua jenis tanaman

komersial, mengintegrasikan eksudat akar dan biomassa untuk menjaga komposisi fisikokimia tanah agar terhindar dari erosi. Pembentukan dan sekresi atau kemunculan rizosfer akan membuat interaksi akar dan hifa mikoriza terkait, atau degradasi komponen penstabil dan pendestabil, serta pembentukan biopori yang tangguh. Akar dan sisa-sisa bagian tanaman ini dapat memengaruhi berbagai elemen dalam menjaga kualitas tanah. Setelah panen kacang polong dan jelai yang beragam, jika akarnya diperhitungkan untuk akumulasi tanah dan produksi makropori, maka akan terlihat tanah memiliki partikel yang lebih padat dan permanen (Shah *et al.*, 2021).

8.3.4 Diversifikasi Ekonomi

Berdasarkan sudut pandang manajemen, rotasi tanaman dapat menyebarkan risiko keuangan ke berbagai komoditas yang ditanam. Jika harga pasar suatu tanaman turun atau terjadi gagal panen akibat cuaca, tanaman lain dalam urutan rotasi dapat berperan sebagai jaring pengaman. Catatan dari Zimbabwe menunjukkan bahwa sistem rotasi tanaman yang beragam mampu meningkatkan produksi dan memberikan pendapatan yang lebih tinggi bagi petani sepanjang tahun (Makate *et al*., 2016). Rotasi tanaman yang beragam secara ekonomi lebih kompetitif dibandingkan sistem tumpang sari khusus, dengan keunggulan yang terbukti dalam konservasi lingkungan (udara, air, dan tanah). Rotasi tanaman yang beragam dan terencana dengan baik merupakan strategi penting untuk mengurangi erosi tanah, konsumsi pestisida, dan emisi gas rumah kaca, serta meningkatkan efisiensi penggunaan air dan pupuk (Garbelini *et al.*, 2022).

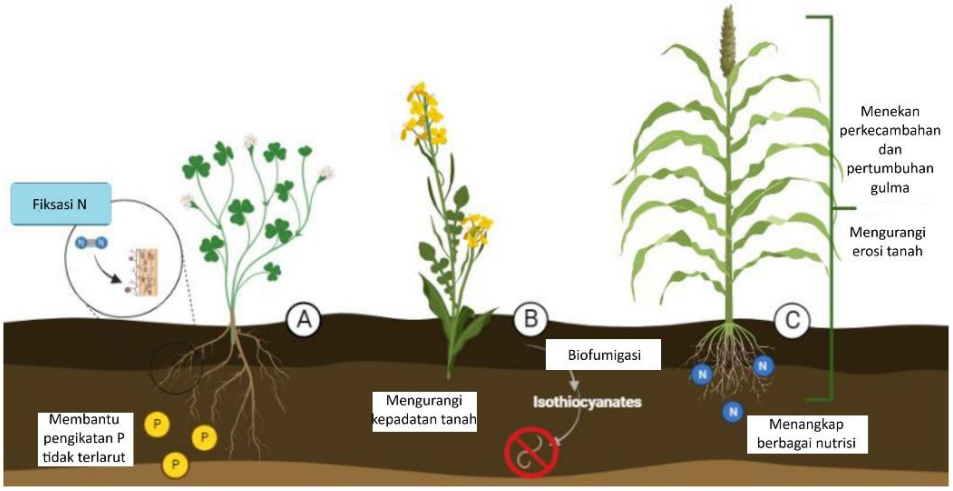
8.4 Tanaman Penutup Tanah (*Cover crop*) dan Peranannya

Pada budidaya polikultur dengan beragam tanaman yang tumbuh secara bersama, integrasi tanaman penutup lahan dalam sistem menjadi suatu strategi pengelolaan yang penting, dimana sistem tidak lagi bersisi tanaman budidaya semata namun secara utuh menjadi agroekosistem yang fungsional. Beberda halnya dengan sistem monokultur dimana tanaman penutup lahan akan tumbuh saat bukan musim tanam, pada polikultur tanaman penutup tanah menjadi mulsa hidup atau „tanaman pelayan“ yang secara berkelanjutan memberikan dukungan ekologis. Manfaat utama tanaman tersebut dalam konteks ini adalah peningkatan efisiensi penggunaan sumber daya. Misalnya, sementara tanaman komersial utama menempati kanopi bagian atas dan tengah, tanaman penutup tanah yang tumbuh

rendah seperti semanggi atau vetch menempati lapisan tanah. Susunan bertingkat ini memaksimalkan penangkapan fotosintesis, memastikan bahwa sinar matahari yang seharusnya mengenai tanah kosong diubah menjadi biomassa organik, sekaligus menekan gulma melalui naungan fisik dan alelopati (pelepasan biokimia alami yang menghambat perkecambahan gulma).

Tanaman penutup tanah dalam polikultur bertindak sebagai penstabil biologis yang penting untuk kesehatan tanah dan siklus nutrisi. Dalam sistem yang beragam, arsitektur akar berbagai tanaman saling bersinggungan. Tanaman penutup tanah seringkali memiliki sistem akar serabut atau akar tunggang yang dalam yang menangkap nutrisi seperti fosfor dan kalium dari lapisan tanah yang lebih dalam lalu membawanya ke permukaan di mana nutrisi tersebut tersedia bagi tanaman utama setelah proses dekomposisi tanaman penutup tanah. Hal yang paling sering terjadi, penggunaan tanaman penutup tanah dari jenis legum memfasilitasi komplementaritas ceruk melalui fiksasi nitrogen biologis. Sinergi ini mengurangi ketergantungan sistem pada input sintetis, karena tanaman penutup tanah pada dasarnya "memproduksi" pupuk di tempatnya. Keanekaragaman biologis ini juga mendorong aktivitas mikrobioma tanah yang lebih kuat. Berbagai eksudat akar dari tanaman penutup tanah mendukung beragam jamur dan bakteri bermanfaat, yang pada gilirannya meningkatkan agregasi tanah, infiltrasi air, dan penyerapan karbon. Hal tersebut pada akhirnya akan menciptakan sistem yang jauh lebih tangguh terhadap tekanan akibat iklim seperti kekeringan atau curah hujan lebat. Pada wilayah subtropis penggunaan tanaman penutup tanah musim dingin tampaknya merupakan strategi pengelolaan sistem untuk meningkatkan hasil panen tanaman musim panas (Garbelini *et al.*, 2022).

Tidak semua sistem pertanian cocok menggunakan tanaman penutup tanah, terutama pada rotasi tanaman komersial jangka panjang. Setiap jenis tanaman penutup tanah memiliki fungsi berbeda bagi tanah dan tanaman utama. Dalam jangka panjang, tanaman ini dapat meningkatkan kesuburan tanah, bahan organik, dan kapasitas air tanah, tetapi dalam jangka pendek dapat mengurangi ketersediaan air bagi tanaman komersial. Kendala lainnya meliputi biaya penanaman, kebutuhan peralatan baru, serta proses penghentian tanaman penutup tanah yang masih rumit dan memakan waktu bagi petani (Quintarelli *et al.*, 2022).



Gambar 8.2: Diagram skema peran dari beberapa tipe tanaman penutup lahan berbeda dalam agroekosistem dan layanan ekologisnya.

A=jenis Leguminous,

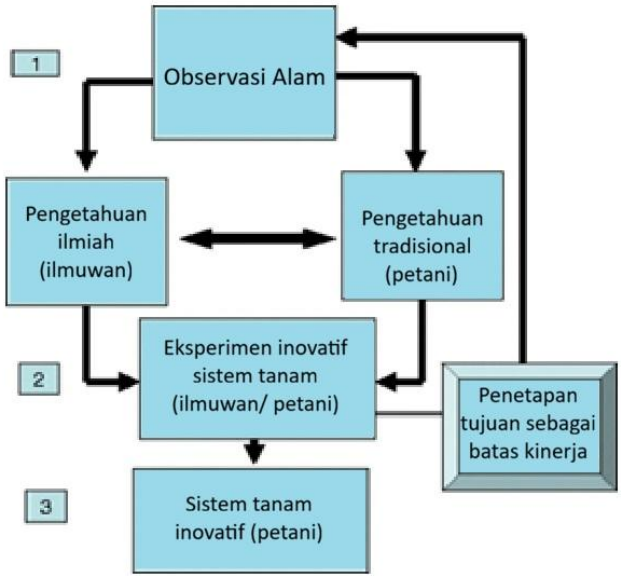
B=jenis Brassicaceous

C=jenis Gramineous

8.5 Desain Pola Tanam Berbasis Ekologi untuk Ketahanan Pangan

Desain pola tanam berbasis ekologi merupakan strategi pendekatan pertanian yang sebisa mungkin meniru fungsi-fungsi ekosistem alami untuk mencapai ketahanan pangan dalam jangka panjang. Berbeda dari desain konvensional yang menggantungkan pada input tinggi dalam monokultur, desain pola tanam berbasis ekologi difokuskan pada fungsi keanekaragaman hayati, seleksi yang disengaja dan ruang penanaman yang diatur sedemikian rupa untuk melengkapi satu sama lain dalam relung biologis (Bommarco, 2024). Praktik-praktik integrasi seperti tumpangsari, agroforestri, dan rotasi kompleks, mampu memaksimalkan pembagian sumber daya. Sebagai contoh, tanaman dengan kedalaman akar yang berbeda dan pola pertumbuhan temporal disesuaikan untuk memastikan bahwa air, sinar matahari, dan nutrisi digunakan secara lebih efisien sepanjang tahun (Jakhar *et al.*, 2010).

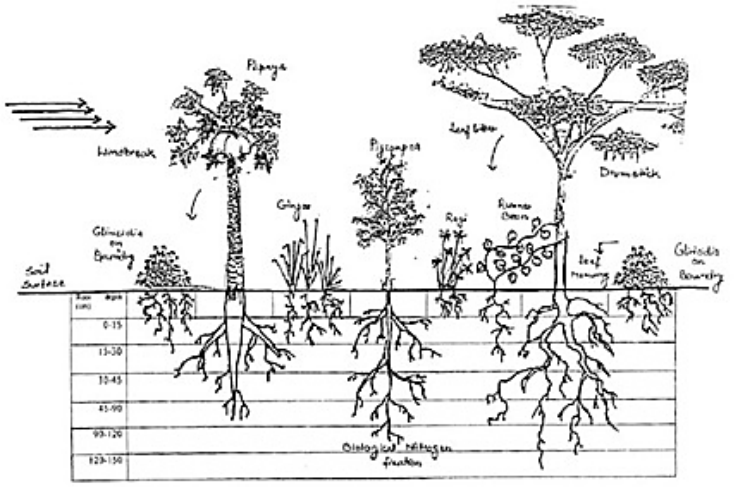
Efisiensi ini secara langsung mengatasi masalah ketahanan pangan dengan menstabilkan hasil panen; bahkan jika satu spesies menderita dalam kondisi cuaca tertentu, produktivitas sistem secara keseluruhan tetap tangguh, menyediakan pasokan makanan yang konsisten untuk populasi yang terus bertumbuh. Desain pola tanam berbasis ekologi memiliki beberapa kerangka yang disusun dalam 3 tahapan utama yaitu pengamatan alam, eksperimen inovatif sistem tanam, dan penerapan sistem tanam inovatif. Langkah-langkah ini juga mencakup identifikasi fungsi-fungsi yang perlu ditingkatkan dan spesies-spesies kunci dalam ekosistem alami yang memenuhi fungsi-fungsi tersebut.



Gambar 8.3: Langkah kerja utama dalam desain pola tanam berbasis ekologi (Malézieux, 2012)

Fungsi utama desain pola tanam berbasis ekologi adalah tameng biologis yang mempertahankan diri dari volatisasi perubahan iklim, yang merupakan ancaman utama bagi stabilitas ketahanan pangan (Ghaffar *et al.*, 2022). Desain yang turut memasukkan "tanaman perangkap" yang memancing pergi hama dari tanaman pangan atau legum yang secara alami memupuk tanah. Intensifikasi ekologis ini tidak hanya mengurangi biaya produksi bagi petani kecil namun juga melestarikan "modal alam", seperti kesehatan tanah dan populasi hewan penyerbuk yang

dibutuhkan untuk panen di masa depan (Tittonell, 2019). Selain itu, desain ini sering kali menggabungkan berbagai tanaman kaya nutrisi yang mampu mengatasi "kelaparan tersembunyi" dengan mendiversifikasi pola makan lokal di luar karbohidrat sederhana. Pada akhirnya, desain pola tanam berbasis ekologi mengubah pertanian dari sekedar lokasi produksi menjadi ekosistem mandiri yang dapat menahan guncangan eksternal sambil mempertahankan hasil dan kualitas yang lebih baik.



Gambar 8.4: Sistem penanaman tipikal dengan perbedaan ketinggian untuk anidasi spasial dan perbedaan kedalaman untuk pengambilan kelembapan dan nutrisi dari lapisan tanah yang berbeda
(Jakhar *et al.*, 2010)

Prinsip-prinsip utama dalam membuat desain pola tanam berbasis ekologi adalah sebagai berikut (Malézieux, 2012):

1. Penggunaan sifat fungsional yang saling melengkapi untuk memastikan produksi dan ketahanan.
2. Pertahanan kesuburan tanah melalui tanaman penutup tanah atau mulsa.
3. Mengutamakan fungsi fasiltasi daripada persaingan antar tanaman.
4. Pengendalian hama melalui tingkat trofik yang kompleks dan penggunaan sifat tanaman tertentu.
5. Reproduksi suksesi ekologis setelah terjadi gangguan.

BAB 9
PENGELOLAAN AIR DALAM PERSPEKTIF AGROEKOLOGI

9.1 Siklus Hidrologi dan Kaitannya dengan Sistem Pertanian

Air adalah fondasi dari semua sistem pertanian karena berperan penting dalam siklus hidrologi yang mengatur pergerakan air melalui proses evaporasi, transpirasi, kondensasi, presipitasi, infiltrasi, limpasan, dan aliran air tanah (Oki and Kanae, 2006; Rockström et al., 2010). Pengelolaan air dalam pertanian menjadi sangat penting untuk mendukung produksi pangan berkelanjutan, terutama dalam menghadapi meningkatnya kelangkaan air dan variabilitas iklim global (Molden, 2007; Schewe et al., 2014).

Air adalah sumber daya yang sangat dinamis dan terus bergerak dalam sistem Bumi melalui siklus hidrologi. Dalam sebuah tes yang dilakukan oleh Oki dan Kanae, air tidak hanya disimpan di tempat-tempat seperti sungai, danau, dan air tanah, tetapi lebih penting lagi sebagai aliran yang terus bergerak melalui proses atmosfer dan tanah **(**Oki and Kanae, 2006**)**.

Siklus hidrologi adalah peredaran air yang berlangsung terus-menerus melalui berbagai fase—cair, padat (es), dan gas (uap air)—serta berpindah antara berbagai lokasi di Bumi. Air bergerak dari lautan dan danau ke atmosfer, kemudian jatuh kembali ke daratan dalam bentuk hujan atau salju, mengalir di permukaan menuju sungai, meresap ke dalam tanah, dan akhirnya kembali ke lautan. Jumlah total air di planet ini pada dasarnya tetap konstan; air hanya berubah bentuk dan lokasi.

Siklus ini tidak memiliki titik awal yang tetap. Proses ini terutama digerakkan oleh energi matahari yang memanaskan air permukaan sehingga terjadi penguapan, serta oleh gaya gravitasi yang menarik presipitasi ke bawah dan menggerakkan air di atas maupun di bawah permukaan tanah. Air dapat berada dalam ketiga fase tersebut secara bersamaan di permukaan Bumi, dan perpindahan antar fase inilah yang menjaga siklus tetap berlangsung.

Siklus hidrologi ini mencakup beberapa proses utama, seperti penguapan, transpirasi, kondensasi, curah hujan, infiltrasi, dan aliran permukaan serta bawah tanah. Siklus hidrologi terdiri dari beberapa proses yang saling terhubung:

1. **Evaporasi**

   Perubahan air dari bentuk cair menjadi uap akibat energi surya. Proses ini terutama terjadi di permukaan laut, danau, sungai, serta tanah yang lembap. Energi dari matahari memungkinkan molekul air melepaskan diri dari permukaan cair dan masuk ke atmosfer. Menurut portal Precipitation Education milik NASA, evaporasi dari laut, samudra, dan badan air lainnya menyumbang hampir 90% kelembapan di atmosfer. Faktor-faktor seperti suhu, kecepatan angin, dan kelembapan memengaruhi laju terjadinya evaporasi.

2. **Transpirasi**

   Pelepasan uap air dari permukaan tanaman, terutama melalui daun. umbuhan menyerap air melalui akar dan melepaskannya melalui pori-pori mikroskopis di sisi bawah daun yang disebut stomata. Proses ini menyumbang sekitar 10% kelembapan atmosfer. Sebagai gambaran, satu akre tanaman jagung dapat melepaskan hingga 15.000 liter air per hari melalui transpirasi. Dalam hidrologi, penguapan dari permukaan tanah dan transpirasi tanaman sering digabungkan dan disebut sebagai evapotranspirasi.

3. **Evapotranspirasi**

   Gabungan antara evaporasi dan transpirasi, yang merupakan parameter kunci dalam bidang pertanian.

4. **Kondensasi dan Pembentukan Awan**

   Proses kebalikan dari penguapan, yaitu fenomena mendinginnya uap air sehingga berubah kembali menjadi titik-titik air cair. Saat udara hangat dan lembap naik ke ketinggian yang lebih tinggi dengan suhu lebih rendah, uap air terkondensasi di sekitar partikel mikroskopis seperti debu, garam, atau serbuk sari, membentuk tetesan awan. National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) menjelaskan bahwa kondensasi tidak bergantung pada ambang batas suhu tunggal, melainkan pada selisih antara suhu udara dan suhu titik embun (dew point). Awan yang terlihat maupun kabut merupakan hasil nyata dari proses kondensasi. Presipitasi: etika tetesan air yang terkondensasi di

awan menjadi terlalu berat untuk tetap tersuspensi, tetesan tersebut jatuh ke Bumi sebagai presipitasi. Fenomena ini dapat berbentuk hujan, salju, hujan es (sleet), atau hujan batu (hail), tergantung pada kondisi atmosfer. Presipitasi merupakan mekanisme utama pendistribusian air tawar ke daratan. Secara rata-rata, Bumi menerima sekitar 980 mm presipitasi per tahun di seluruh permukaan samudra dan daratan. Dalam sektor pertanian, waktu, jumlah, dan distribusi presipitasi secara langsung menentukan keberhasilan panen, kebutuhan irigasi, serta perencanaan penyimpanan air. Infiltrasi: Air masuk ke dalam permukaan tanah.

5. Infiltrasi dan Perkolasi

Pergerakan air melalui lapisan tanah menuju air tanah (groundwater). Infiltrasi adalah proses meresapnya air dari permukaan tanah ke dalam lapisan tanah. Setelah menembus lapisan permukaan, air tersebut dapat tertinggal sebagai kelembapan tanah yang tersedia bagi akar tanaman, atau mengalami perkolasi lebih dalam untuk mengisi kembali akuifer air tanah. Laju infiltrasi sangat bergantung pada komposisi tanah, tingkat kelembapan yang ada, dan tutupan vegetasi. Tanah porus seperti lempung berpasir memungkinkan lebih banyak air untuk berinfiltrasi dibandingkan dengan tanah liat yang padat.

6. Limpasan (*Runoff*)

Aliran air di permukaan menuju sungai dan danau. mpasan terjadi ketika intensitas presipitasi melampaui kapasitas infiltrasi tanah. Air yang berlebih mengalir di atas permukaan tanah, terkumpul di sungai kecil, sungai besar, dan danau, hingga akhirnya kembali ke laut. Faktor-faktor seperti jenis tanah, kemiringan lereng, tutupan vegetasi, dan intensitas curah hujan memengaruhi besaran limpasan yang terjadi. Dalam konteks pertanian, limpasan yang berlebihan dapat memicu erosi tanah dan hilangnya nutrisi, sekaligus membawa residu pupuk dan pestisida ke badan air. Sebagaimana dicatat oleh National Geographic Society, limpasan juga berperan penting dalam membentuk lanskap fisik Bumi melalui proses erosi.

7. Aliran Ali Tanah (*Grounwater Flow*)

Aliran air tanah merujuk pada pergerakan air bawah tanah yang lambat melalui lapisan batuan dan sedimen. Air tanah mengisi pori-pori dan rekahan pada material bawah tanah seperti pasir dan kerikil—berlawanan dengan anggapan umum, air tanah tidak membentuk sungai bawah tanah. Air ini dapat tersimpan dalam akuifer selama kurun waktu beberapa tahun hingga ribuan tahun, menjadikan air tanah sebagai cadangan strategis jangka panjang. Pada akhirnya, air tanah akan keluar kembali ke permukaan melalui mata air atau merembes ke sungai dan samudra, guna melengkapi siklus hidrologi tersebut.

Semua proses ini saling terhubung dan dikendalikan oleh energi matahari dan kondisi iklim di seluruh dunia. Namun, air tidak terdistribusi secara merata, baik dalam hal waktu maupun tempat, sehingga ada wilayah yang memiliki kelebihan air dan ada juga yang kekurangan air. Dalam konteks pertanian, hal ini sangat penting karena menentukan ketersediaan air bagi tanaman. Oleh karena itu, memahami siklus hidrologi menjadi sangat penting dalam pengelolaan air yang efektif **(**Oki and Kanae, 2006**)**. Sistem pertanian sangat bergantung pada siklus air, terutama hujan dan penguapan. Hasil pertanian, terutama pada sistem tadah hujan, sangat dipengaruhi oleh cara air hujan didistribusikan dan digunakan oleh tanah dan tanaman (Rockström et al., 2010).

Air mendukung pertumbuhan tanaman melalui berbagai fungsi:

- Media transportasi nutrisi.
- Komponen esensial untuk fotosintesis.
- Menjaga turgor dan struktur tanaman.
- Mengatur suhu tanah dan aktivitas mikrobia.

Dalam agroekosistem, ketersediaan air menentukan produktivitas tanaman, jadwal tanam, dan pola tanam. Agroekologi menekankan integrasi proses alami ke dalam usahatani. Dari perspektif ini:

- Lahan tani adalah bagian dari daerah aliran sungai (DAS) yang lebih luas.
- Tanah berfungsi sebagai reservoir (penampung) air.
- Vegetasi memengaruhi infiltrasi curah hujan dan evapotranspirasi.

Praktik agroekologi meningkatkan efisiensi siklus air dengan cara:

- Meningkatkan bahan organik tanah.
- Mendorong biodiversitas.
- Mengurangi limpasan permukaan.

Siklus hidrologi dalam skala lanskap atau daerah aliran sungai (*watershed*) sangat penting. Pendekatan ini mengintegrasikan interaksi antara (He dan James, 2021):

- Aliran air
- Penggunaan lahan
- Aktivitas manusia
- Proses ekologi

Watershed merupakan unit alami terbaik untuk memahami hubungan antara siklus hidrologi dan pengelolaan sumber daya air . Dalam sistem pertanian, pendekatan ini membantu (He dan James, 2021):

- Mengurangi limpasan dan erosi
- Meningkatkan infiltrasi
- Menjaga keseimbangan air

Pertanian tidak hanya dipengaruhi oleh siklus hidrologi, tetapi juga memengaruhi siklus tersebut. Intensifikasi pertanian telah menyebabkan perubahan signifikan dalam:

- Aliran air permukaan
- Kualitas air
- Siklus nutrien

Tinjauan Gordon dan Falkenmark (2010) menunjukkan bahwa aktivitas pertanian dapat meningkatkan produksi pangan, tetapi juga menimbulkan *trade-off* terhadap layanan ekosistem lain, seperti kualitas air dan stabilitas hidrologi. Hal ini menunjukkan perlunya pendekatan agroekologi yang mampu menyeimbangkan produksi dan konservasi sumber daya air.

Pertanian modern sering kali mengganggu siklus air alami melalui:

- Deforestasi (penggundulan hutan).
- Irigasi berlebihan.
- Pemadatan tanah.
- Sistem drainase.

Intervensi ini dapat menyebabkan:

- Berkurangnya pengisian ulang air tanah (*groundwater recharge*).
- Peningkatan risiko banjir.
- Kelangkaan air.

Pengelolaan air harus beralih dari pendekatan konvensional menuju pendekatan yang lebih terintegrasi dan berbasis ekosistem. Rockström et al. menegaskan perlunya perubahan paradigma dalam pengelolaan air pertanian, dengan menempatkan curah hujan sebagai titik awal pengelolaan sumber daya air (Rockström et al., 2010). Peran utama bagi pertanian meliputi:

- Peningkatan efisiensi penggunaan air
- Konservasi air tanah dan air permukaan
- Integrasi pengelolaan lahan dan air
- Penggunaan teknologi berbasis agroekologi

9.2 Irigasi Berkelanjutan dan Efisiensi Penggunaan Air

Irigasi berkelanjutan didefinisikan sebagai pengelolaan air yang mampu memenuhi kebutuhan tanaman tanpa merusak sumber daya air dan lingkungan dalam jangka panjang. **E**fisiensi irigasi tidak hanya berkaitan dengan jumlah air yang digunakan, tetapi juga bagaimana air tersebut dimanfaatkan secara produktif oleh tanaman (Pereira et al., 2012). **P**eningkatan efisiensi irigasi merupakan strategi utama dalam menghadapi keterbatasan air global.

Irigasi merupakan faktor kunci dalam menjamin produksi tanaman, khususnya di wilayah dengan curah hujan yang tidak menentu. Namun demikian, praktik irigasi yang tidak efisien dapat menyebabkan pemborosan air, degradasi tanah, serta kerusakan lingkungan. Irigasi merupakan faktor kunci dalam menjamin produksi

tanaman, khususnya di wilayah dengan curah hujan yang tidak menentu. Namun demikian, praktik irigasi yang tidak efisien dapat menyebabkan pemborosan air, degradasi tanah, serta kerusakan lingkungan (FAO, 2017).

Efisiensi penggunaan air (Water use Efficiency/WUE) merupakan indikator penting yang menggambarkan hubungan antara hasil panen dan jumlah air yang digunakan. WUE mengacu pada rasio antara hasil panen dengan jumlah air yang digunakan. Peningkatan WUE dapat dicapai dapat dicapai melalui kombinasi pendekatan genetik (varietas tahan kekeringan) dan manajemen agronomi, melalui pemilihan varietas tahan kekeringan, penjadwalan irigasi yang lebih baik, peningkatan kemampuan tanah dalam menahan air, serta pengurangan kehilangan air akibat evaporasi (Blum, 2009). Selain itu, WUE dipengaruhi oleh kondisi iklim, jenis tanah, teknologi irigasi dan praktik budidaya.

Pendekatan agroekologi mendorong penggunaan sumber air lokal, integrasi tanaman dan ternak, sistem polikultur yang mengoptimalkan penggunaan air, serta agroforestri yang dapat mengurangi evaporasi. Pendekatan ini menekankan keberlanjutan dan keseimbangan ekosistem (Altieri, 2018). Tantangan utama dalam pengelolaan irigasi meliputi kelangkaan air, tingginya biaya energi, masalah salinisasi, serta distribusi air yang tidak merata. Penanganan masalah ini memerlukan kombinasi solusi teknologi dan pendekatan ekologis.

Irigasi berkelanjutan bertujuan untuk mengoptimalkan penggunaan air, menjaga kesehatan tanah, melindungi sumber daya air, serta menjamin produktivitas jangka panjang. Prinsip-prinsip utamanya meliputi pemberian air sesuai kebutuhan tanaman, meminimalkan kehilangan akibat evaporasi dan limpasan, serta penggunaan teknologi irigasi yang tepat.

Irigasi permukaan merupakan metode di mana air dialirkan di atas permukaan tanah, yang relatif sederhana namun seringkali kurang efisien. Irigasi sprinkler meniru curah hujan dengan tingkat efisiensi sedang. Irigasi tetes (drip) menyalurkan air langsung ke akar tanaman dengan efisiensi tinggi hingga 90–95%. Sementara itu, irigasi bawah permukaan (subsurface) mengalirkan air di bawah permukaan tanah sehingga mengurangi kehilangan akibat evaporasi.

Teknologi seperti drip irrigation dan sprinkler terbukti mampu meningkatkan efisiensi penggunaan air secara signifikan. Menurut Fereres dan Soriano (2007), sistem irigasi presisi dapat mengurangi kehilangan air akibat evaporasi dan limpasan. Namun, adopsi teknologi ini sering terkendala oleh biaya dan akses teknologi, terutama di negara berkembang.

Agroekologi menekankan pengurangan ketergantungan pada input eksternal melalui:

- Peningkatan kapasitas tanah menyimpan air
- Penggunaan mulsa
- Diversifikasi tanaman

Pendekatan ini mampu meningkatkan efisiensi air secara alami dan berkelanjutan. Kelangkaan air dan perubahan iklim menjadi tantangan utama dalam pengelolaan pertanian. Secara global, sektor pertanian menggunakan sekitar 70% air tawar dunia (Molden, 2007), sehingga efisiensi irigasi menjadi prioritas penting dalam mendukung keberlanjutan produksi pangan.

9.3 Pengelolaan Air Hujan dan Konservasi Air di Lahan Pertanian

Sebagian besar lahan pertanian dunia bergantung pada curah hujan. Menurut Rockström (2003), sekitar 60–70% produksi pangan global berasal dari sistem tadah hujan. Hal ini menegaskan pentingnya pengelolaan air hujan dalam meningkatkan ketahanan pangan. Air hujan merupakan sumber daya penting, terutama dalam sistem pertanian tadah hujan. Pengelolaan yang efektif dapat meningkatkan produktivitas dan ketahanan sistem pertanian secara signifikan (Rockström et al., 2010).

Pengelolaan air hujan berperan dalam mengurangi ketergantungan terhadap irigasi, meningkatkan kelembapan tanah, mencegah erosi, serta mengisi kembali cadangan air tanah (groundwater recharge) (United Nations Environment Programme, 2019). Teknik pemanenan air hujan meliputi pertanian kontur yang mengikuti garis kontur untuk mengurangi limpasan, terasering yang meningkatkan retensi air, penggunaan mulsa untuk mengurangi evaporasi, pembuatan lubang dan parit infiltrasi untuk meningkatkan resapan air, serta kolam pertanian untuk menyimpan air hujan (Critchley & Siegert, 1991).

Tanah yang sehat memiliki peran penting dalam konservasi air, di mana kandungan bahan organik yang tinggi meningkatkan kapasitas menahan air, struktur tanah yang baik meningkatkan infiltrasi, serta aktivitas biologis mendukung siklus hara (Lal, 2020). Praktik seperti tanaman penutup tanah (cover crops), pengolahan tanah minimum (reduced tillage), agroforestri, dan sistem pertanian terpadu dapat meningkatkan ketahanan terhadap variabilitas iklim melalui konservasi air yang lebih baik (FAO, 2020).

Kemiringan lahan pada area pertanian merupakan salah satu penyebab utama rendahnya kandungan air tanah akibat rendahnya laju infiltrasi tanah pada saat hujan. Biomulsa merupakan salah satu metode konservasi yang dapat digunakan untuk menutup dan melindungi permukaan tanah dari gulma, mencegah erosi tanah, serta meningkatkan laju infiltrasi air ke dalam tanah. Penggunaan biomulsa dapat meningkatkan laju infiltrasi tanah (Sarjono, et al., 2018).

Tanah berfungsi sebagai reservoir alami. Lal (2015) menekankan bahwa peningkatan bahan organik tanah dapat meningkatkan kapasitas retensi air secara signifikan. Hal ini sangat penting dalam sistem agroekologi yang mengandalkan proses alami. Konservasi tanah seperti praktek *cover cropping,* agroforestry dam konservasi tanah dapat meningkatan efisiensi pemanfaat air hujan sekaligus juga menjaga kesuburan tanah.

9.4 Dampak Kekeringan dan Banjir terhadap Ketahanan Pangan

Variabilitas iklim telah meningkatkan frekuensi dan intensitas kejadian kekeringan serta banjir, yang menjadi ancaman serius bagi sektor pertanian dan ketahanan pangan. Keringan merupakan salah satu faktor utama penurunan produksi pertanian. Perubahan iklim meningkatkan frekuensi dan intensitas kekeringan di banyak wilayah dunia (Schewe *et al*., 2014). Kekeringan terjadi ketika ketersediaan air berada di bawah kondisi normal, yang dapat menyebabkan penurunan hasil panen, kegagalan panen, degradasi tanah, serta kerugian pada ternak.

Banjir juga memberikan dampak signifikan terhadap pertanian. Hirabayashi *et al*. (2013) menunjukkan bahwa risiko banjir global meningkat akibat perubahan iklim. Banjir terjadi akibat curah hujan berlebih atau sistem drainase yang buruk, dengan dampak berupa kerusakan tanaman, erosi tanah, pencucian unsur hara, serta penyebaran hama dan penyakit (World Meteorological Organization, 2020).

Dampaknya yaitu kerusakan tanaman, erosi tanah, dan hilangnya nutrient dari dalam tanah. Benyak jenis tanaman tidak toleran terhadap genang terus menerus.

Baik kekeringan maupun banjir memengaruhi ketersediaan, akses, stabilitas, dan pemanfaatan pangan, dengan petani kecil sebagai kelompok yang paling rentan terhadap dampak tersebut (FAO, 2018).

Strategi agroekologi mencakup diversifikasi sistem tanam, penggunaan varietas lokal yang adaptif, pengelolaan tanah yang lebih baik, serta teknik pemanenan air untuk meningkatkan ketahanan terhadap perubahan iklim (Altieri *et al*., 2015). Upaya mitigasi risiko meliputi prakiraan iklim, asuransi pertanian, serta strategi adaptasi berbasis komunitas yang dapat meningkatkan kesiapsiagaan terhadap bencana.

9.5 Teknologi Panen Air (Water Harvesting) berbasis Agroekologi

Pemanenan air merupakan strategi penting dalam agroekologi yang berfokus pada pengumpulan, penyimpanan, dan pemanfaatan air secara efisien (FAO, 2018). Pemanenan air merupakan teknik pengumpulan dan penyimpanan air untuk digunakan di masa depan. Menurut Critchley dan Siegert (1991), teknologi ini sangat penting di daerah kering dan semi-kering.

Pemanenan air mencakup usaha pengumpulan air hujan, penyimpanan untuk penggunaan di masa mendatang, serta peningkatan kelembapan tanah. Teknologi panen air dalam agroekologi tidak hanya berfokus pada pengumpulan air, tetapi juga pada optimalisasi interaksi antara tanah, air, tanaman, dan ekosistem. Pendekatan ini menekankan prinsip Lloyd and Dennison (2018):

- Meningkatkan infiltrasi
- Mengurangi limpasan (*runoff*)
- Memperbaiki kapasitas simpan air tanah
- Memanfaatkan proses alami

Sistem pemanenan air meliputi sistem mikro (micro-catchment) di sekitar tanaman, sistem makro (macro-catchment) seperti waduk, pemanenan air hujan dari atap bangunan, serta penangkapan limpasan permukaan untuk keperluan pertanian (FAO, 2018).

Sistem tradisional seperti zai pits, bunds, ridges, dan check dams terbukti efektif karena biaya rendah, adaptif terhadap kondisi lokal, serta berkelanjutan secara lingkungan. Pemanenan air dapat diintegrasikan dengan agroforestri, sistem peternakan, dan diversifikasi tanaman untuk meningkatkan produktivitas dan ketahanan sistem pertanian secara keseluruhan (FAO, 2020).

Zai pits merupakan salah satu teknologi paling terkenal dalam agroekologi di wilayah kering Afrika (Amede *et al.*, 2011).

- Lubang kecil dibuat untuk menangkap air hujan dan bahan organik
- Meningkatkan infiltrasi dan ketersediaan air di zona akar

Berbagai literatur menunjukkan bahwa:

- Produktivitas tanaman meningkat hingga 250–2000%.
- Efisiensi penggunaan air meningkat hingga 300–700%.

***Infiltration Pits* dan *Planting Basins* (Nyakudya *et al.*, 2014)**

Teknologi ini merupakan pengembangan dari zai pits:

- Digunakan untuk meningkatkan retensi air pada tanah kering
- Sering dikombinasikan dengan pemupukan dan konservasi tanah

Catatan dari Zimbabwe menunjukkan bahwa:

- Infiltration pits meningkatkan distribusi air lateral di dalam tanah
- Meningkatkan efisiensi pemanfaatan air oleh tanaman

***Contour Bunds* dan *Contour Ridges* (Narayan et al., 2019).**

Teknologi ini bekerja dengan prinsip memperlambat aliran air di lahan miring:

- Dibuat sejajar kontur
- Mengurangi kecepatan limpasan
- Meningkatkan infiltrasi

Literatur terkait menunjukkan bahwa:

- Meningkatkan kelembaban tanah secara signifikan
- Menunda waktu terjadinya runoff

- Meningkatkan produktivitas lahan

***Micro-catchment Systems (Half-moons, Crescent Bunds)* (Narayan *et al.*, 2017).**

Teknologi ini banyak digunakan pada sistem *agroforestry*:

- Berbentuk setengah lingkaran untuk menangkap air hujan
- Cocok untuk tanaman pohon atau tanaman tahunan

Literatur terkait menunjukkan bahwa:

- Meningkatkan pertumbuhan tanaman pada lahan miring
- Meningkatkan efisiensi pemanfaatan air hujan dalam sistem *agroforestry*

Teknologi *Water Harvesting* Skala Lanskap (*Macro-Catchment*)

Selain skala lahan, agroekologi juga menggunakan pendekatan lanskap:

Catchment Ponds dan Reservoir Lokal

- Menampung limpasan dari area luas
- Digunakan untuk irigasi tambahan

Dalam konteks Indonesia, pembangunan embung dan reservoir kecil terbukti meningkatkan ketersediaan air dan produksi pertanian

Diversion Systems (Pengalihan Aliran Air)

- Mengalihkan air dari area tangkapan ke lahan pertanian
- Sering digunakan di daerah semi-arid

Teknik ini merupakan bagian dari sistem tradisional yang memanfaatkan kondisi topografi. Keunggulan pendekatan Pemanenan Air Berbasis Agroekologi meliputi peningkatan ketersediaan air, pengurangan kerentanan terhadap perubahan iklim, peningkatan kesuburan tanah, serta pelestarian keanekaragaman hayati.

BAB 10
PENGENDALIAN HAMA DAN PENYAKIT BERBASIS EKOLOGI

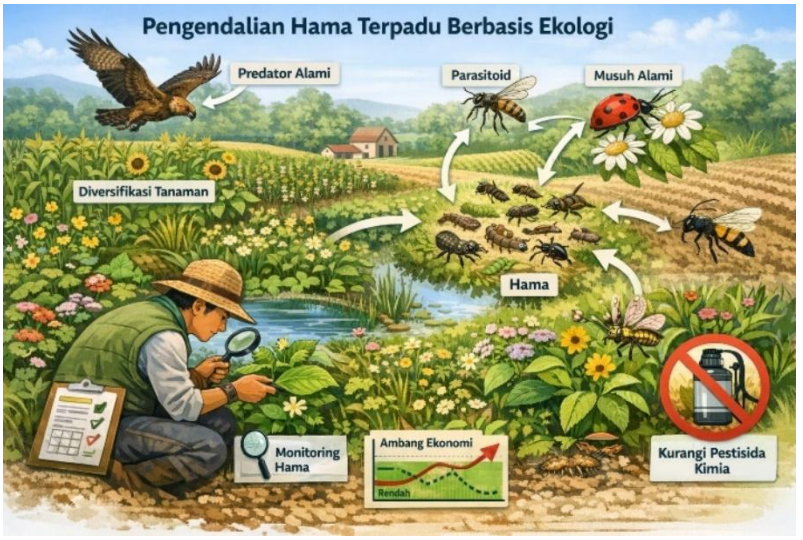
10.1 Konsep Pengendalian Hama Terpadu (PHT) dalam Agroekologi

Pengendalian Hama Terpadu (PHT) merupakan pendekatan pengelolaan organisme pengganggu tanaman yang tidak diarahkan untuk memusnahkan seluruh populasi hama, melainkan untuk menjaga populasinya tetap berada pada tingkat yang tidak menimbulkan kerugian ekonomi. Dalam pengertian ini, hama dipandang sebagai bagian dari agroekosistem, sehingga tindakan pengendalian harus mempertimbangkan hubungan antara tanaman budidaya, organisme pengganggu, musuh alami, lingkungan fisik, dan praktik budidaya yang diterapkan. FAO menyatakan bahwa PHT adalah pendekatan berbasis ekosistem yang mengintegrasikan berbagai strategi dan praktik pengelolaan untuk menghasilkan tanaman yang sehat serta meminimalkan penggunaan pestisida (FAO, n.d.). Dengan demikian, PHT pada dasarnya tidak hanya berfokus pada organisme sasaran, tetapi juga pada stabilitas dan fungsi ekologis sistem pertanian secara keseluruhan.

Salah satu prinsip penting dalam PHT adalah bahwa keberadaan hama tidak selalu harus direspons dengan tindakan kimia. Keputusan pengendalian harus diawali oleh identifikasi organisme secara tepat, pemantauan populasi secara berkala, dan penetapan ambang tindakan. Menurut US EPA, program PHT yang efektif bertumpu pada empat langkah pokok, yaitu identifikasi dan pemantauan, penetapan ambang tindakan, pencegahan, serta pengendalian apabila memang diperlukan (US EPA, 2025). Prinsip ini penting karena dalam sistem agroekologi, keberadaan sejumlah hama pada tingkat tertentu masih dapat ditoleransi selama tidak menimbulkan gangguan nyata terhadap hasil, sementara musuh alami tetap dapat menjalankan fungsinya dalam menjaga keseimbangan populasi.

Dalam praktiknya, PHT berbasis agroekologi sangat menekankan aspek pencegahan. Pencegahan dilakukan dengan membangun sistem budidaya yang sehat, resilien, dan kurang menguntungkan bagi perkembangan hama. Pendekatan ini menempatkan kesehatan tanaman sebagai hasil dari interaksi yang seimbang antara tanah, air, nutrisi, mikroorganisme, dan keanekaragaman hayati di sekitar lahan. Karena itu, PHT dalam agroekologi tidak dapat dipahami hanya sebagai teknik pengendalian ketika serangan terjadi, melainkan sebagai strategi pengelolaan sistem yang menurunkan risiko serangan secara struktural. Dalam kerangka ini, pestisida sintetis tetap dapat digunakan, tetapi hanya sebagai pilihan terakhir, diterapkan secara selektif, dan diupayakan agar tidak mengganggu mekanisme pengendalian alami yang sudah ada (FAO, n.d.; US EPA, 2025).

Berdasarkan uraian tersebut, dapat dipahami bahwa PHT dalam agroekologi adalah pendekatan pengelolaan hama yang bertumpu pada pemahaman proses ekologis dalam sistem pertanian. Fokus utamanya bukan sekadar menekan hama dalam jangka pendek, tetapi membangun agroekosistem yang lebih seimbang, resilien, dan mampu mengandalkan jasa ekosistem seperti predasi, parasitasi, kompetisi, dan peningkatan kesehatan tanaman. Inilah yang membedakan PHT berbasis agroekologi dari pengendalian hama konvensional yang cenderung reaktif, sempit, dan sangat bergantung pada input eksternal, terutama pestisida sintetis (Ehler, 2006; FAO, n.d.).



Gambar 10.1: Pengendalian Hama Terpadu Berbasis Ekologi

10.2 Musuh Alami: Predator, Parasitoid, dan Patogen Serangga

Dalam pengendalian hama berbasis ekologi, musuh alami menempati posisi yang sangat penting karena berperan sebagai regulator biologis yang mampu menekan populasi hama secara alami di dalam agroekosistem. Bale, van Lenteren, dan Bigler (2008) menegaskan bahwa pengendalian hayati merupakan komponen utama dalam pendekatan sistem Pengendalian Hama Terpadu (PHT), karena bekerja dengan memanfaatkan organisme hidup untuk menurunkan kepadatan populasi organisme lain hingga berada pada tingkat yang tidak merugikan. Dalam konteks ini, musuh alami tidak dipahami sebagai unsur tambahan semata, melainkan sebagai bagian integral dari kestabilan ekosistem pertanian. Ketika habitat pertanian mampu mendukung keberadaan musuh alami, maka tekanan hama dapat ditekan tanpa ketergantungan berlebihan pada pestisida sintetis. FAO juga menekankan bahwa biodiversitas yang terstruktur dalam ekosistem pertanian berperan menjaga populasi hama tetap rendah, sedangkan penggunaan insektisida yang berlebihan justru dapat mengganggu stabilitas populasi musuh alami dan memicu resurjensi hama.

Secara umum, musuh alami serangga hama dapat dikelompokkan ke dalam tiga golongan besar, yaitu predator, parasitoid, dan patogen serangga. Predator adalah organisme yang hidup dengan menangkap dan memakan mangsa, dan selama hidupnya umumnya mampu membunuh banyak individu hama. Michigan State University Extension menjelaskan bahwa predator seperti kumbang koksi, laba-laba, dan belalang sembah termasuk musuh alami yang paling mudah dikenali karena memangsa banyak individu hama sepanjang hidupnya. Washington State University juga menerangkan bahwa predator umumnya berukuran lebih besar atau lebih kuat daripada mangsanya, serta dapat memakan atau mengisap cairan tubuh mangsa, sehingga satu individu predator dapat menekan banyak individu hama. Karakter ini membuat predator sangat penting terutama pada fase awal ledakan populasi hama, walaupun efektivitasnya sering dipengaruhi oleh ketersediaan mangsa dan kondisi habitat di lahan.

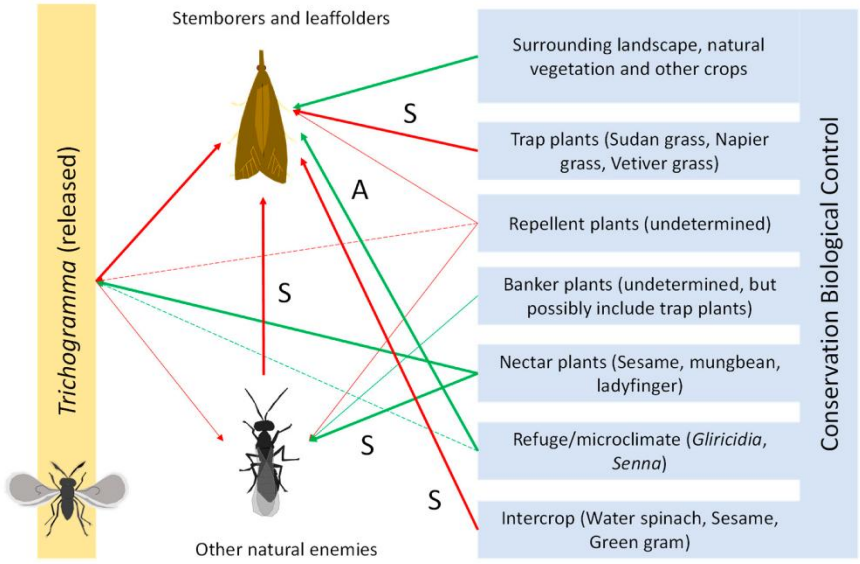
Berbeda dengan predator, parasitoid adalah serangga yang pada fase pradewasanya berkembang di dalam atau pada tubuh serangga inang, lalu akhirnya membunuh inang tersebut. University of Maryland Extension menjelaskan bahwa parasitoid berkembang baik secara endoparasitoid di dalam tubuh inang maupun sebagai

ektoparasitoid di permukaan tubuh inang, dan kelompok ini didominasi oleh Hymenoptera serta sebagian Diptera. Tidak seperti predator yang membunuh banyak mangsa, satu individu parasitoid biasanya hanya memerlukan satu inang untuk menyelesaikan perkembangannya. Namun demikian, efisiensi parasitoid sering kali sangat tinggi karena siklus hidupnya dekat dengan siklus hidup hama sasaran, kemampuannya menemukan inang sangat baik, dan banyak spesies memanfaatkan isyarat kimia dari tanaman atau inang untuk menemukan sasaran. Karena itu, meskipun ukurannya kecil dan sering tidak tampak di lapangan, parasitoid sering menjadi komponen yang sangat menentukan dalam menjaga populasi serangga hama tetap berada di bawah ambang merugikan.

Kelompok ketiga adalah patogen serangga atau entomopatogen, yaitu mikroorganisme yang menyebabkan penyakit pada serangga. Deka, Baruah, dan Babu (2021) menjelaskan bahwa entomopatogen meliputi jamur, bakteri, virus, protozoa, dan dalam banyak pembahasan modern juga nematoda entomopatogen sebagai agen hayati yang sangat penting dalam pengendalian hama. Patogen ini bekerja melalui mekanisme infeksi, proliferasi, dan kerusakan jaringan tubuh serangga, sehingga menyebabkan kematian atau melemahkan populasi hama. Dara, Montalva, dan Barta (2019) menunjukkan bahwa bakteri dan virus umumnya lebih efektif terhadap serangga dengan tipe mulut pengunyah, sedangkan jamur entomopatogen dapat bekerja pada lebih banyak kelompok serangga karena mampu menginfeksi melalui kutikula. Beberapa genus yang paling sering digunakan dalam praktik pengendalian hayati antara lain *Bacillus thuringiensis*, *Beauveria*, *Metarhizium*, dan kelompok baculovirus. Kelebihan kelompok ini adalah sifatnya yang relatif selektif, kompatibel dengan PHT, dan pada banyak kasus lebih aman bagi organisme bukan sasaran dibandingkan insektisida spektrum luas.

Dalam praktik PHT, pemanfaatan musuh alami dapat dilakukan melalui tiga pendekatan utama, yakni konservasi, augmentasi, dan introduksi atau pengendalian hayati klasik. Bale, van Lenteren, dan Bigler (2008) menjelaskan bahwa pengendalian hayati klasik dilakukan dengan memperkenalkan musuh alami untuk menekan hama eksotik secara jangka panjang; augmentasi dilakukan dengan pelepasan periodik musuh alami dalam jumlah tertentu; sedangkan konservasi diarahkan pada perlindungan dan penguatan populasi musuh alami yang telah ada di lahan. Di antara ketiganya, pendekatan konservasi sering paling relevan dalam agroekologi karena sejalan dengan prinsip memperkuat proses alami di dalam

sistem budidaya. Sharma, Sandhi, dan Reddy (2019) juga menegaskan bahwa pengelolaan biologis modern tidak berdiri sendiri, tetapi dapat dipadukan dengan semiokimia, pengelolaan habitat, dan taktik budidaya lain untuk meningkatkan efisiensi pencarian inang, penyebaran agen, dan kestabilan pengendalian. Hal ini menunjukkan bahwa musuh alami akan bekerja paling efektif bila ditempatkan dalam sistem pertanian yang dirancang secara ekologis, bukan dalam sistem yang terlalu bergantung pada intervensi kimia.



Gambar 10.2: Integrasi pengendalian hayati dengan semiokimia, manipulasi habitat, dan taktik budidaya dalam sistem PHT.

Meskipun demikian, pemanfaatan musuh alami juga memiliki keterbatasan. Predator dapat menurun efektivitasnya ketika populasi mangsa terlalu rendah atau habitat tidak mendukung. Parasitoid sangat spesifik dan kinerjanya dapat dipengaruhi oleh sinkronisasi fenologi dengan inang. Patogen serangga pun memerlukan kondisi lingkungan tertentu, seperti kelembapan yang memadai pada beberapa jamur entomopatogen, agar infeksi berlangsung optimal. Karena itu, keberhasilan penggunaan musuh alami tidak boleh dipahami sebagai hasil dari pelepasan agen semata, tetapi sebagai hasil dari pengelolaan agroekosistem secara menyeluruh. Dalam kerangka ini, musuh alami bekerja paling baik ketika dipadukan dengan monitoring lapangan, ambang tindakan, tanaman sehat, keragaman vegetasi, dan penggunaan pestisida selektif yang seminimal mungkin.

Dengan kata lain, musuh alami bukan pengganti tunggal semua metode pengendalian, melainkan pilar utama dalam sistem pengendalian hama dan penyakit berbasis ekologi yang berkelanjutan.

Tabel 10.1: Perbedaan predator, parasitoid, dan patogen serangga sebagai musuh alami

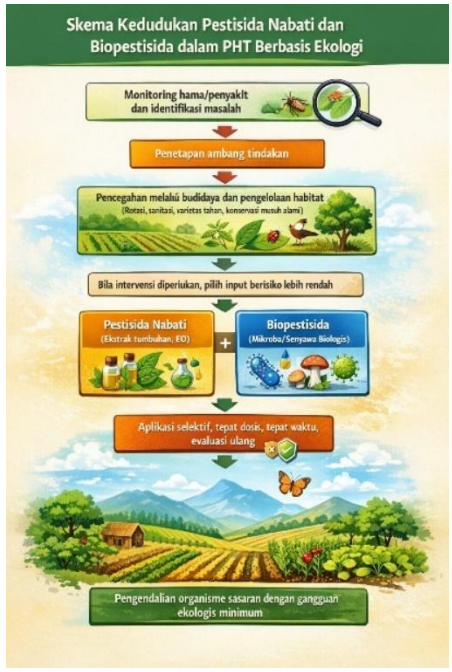
Kelompok musuh alami	Karakter utama	Cara kerja terhadap hama	Jumlah hama yang dapat ditekan oleh satu agen	Contoh umum	Peran dalam PHT berbasis ekologi
Predator	Organisme pemangsa yang aktif mencari dan memakan mangsa	Menangkap, memakan, atau mengisap cairan tubuh hama	Banyak individu selama hidupnya	Kumbang koksi, lacewing, laba-laba, belalang sembah	Menekan populasi hama secara langsung dan cepat, terutama bila habitat mendukung
Parasitoid	Serangga yang berkembang pada/di dalam tubuh inang dan akhirnya membunuhnya	Telur diletakkan pada/di dalam inang; larva berkembang dan membunuh inang	Umumnya satu inang per individu parasitoid	Tawon parasitoid, lalat tachinid	Sangat efektif, spesifik, dan penting untuk regulasi populasi jangka menengah
Patogen serangga	Mikroorganisme penyebab penyakit pada serangga	Menginfeksi tubuh serangga melalui mulut, kutikula, atau mekanisme lain	Dapat menimbulkan kematian pada banyak individu, bahkan epizootik	Bacillus thuringiensis, Beauveria bassiana, Metarhizium anisopliae, baculovirus	Cocok sebagai agen hayati selektif dan kompatibel dengan sistem PHT

10.3 Pestisida Nabati dan Biopestisida sebagai Alternatif Ramah Lingkungan

Pestisida nabati dan biopestisida semakin banyak dibahas dalam sistem pengendalian hama dan penyakit berbasis ekologi karena keduanya menawarkan pendekatan perlindungan tanaman yang lebih sejalan dengan prinsip keberlanjutan dibandingkan pestisida sintetis spektrum luas. Menurut US EPA (2025), biopestisida mencakup pestisida yang berasal dari bahan alam, mikroorganisme, atau senyawa biologis tertentu, dan secara umum dibedakan menjadi *microbial pesticides*, *biochemical pesticides*, dan *plant-incorporated protectants*. Dalam pengertian yang lebih khusus, pestisida nabati merujuk pada bahan pengendali

yang berasal dari tumbuhan, misalnya ekstrak tumbuhan, minyak atsiri, atau senyawa metabolit sekunder tanaman. Oleh karena itu, pestisida nabati dapat dipahami sebagai salah satu kelompok penting dalam spektrum biopestisida, walaupun dalam praktik ilmiah keduanya sering dibedakan agar pembahasan lebih jelas.

Dalam perspektif agroekologi, penggunaan pestisida nabati dan biopestisida tidak dimaksudkan sebagai pengganti tunggal seluruh komponen Pengendalian Hama Terpadu (PHT), melainkan sebagai bagian dari strategi perlindungan tanaman yang lebih selektif, adaptif, dan berisiko lebih rendah terhadap lingkungan. FAO (2018) menegaskan bahwa pengelolaan pestisida yang baik harus mendukung pengendalian yang efektif sekaligus meminimalkan dampak negatif terhadap kesehatan manusia dan lingkungan. Dengan demikian, dalam sistem pertanian berbasis ekologi, pestisida nabati dan biopestisida lebih tepat ditempatkan sebagai bagian dari pengelolaan terpadu yang mengutamakan pencegahan, monitoring, konservasi musuh alami, serta penggunaan input eksternal secara bijaksana.



Gambar 10.3: Skema kedudukan pestisida nabati dan biopestisida dalam PHT berbasis ekologi

Pestisida nabati bekerja melalui senyawa aktif alami yang diproduksi tumbuhan sebagai mekanisme pertahanan terhadap herbivora, patogen, atau tekanan lingkungan lainnya. Menurut Chafiki et al. (2026) dan Majeed et al. (2026), senyawa aktif dalam pestisida nabati dapat berupa alkaloid, terpenoid, fenolik, flavonoid, saponin, maupun minyak atsiri yang memiliki aktivitas sebagai repelan, antifeedant, racun kontak, racun perut, penghambat pertumbuhan, atau pengganggu oviposisi. Keunggulan utama kelompok ini terletak pada keragaman metabolit sekundernya, sehingga satu bahan nabati dapat bekerja melalui lebih dari satu mekanisme aksi. Sifat ini penting dalam konteks pengelolaan resistensi, walaupun efektivitasnya di lapangan tetap dipengaruhi oleh metode ekstraksi, formulasi, stabilitas bahan aktif, serta kondisi lingkungan saat aplikasi.

Sementara itu, biopestisida dalam arti yang lebih luas juga mencakup agen mikroba seperti bakteri, jamur, virus, protozoa, dan dalam banyak ulasan modern juga nematoda entomopatogen. Cai (2025) menjelaskan bahwa microbial biopesticides bekerja bukan hanya melalui toksisitas langsung, tetapi juga melalui infeksi, kolonisasi, produksi metabolit spesifik, kompetisi, atau gangguan fisiologis pada organisme sasaran. Dalam konteks perlindungan tanaman, kelompok ini sangat penting karena dapat diarahkan secara lebih spesifik pada target tertentu dan umumnya lebih kompatibel dengan prinsip pertanian berkelanjutan. Namun, Cai (2025) juga mengingatkan bahwa label "alami" tidak otomatis berarti tanpa risiko, sehingga keamanan, selektivitas, dan dampaknya terhadap organisme bukan sasaran tetap perlu diuji secara ilmiah.

Salah satu alasan utama pestisida nabati dan biopestisida dipandang lebih ramah lingkungan adalah karena keduanya cenderung lebih selektif dan dalam banyak kasus memiliki persistensi lingkungan yang lebih rendah dibandingkan pestisida sintetis konvensional. US EPA (2025) menyebutkan bahwa banyak biopestisida bekerja pada sasaran tertentu dan sering digunakan dalam jumlah yang relatif kecil, sehingga dapat membantu menekan residu serta mengurangi dampak non-target. Dalam sistem agroekologi, sifat selektif ini menjadi sangat penting karena memungkinkan pengendalian organisme pengganggu tanpa merusak keseluruhan komunitas hayati di lahan, terutama predator, parasitoid, dan mikroorganisme menguntungkan.

Meskipun demikian, Soares et al. (2026) menunjukkan bahwa beberapa pestisida botani tetap dapat menimbulkan efek terhadap organisme bukan sasaran apabila diaplikasikan dalam dosis, frekuensi, atau formulasi yang tidak tepat. Karena itu, istilah "ramah lingkungan" harus dipahami secara proporsional dan berbasis bukti, bukan sebagai asumsi mutlak.

Tabel 10.2: Perbandingan umum pestisida nabati dan biopestisida dalam pengendalian berbasis ekologi

Aspek	Pestisida nabati	Biopestisida mikroba/biologis
Sumber utama	Ekstrak tumbuhan, minyak atsiri, metabolit sekunder tanaman	Bakteri, jamur, virus, protozoa, nematoda, atau senyawa biologis tertentu
Mekanisme kerja utama	Repelan, antifeedant, racun kontak, racun perut, penghambat pertumbuhan	Infeksi, kolonisasi, produksi metabolit, kompetisi, induksi ketahanan
Spektrum sasaran	Dapat relatif luas atau semi-selektif	Umumnya lebih spesifik
Persistensi di lingkungan	Relatif singkat, mudah terdegradasi	Bervariasi, tergantung formulasi dan kondisi lingkungan
Kelebihan utama	Bahan baku terbarukan, cocok untuk PHT, residu cenderung lebih rendah	Selektif, kompatibel dengan pengendalian hayati, penting dalam pengendalian hama dan penyakit
Keterbatasan utama	Stabilitas rendah, mutu bahan baku bisa bervariasi	Sensitif terhadap suhu, kelembapan, UV, dan mutu formulasi
Posisi dalam agroekologi	Alternatif input ramah lingkungan bila digunakan selektif	Instrumen biologis penting dalam sistem regulasi ekologis

10.4 Manipulasi Habitat untuk Menekan Populasi Hama

Manipulasi habitat merupakan salah satu strategi penting dalam pengendalian hama berbasis ekologi karena bertujuan mengubah kondisi agroekosistem agar lebih menguntungkan bagi musuh alami dan kurang sesuai bagi perkembangan hama. Landis, Wratten, dan Gurr (2000) menjelaskan bahwa *habitat management* merupakan bentuk *conservation biological control* yang diarahkan untuk mendukung predator dan parasitoid melalui penyediaan sumber daya, tempat berlindung, lokasi reproduksi, dan habitat untuk bertahan hidup pada periode yang tidak menguntungkan. Dengan kata lain, manipulasi habitat tidak berfokus

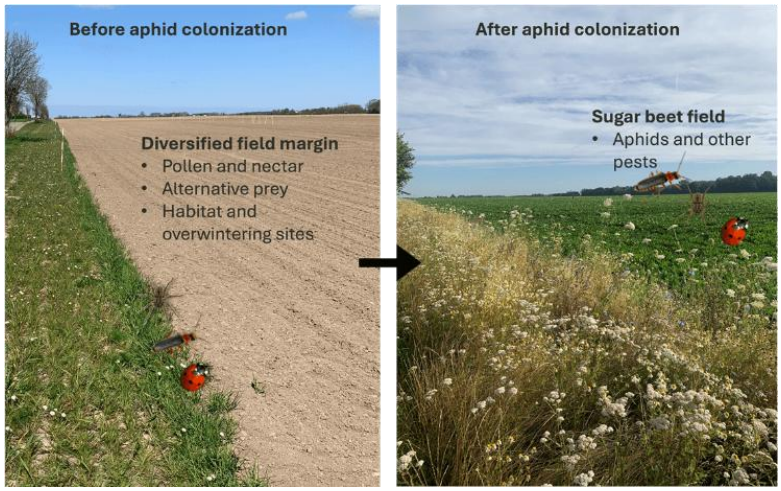
langsung pada pemusnahan hama, tetapi pada penguatan mekanisme regulasi alami dalam sistem pertanian. Pendekatan ini menjadi sangat relevan dalam agroekologi karena menempatkan desain agroekosistem sebagai fondasi utama pengendalian, bukan sekadar intervensi input eksternal.

Dalam agroekosistem yang sederhana dan homogen, populasi musuh alami sering tidak stabil karena ketersediaan pakan alternatif, nektar, serbuk sari, tempat berlindung, dan mikrohabitat sangat terbatas. Landis, Wratten, dan Gurr (2000) menunjukkan bahwa banyak sistem pertanian modern justru kurang ramah bagi musuh alami akibat tingginya gangguan budidaya, minimnya vegetasi non-tanaman utama, dan penggunaan pestisida yang berulang. Akibatnya, kolonisasi musuh alami ke dalam pertanaman sering terlambat atau jumlahnya tidak cukup untuk menahan peningkatan populasi hama. Dari sudut pandang teori ekologi, keadaan ini berkaitan dengan dua gagasan penting, yaitu *enemies hypothesis* dan *resource concentration hypothesis*. Ulasan Habitat Management for Pest Management menjelaskan bahwa keanekaragaman vegetasi dapat mendukung musuh alami melalui penyediaan sumber daya seperti *shelter, nectar, alternative food sources,* dan *pollen*, sekaligus mengurangi konsentrasi sumber daya yang memudahkan hama menemukan tanaman inangnya.

Secara praktis, manipulasi habitat dapat dilakukan melalui berbagai bentuk, seperti penanaman strip bunga, refugia, pagar hidup, tepian vegetasi berbunga, tanaman penutup tanah, tanaman sela, *beetle banks*, dan pengelolaan gulma non-invasif yang masih bermanfaat bagi serangga menguntungkan. Gurr et al. (2004/2005) dalam kerangka *ecological engineering for pest management* menekankan bahwa rekayasa habitat bertujuan menjadikan lahan pertanian lebih tidak ramah bagi hama, tetapi lebih ramah bagi musuh alami. Dalam kerangka ini, habitat dimanipulasi bukan secara acak, melainkan berdasarkan pemahaman ekologis tentang kebutuhan organisme menguntungkan, pergerakan antarhabitat, fenologi berbunga, dan sinkronisasi dengan dinamika populasi hama. Karena itu, manipulasi habitat harus dirancang secara fungsional, bukan sekadar menambah vegetasi di sekitar lahan.

Salah satu bentuk manipulasi habitat yang paling banyak diteliti adalah penggunaan *flower strips* atau strip bunga. Jachowicz et al. (2025) menunjukkan bahwa keberadaan strip bunga secara umum meningkatkan kelimpahan musuh alami sekitar 48%, dan efek tersebut cenderung lebih kuat ketika campuran spesies

tanaman bunganya lebih beragam. Hasil ini penting karena menunjukkan bahwa manfaat strip bunga tidak hanya bergantung pada ada atau tidaknya bunga, tetapi juga pada kualitas komposisi vegetasi dan kesinambungan sumber daya yang tersedia. Sejalan dengan itu, rujukan dari Crowther *et al*. (2023) menunjukkan bahwa tepian lahan berbunga memberikan manfaat yang lebih besar bagi komunitas musuh alami dan layanan pengendalian hayati dibandingkan tepian rumput tanpa bunga. Keberadaan tepian lahan berbunga juga berkaitan dengan penurunan jumlah hama herbivor dan kerusakan tanaman. Temuan-temuan ini memperkuat pandangan bahwa manipulasi habitat dapat berfungsi sebagai sarana intensifikasi ekologi yang nyata, bukan sekadar ornamen lanskap pertanian.



Gambar 10.4: Dinamika peran *flower strip* dalam mendukung musuh alami di lahan tanaman semusim.

Manipulasi habitat juga berkaitan erat dengan pengelolaan lanskap di sekitar pertanaman. Begg et al. (2017) menegaskan bahwa pengendalian hayati konservasi pada dasarnya sangat dipengaruhi oleh keberadaan vegetasi semi-alami di dalam dan sekitar lahan, karena elemen-elemen tersebut berfungsi sebagai sumber kolonisasi, tempat berlindung, dan penyedia pakan alternatif bagi musuh alami. Dengan demikian, efektivitas manipulasi habitat tidak hanya ditentukan oleh tindakan di dalam petak pertanian, tetapi juga oleh konektivitas dengan unsur lanskap lain seperti semak, tepian sungai, pagar hidup, kebun campuran, atau sisa habitat alami. Pada kondisi tertentu, lanskap yang terlalu sederhana dapat membatasi manfaat manipulasi habitat skala kecil, sedangkan lanskap yang lebih

kompleks dapat memperkuat efeknya. Hal inilah yang menyebabkan keberhasilan strategi habitat sering bergantung pada konteks ruang dan tata guna lahan setempat.



Gambar 10.5: Skema Manipulasi Habitat untuk Menekan Populasi Hama

Dari perspektif pengendalian hama dan penyakit berbasis ekologi, manipulasi habitat dapat dipahami sebagai strategi untuk memperkuat *self-regulation* agroekosistem. Ketika agroekosistem dirancang dengan menyediakan pakan, tempat berlindung, dan kesinambungan habitat bagi organisme menguntungkan, maka tekanan hama dapat ditekan melalui proses ekologis seperti predasi, parasitasi, kompetisi, dan gangguan perilaku pencarian inang. Oleh sebab itu, manipulasi habitat sejalan dengan prinsip dasar agroekologi, yaitu membangun sistem budidaya yang lebih resilien dan tidak semata-mata bergantung pada input kimia. Dengan tetap disertai monitoring, ambang tindakan, sanitasi budidaya, dan penggunaan pestisida selektif bila diperlukan, manipulasi habitat menjadi salah satu pilar penting dalam PHT berbasis ekologi yang berorientasi pada keberlanjutan jangka panjang.

Tabel 10.3: Bentuk manipulasi habitat dan fungsi ekologisnya dalam menekan populasi hama

Bentuk manipulasi habitat	Contoh penerapan	Fungsi ekologis utama	Dampak yang diharapkan
Strip bunga (*flower strips*)	Menanam campuran bunga berbunga berurutan di tepi atau sela lahan	Menyediakan nektar, serbuk sari, dan habitat bagi predator serta parasitoid	Kelimpahan musuh alami meningkat, layanan pengendalian hayati membaik
Tepian lahan berbunga	Mempertahankan vegetasi berbunga pada margin pertanaman	Menyediakan habitat semi-alami dan sumber pakan tambahan	Populasi musuh alami lebih stabil, jumlah hama dan kerusakan tanaman menurun
Tanaman refugia	Menanam tanaman tertentu yang mendukung serangga menguntungkan	Menjadi tempat berlindung, bertelur, dan sumber pakan alternatif	Musuh alami bertahan lebih lama di agroekosistem
Beetle banks	Guludan vegetasi rumput/perenial di tengah atau tepi lahan	Habitat overwintering dan perlindungan bagi kumbang tanah dan predator lain	Respon predator terhadap hama lebih cepat
Tanaman penutup tanah	Menanam cover crops di antara barisan tanaman utama	Menambah kompleksitas habitat dan menjaga mikroiklim	Menekan dominasi hama tertentu dan mendukung organisme menguntungkan
Pagar hidup/hedgerow	Menanam semak atau tanaman pagar di batas lahan	Koridor ekologis, tempat berlindung, dan sumber kolonisasi	Konektivitas habitat meningkat, konservasi musuh alami lebih baik
Tumpangsari/tanaman sela	Mengkombinasikan dua atau lebih jenis tanaman dalam satu lahan	Mengurangi konsentrasi sumber daya bagi hama dan menambah heterogenitas ruang	Serangan hama menurun, sistem lebih resilien

10.5 Resistensi Tanaman terhadap Hama dan Penyakit

Resistensi tanaman terhadap hama dan penyakit merupakan salah satu fondasi pengendalian berbasis ekologi karena bekerja dari dalam sistem tanaman itu sendiri, bukan semata-mata melalui intervensi eksternal setelah serangan terjadi. Dalam kerangka Pengendalian Hama Terpadu, FAO (n.d.) menempatkan penggunaan kultivar atau varietas tahan sebagai salah satu tindakan utama yang

perlu diprioritaskan bersama praktik budidaya dan pengelolaan ekosistem. Dengan demikian, resistensi tanaman dapat dipahami sebagai strategi preventif yang menurunkan peluang berkembangnya populasi hama dan patogen sejak awal, sekaligus mengurangi ketergantungan pada pestisida sintetis.

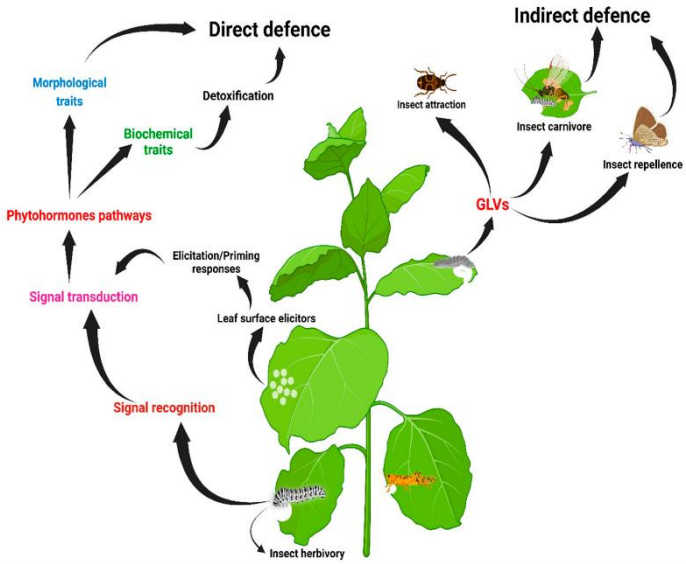
Pada hama serangga, konsep resistensi tanaman secara klasik dijelaskan melalui tiga mekanisme utama, yaitu antixenosis, antibiosis, dan toleransi. Kerangka ini berasal dari pemikiran klasik tentang *host plant resistance* dan sampai sekarang tetap digunakan dalam literatur modern. Ulasan Stenberg dan Muola (2017) menegaskan bahwa resistensi tanaman terhadap herbivora perlu dipahami bukan hanya dari sisi penurunan performa hama, tetapi juga dari sisi kemampuan tanaman mempertahankan hasil. Dalam pengertian ini, antixenosis merujuk pada sifat tanaman yang membuat hama enggan memilih, hinggap, makan, atau bertelur; antibiosis merujuk pada pengaruh negatif tanaman terhadap pertumbuhan, perkembangan, kelangsungan hidup, atau reproduksi hama; sedangkan toleransi menunjukkan kemampuan tanaman untuk tetap tumbuh dan berproduksi walaupun mengalami kerusakan akibat herbivori.

Di antara ketiga mekanisme tersebut, toleransi memiliki kedudukan yang khas. Koch et al. (2016) menjelaskan bahwa tanaman toleran tidak harus menekan populasi serangga secara langsung, tetapi mampu mengompensasi kerusakan melalui pemulihan fisiologis, pertumbuhan ulang, atau alokasi sumber daya yang lebih efisien. Karena toleransi tidak selalu menurunkan kebugaran hama secara langsung, tekanan seleksi terhadap hama untuk beradaptasi juga dapat lebih rendah dibandingkan pada resistensi yang sangat kuat dan spesifik. Oleh karena itu, toleransi sering dipandang menjanjikan dalam sistem pengelolaan berkelanjutan, khususnya untuk hama bertipe pengisap seperti Hemiptera.

Dalam sistem PHT berbasis ekologi, resistensi tanaman memiliki keunggulan karena kompatibel dengan komponen pengendalian lain. Stenberg (2017) menegaskan bahwa resistensi tanaman merupakan salah satu elemen yang paling sentral dalam kerangka konseptual IPM, sebab hampir semua interaksi dalam IPM—baik dengan pengendalian hayati, praktik budidaya, maupun penggunaan pestisida—dipengaruhi oleh tingkat resistensi tanaman. Namun, hubungan ini tidak selalu sederhana. Bukti terbaru menunjukkan bahwa resistensi tanaman juga dapat memengaruhi kualitas herbivora sebagai mangsa bagi predator dan parasitoid, sehingga integrasinya dengan pengendalian hayati perlu dipahami secara hati-hati.

Dengan kata lain, varietas tahan ideal bukan hanya mampu menekan hama atau penyakit, tetapi juga tetap kompatibel dengan musuh alami dan komponen agroekosistem lainnya.

Meski demikian, resistensi tanaman bukan tanpa keterbatasan. Resistensi yang terlalu sempit dapat dipatahkan oleh munculnya biotipe hama atau ras patogen baru. Smith dan Clement (2012) menunjukkan bahwa perkembangan pemetaan genetik dan penanda molekuler telah membantu identifikasi banyak lokus ketahanan, tetapi penggunaan gen ketahanan secara tunggal tetap berisiko bila tidak diimbangi strategi pengelolaan lainnya. Karena itu, pendekatan seperti *gene pyramiding*, penggabungan resistensi kuantitatif dengan gen mayor, rotasi varietas, serta integrasi dengan budidaya sehat dan konservasi musuh alami menjadi penting agar efektivitas resistensi dapat dipertahankan lebih lama.



Gambar 10.6: Skema mekanisme biologis resistensi tanaman terhadap artropoda, yang melibatkan pertahanan konstitutif dan pertahanan terinduksi setelah serangan

Dengan demikian, resistensi tanaman terhadap hama dan penyakit dapat dipahami sebagai bentuk perlindungan inheren yang sangat strategis dalam pengendalian berbasis ekologi. Resistensi ini dapat bekerja melalui penolakan terhadap hama, penekanan performa organisme pengganggu, kemampuan tanaman menoleransi kerusakan, atau pengurangan kerentanan terhadap infeksi patogen. Nilai

ekologisnya terletak pada kemampuannya menekan kebutuhan intervensi kimia, mendukung sistem budidaya yang lebih stabil, dan menjadi dasar bagi integrasi taktik-taktik lain dalam PHT. Karena itu, dalam agroekologi, resistensi tanaman sebaiknya tidak dipandang sebagai solusi tunggal, melainkan sebagai pilar utama yang perlu dipadukan dengan manipulasi habitat, pengendalian hayati, sanitasi budidaya, dan monitoring lapangan secara berkelanjutan.

Tabel 10.4: Jenis resistensi tanaman terhadap hama dan penyakit serta perannya dalam PHT berbasis ekologi

Jenis resistensi	Sasaran utama	Karakter utama	Dampak terhadap organisme pengganggu	Peran dalam PHT berbasis ekologi
Antixenosis	Hama serangga/herbivora	Tanaman kurang disukai untuk makan, hinggap, atau oviposisi	Mengurangi kolonisasi dan preferensi hama	Cocok sebagai pencegahan awal; dapat menurunkan tekanan serangan sejak fase awal
Antibiosis	Hama serangga/herbivora	Tanaman memengaruhi fisiologi, pertumbuhan, kelangsungan hidup, atau reproduksi hama	Menurunkan performa dan populasi hama	Efektif menekan ledakan populasi, tetapi perlu diwaspadai potensi adaptasi hama
Toleransi	Hama serangga/herbivora	Tanaman tetap mampu tumbuh/berproduksi walau diserang	Tidak selalu menurunkan populasi hama, tetapi menurunkan kerugian hasil	Sangat berguna untuk keberlanjutan; dapat memberi tekanan seleksi lebih rendah pada hama
Resistensi kualitatif	Patogen	Umumnya dikendalikan gen mayor; sering sangat kuat dan spesifik	Dapat mencegah infeksi atau memicu respons kuat	Cepat efektif, tetapi berisiko dipatahkan bila terlalu spesifik
Resistensi kuantitatif	Patogen	Dikendalikan banyak gen; perlindungan parsial namun stabil	Menurunkan intensitas penyakit dan laju epidemi	Sering lebih tahan lama dan cocok untuk strategi jangka panjang
Nonhost resistance	Patogen	Spesies tanaman bukan inang bagi patogen tertentu	Infeksi gagal atau sangat terbatas	Sumber konsep dan gen penting untuk pemuliaan tahan penyakit

BAB 11
PERUBAHAN IKLIM DAN ADAPTASI PERTANIAN

11.1 Dampak Perubahan Iklim terhadap Sistem Pertanian Global

Perubahan iklim mengacu pada perubahan kondisi iklim yang berlangsung dalam jangka waktu panjang, yang ditandai oleh kecenderungan peningkatan suhu global, perubahan pola presipitasi, serta meningkatnya kejadian cuaca ekstrem di berbagai wilayah. Perubahan tersebut memberikan dampak luas terhadap berbagai sektor kehidupan, termasuk sektor pertanian yang sangat bergantung pada kondisi lingkungan dan iklim (FAO, 2021; IPCC, 2021).

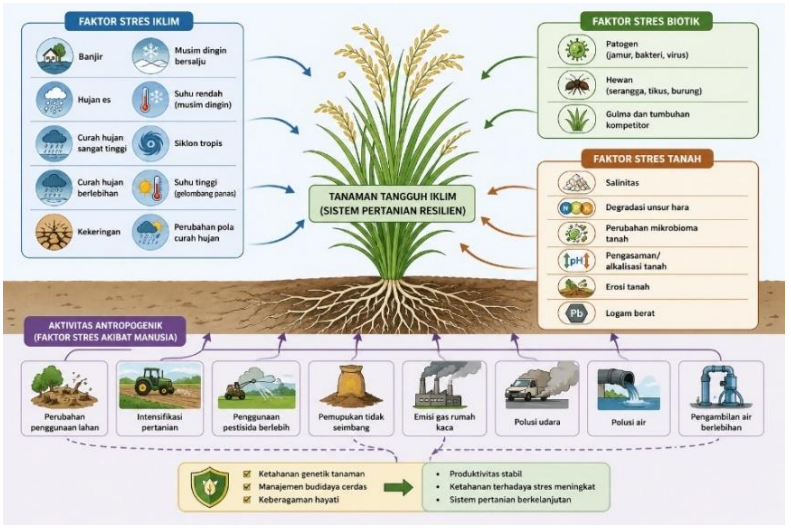
Seiring dengan meningkatnya suhu global sejak masa pra-industri, berbagai perubahan telah terjadi pada sistem biofisik dan sosial ekonomi pertanian. Dampak perubahan iklim tidak berlangsung secara tunggal, melainkan merupakan hasil interaksi berbagai faktor seperti kondisi tanah, organisme hidup, ketersediaan air, serta aktivitas manusia yang memengaruhi ketahanan tanaman terhadap tekanan lingkungan (IPCC, 2022). Kombinasi faktor-faktor tersebut menentukan kemampuan sistem pertanian dalam mempertahankan produktivitas di tengah kondisi iklim yang semakin dinamis. Dampak perubahan iklim terhadap sistem pertanian dapat dikelompokkan ke dalam beberapa aspek utama sebagai berikut.

1. **Penurunan Produktivitas Tanaman dan Stabilitas Sistem Pangan**

   Peningkatan suhu yang melampaui kisaran optimal pertumbuhan tanaman dapat mengganggu proses fisiologis, termasuk fotosintesis dan pembentukan biomassa. Kondisi tersebut dapat mempercepat siklus pertumbuhan tanaman sehingga fase pengisian biji menjadi lebih singkat dan berdampak pada penurunan hasil panen (Ortiz-Bobea *et al*., 2021; IPCC, 2022). Walaupun peningkatan konsentrasi karbon dioksida berpotensi meningkatkan aktivitas

fotosintesis, manfaat tersebut sering tidak maksimal karena keterbatasan ketersediaan air dan unsur hara di dalam tanah (Ainsworth & Long, 2021).

Penurunan produksi di wilayah sentra pertanian berpotensi memengaruhi stabilitas pasokan pangan dan menyebabkan fluktuasi harga di pasar global. Kondisi ini berisiko meningkatkan tingkat kerawanan pangan, terutama pada negara yang memiliki ketergantungan tinggi terhadap impor bahan pangan (FAO *et al*., 2023).



Gambar 11.1: Interaksi berbagai faktor stres (iklim, biotik, tanah, dan antropogenik) terhadap sistem pertanian dalam konteks perubahan iklim yang menentukan ketahanan tanaman (*climate-resilient crops*)

2. Perubahan Pola Musim Tanam

Perubahan distribusi curah hujan menyebabkan ketidakpastian dalam penentuan kalender tanam, terutama pada sistem pertanian tropis yang bergantung pada hujan. Ketidaksesuaian antara kebutuhan air tanaman dan ketersediaan air di lapangan dapat meningkatkan risiko gagal panen (FAO, 2021; IPCC, 2022).

Selain itu, perubahan waktu awal dan lamanya musim tanam dapat mengganggu kesesuaian antara fase pertumbuhan tanaman dan kondisi lingkungan yang optimal. Kondisi ini dapat menurunkan efisiensi pemanfaatan air dan nutrisi oleh tanaman (Mbow *et al*., 2019).

3. Meningkatnya Kejadian Iklim Ekstrem

Frekuensi kejadian iklim ekstrem seperti kekeringan dan banjir terus meningkat seiring perubahan iklim. Kekeringan berkepanjangan dapat menurunkan ketersediaan air, sedangkan curah hujan yang sangat tinggi dapat menyebabkan genangan serta erosi tanah yang merusak sistem perakaran tanaman (FAO, 2021; IPCC, 2022).

4. Peningkatan Serangan Hama dan Penyakit

Perubahan suhu dan kelembaban lingkungan berpengaruh terhadap dinamika organisme pengganggu tanaman. Peningkatan suhu dapat mempercepat siklus hidup hama dan memperluas wilayah penyebarannya ke daerah baru (Raza *et al*., 2019; IPCC, 2022). Selain itu, perubahan iklim dapat mengganggu keseimbangan ekosistem alami sehingga efektivitas musuh alami dalam mengendalikan hama menurun. Kondisi ini berpotensi meningkatkan penggunaan pestisida dan biaya produksi pertanian (FAO, 2021).

5. Degradasi Sumber Daya Alam

Perubahan iklim juga mempercepat degradasi sumber daya alam, terutama tanah dan air. Intensitas hujan yang tinggi meningkatkan risiko erosi tanah, sedangkan periode kekeringan yang panjang dapat menurunkan kandungan bahan organik tanah serta ketersediaan air irigasi (FAO, 2021; IPCC, 2022). Ringkasan dampak perubahan iklim terhadap sistem pertanian disajikan pada Tabel 11.1.

Tabel 11.1: Dampak Perubahan Iklim pada Sistem Pertanian Global

Aspek	Dampak Utama	Konsekuensi
Produksi	Penurunan hasil	Ketahanan pangan terganggu
Tanah	Degradasi	Penurunan produktivitas
Air	Variabilitas	Risiko gagal panen
Ekologi	Hama meningkat	Kerugian ekonomi
Ekonomi	Harga fluktuatif	Ketidakstabilan pasar

Secara keseluruhan, perubahan iklim memengaruhi seluruh rantai sistem pangan, mulai dari produksi hingga distribusi. Oleh karena itu, pengembangan strategi adaptasi dan mitigasi menjadi langkah penting untuk menjaga keberlanjutan sistem pertanian dan ketahanan pangan dalam jangka panjang (IPCC, 2022; FAO *et al*., 2023). Upaya membangun sistem pangan yang

berkelanjutan juga menjadi prioritas global dalam menghadapi peningkatan kebutuhan pangan dunia (WRI, 2019).

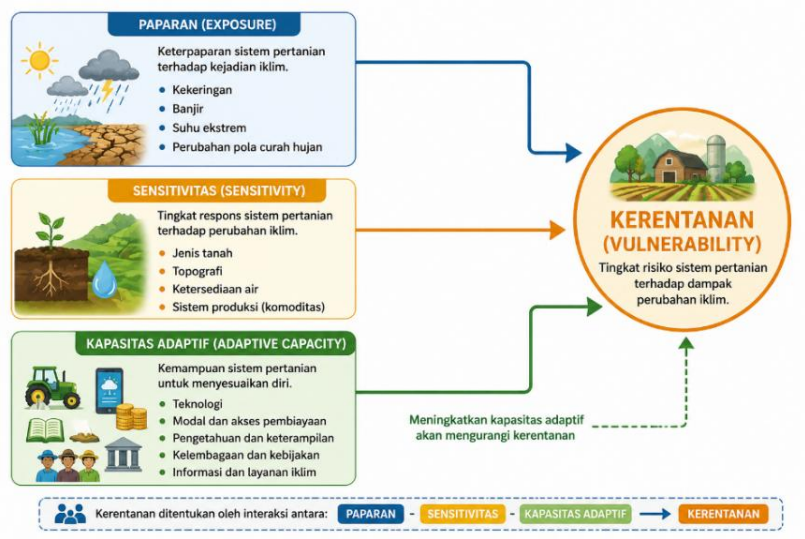
11.2 Kerentanan Sektor Pertanian terhadap Anomali Cuaca

Tingkat kerentanan dalam sektor pertanian menjadi indikator utama dalam menilai besarnya risiko yang ditimbulkan oleh variabilitas iklim dan kejadian cuaca yang tidak normal. Sektor pertanian termasuk salah satu sektor yang paling sensitif terhadap fenomena iklim seperti El Niño dan La Niña, yang menyebabkan penyimpangan pola curah hujan dan suhu dari kondisi normal (FAO, 2021; IPCC, 2022). Dampak fenomena tersebut sangat terasa di wilayah tropis yang sebagian besar sistem pertaniannya bergantung pada pola hujan musiman.

Kerentanan tidak hanya ditentukan oleh besarnya gangguan iklim, tetapi juga oleh kondisi biofisik, sosial-ekonomi, dan kelembagaan yang memengaruhi kemampuan sistem pertanian dalam merespons perubahan lingkungan. Dampaknya tidak hanya terlihat pada penurunan produksi, tetapi juga pada berkurangnya pendapatan petani serta terganggunya stabilitas sistem pangan (Rosenzweig *et al*., 2020; FAO *et al*., 2023).

11.2.1 Kerangka Konseptual Kerentanan

Menurut kerangka yang dikembangkan oleh IPCC, kerentanan (*vulnerability*) dalam sistem pertanian tidak ditentukan oleh satu faktor tunggal, tetapi merupakan hasil interaksi dari tiga komponen utama, yaitu paparan (*exposure*), sensitivitas (*sensitivity*), dan kapasitas adaptif (*adaptive capacity*). Ketiga komponen tersebut saling berkaitan dalam menentukan sejauh mana suatu sistem mampu menghadapi tekanan akibat perubahan iklim (IPCC, 2022).



Gambar 11.2: Kerangka kerentanan menurut IPCC yang menunjukkan interaksi antara paparan (*exposure*), sensitivitas (*sensitivity*), dan kapasitas adaptif (*adaptive capacity*) dalam menentukan tingkat kerentanan sistem pertanian terhadap perubahan iklim.

Paparan menggambarkan tingkat keterlibatan suatu sistem terhadap kejadian iklim yang merugikan, seperti kekeringan berkepanjangan, banjir, atau perubahan pola curah hujan yang ekstrem. Semakin tinggi intensitas dan frekuensi kejadian tersebut, maka semakin besar tingkat paparan yang dialami oleh sistem pertanian.

Sensitivitas menunjukkan tingkat respons sistem pertanian terhadap perubahan kondisi lingkungan. Sistem yang memiliki tingkat sensitivitas tinggi cenderung mengalami gangguan produksi yang lebih besar ketika terjadi perubahan iklim. Sebagai contoh, tanaman yang sangat bergantung pada ketersediaan air akan lebih rentan terhadap kekeringan dibandingkan tanaman yang memiliki toleransi terhadap kondisi kekurangan air.

Kapasitas adaptif mengacu pada kemampuan sistem pertanian maupun petani dalam melakukan penyesuaian terhadap perubahan lingkungan yang terjadi. Kemampuan ini dapat ditingkatkan melalui pemanfaatan teknologi budidaya yang tepat, peningkatan akses terhadap informasi iklim, serta dukungan kelembagaan yang memadai. Sistem dengan kapasitas adaptif yang baik umumnya mampu

mengurangi dampak negatif perubahan iklim dan mempertahankan stabilitas produksi.

Secara umum, sistem pertanian dengan tingkat paparan dan sensitivitas yang tinggi, namun memiliki kapasitas adaptif yang rendah, akan menunjukkan tingkat kerentanan yang lebih besar. Sebaliknya, peningkatan kapasitas adaptif dapat menurunkan tingkat kerentanan meskipun sistem tersebut menghadapi tekanan iklim yang cukup tinggi (FAO, 2021; IPCC, 2022).

11.2.2 Faktor Penentu Kerentanan

Kerentanan sektor pertanian merupakan hasil interaksi berbagai faktor yang memengaruhi sensitivitas dan kapasitas adaptif sistem pertanian. Faktor-faktor tersebut meliputi aspek biofisik, sosial-ekonomi, dan kelembagaan (IPCC, 2022). Ringkasan faktor penentu kerentanan disajikan pada Tabel 11.2.

Tabel 11.2: Faktor Penentu dan Perannya dalam Kerentanan Iklim

Faktor	Komponen	Peran dalam Kerentanan	Dampak
Biofisik	Tanah, topografi, air	Sensitivitas	Risiko produksi
Sosial-ekonomi	Teknologi, modal, pendidikan	Kapasitas adaptif	Kemampuan respon
Kelembagaan	Kebijakan, penyuluhan	Dukungan sistem	Efektivitas adaptasi

1. **Faktor Biofisik**

   Faktor biofisik mencakup kondisi tanah, topografi, dan ketersediaan air yang secara langsung memengaruhi sensitivitas sistem pertanian terhadap perubahan iklim. Tanah dengan kemampuan menyimpan air yang rendah lebih rentan terhadap kekeringan, sedangkan lahan dengan kemiringan tinggi lebih mudah mengalami erosi. Selain itu, sistem pertanian tadah hujan umumnya lebih sensitif terhadap variabilitas iklim dibandingkan sistem pertanian beririgasi (FAO, 2021; IPCC, 2022).

2. **Faktor Sosial-Ekonomi**

   Faktor sosial-ekonomi berkaitan erat dengan kapasitas adaptif petani dalam menghadapi perubahan iklim. Faktor ini meliputi akses terhadap teknologi, ketersediaan modal, serta tingkat pendidikan. Akses terhadap teknologi dan

informasi iklim membantu petani menyesuaikan praktik budidaya, sedangkan ketersediaan modal memungkinkan adopsi inovasi yang dapat mengurangi risiko produksi (Rosenzweig *et al*., 2020).

11.2.3 Faktor Kelembagaan

Faktor kelembagaan mencakup kebijakan pemerintah, sistem penyuluhan, dan kelembagaan lokal yang mendukung pelaksanaan strategi adaptasi (IPCC, 2022). Kebijakan pemerintah berperan dalam menyediakan infrastruktur dan insentif yang mendukung usaha pertanian. Sistem penyuluhan membantu mempercepat penyebaran teknologi dan informasi kepada petani. Selain itu, kelembagaan lokal seperti kelompok tani berperan dalam meningkatkan kerja sama serta akses terhadap sumber daya, sehingga memperkuat ketahanan sistem pertanian (FAO, 2021).

Secara keseluruhan, kerentanan sektor pertanian merupakan hasil interaksi antara faktor biofisik, sosial-ekonomi, dan kelembagaan. Dukungan teknologi, kebijakan yang tepat, serta kelembagaan yang kuat berperan penting dalam meningkatkan kapasitas adaptif dan mengurangi risiko kerentanan terhadap anomali cuaca (FAO, 2021; IPCC, 2022).

11.3 Strategi Adaptasi Pertanian di Wilayah Tropis

Adaptasi pertanian merupakan upaya sistematis untuk menyesuaikan praktik budidaya dan pengelolaan sumber daya terhadap perubahan iklim, sehingga stabilitas produksi dan keberlanjutan sistem pertanian tetap terjaga (FAO, 2021; IPCC, 2022). Di wilayah tropis, strategi adaptasi menjadi sangat penting karena variabilitas curah hujan yang tinggi serta dominasi sistem pertanian berbasis hujan (*rainfed agriculture*).

Wilayah tropis menghadapi ketidakpastian musim tanam serta peningkatan kejadian iklim ekstrem. Oleh karena itu, strategi adaptasi perlu dirancang secara fleksibel, berbasis ekosistem, dan disesuaikan dengan kondisi lokal (*location-specific*) agar dapat diterapkan secara efektif (Rosenzweig *et al*., 2020).

11.3.1 Pendekatan Agroekologi

Pendekatan agroekologi berfokus pada pemanfaatan mekanisme ekologi yang terjadi secara alami untuk menjaga kestabilan produksi sekaligus menekan ketergantungan terhadap penggunaan input dari luar sistem. Pendekatan ini

membantu meningkatkan ketahanan sistem pertanian melalui perbaikan kesuburan tanah, efisiensi penggunaan sumber daya, serta peningkatan stabilitas ekosistem (van Noordwijk *et al*., 2021). Selain itu, intensifikasi berkelanjutan menjadi bagian penting dalam meningkatkan efisiensi produksi tanpa meningkatkan tekanan terhadap lingkungan (Reich *et al*., 2021; Shrestha *et al*., 2021). Prinsip utama agroekologi dalam mendukung adaptasi meliputi:

- Diversifikasi biologis, untuk mengurangi risiko kegagalan panen
- Efisiensi penggunaan sumber daya, terutama air dan nutrisi
- Penguatan interaksi ekologis antara tanah, tanaman, dan organisme lain
- Peningkatan resiliensi ekosistem, terhadap gangguan lingkungan (FAO, 2021).

Sistem pertanian yang menerapkan prinsip agroekologi umumnya lebih stabil terhadap variabilitas iklim dibandingkan sistem monokultur intensif (van Noordwijk et al., 2021).

11.3.2 Strategi Adaptasi Utama

Strategi adaptasi pada tingkat usaha tani bertujuan meningkatkan stabilitas produksi sekaligus mengurangi risiko kerugian akibat perubahan iklim (IPCC, 2022). Strategi tersebut umumnya diterapkan melalui diversifikasi tanaman, penggunaan varietas tahan cekaman, pengelolaan air, serta penerapan sistem agroforestri.

1. Diversifikasi Tanaman

Diversifikasi tanaman dilakukan melalui sistem polikultur, tumpangsari, dan rotasi tanaman untuk menyebarkan risiko produksi akibat variabilitas iklim. Sistem dengan tingkat keragaman tanaman yang tinggi cenderung lebih stabil, mampu menekan serangan hama, serta meningkatkan efisiensi pemanfaatan sumber daya (Rosenzweig *et al*., 2020; FAO, 2021).

2. Penggunaan Varietas Tahan Cekaman

Penggunaan varietas tahan cekaman bertujuan meningkatkan ketahanan tanaman terhadap kondisi ekstrem seperti kekeringan, genangan, dan suhu tinggi. Varietas tersebut umumnya memiliki karakter fisiologis yang

mendukung efisiensi penggunaan air serta kemampuan bertahan pada kondisi lingkungan yang kurang menguntungkan (IPCC, 2022).

3. Pengelolaan Air

Pengelolaan air merupakan strategi penting dalam sistem pertanian tropis karena air sering menjadi faktor pembatas utama. Tujuan utama pengelolaan air adalah memastikan ketersediaan air selama periode kering serta mengurangi kehilangan air akibat evaporasi dan limpasan (IPCC, 2022).

Beberapa teknik yang umum diterapkan meliputi:

- Panen air hujan (*rainwater harvesting*)
- Irigasi efisien seperti irigasi tetes
- Pembangunan embung dan reservoir
- Metode *alternate wetting and drying* (awd) pada budidaya padi

Teknik tersebut terbukti mampu meningkatkan efisiensi penggunaan air serta mengurangi risiko kekeringan dalam sistem pertanian tropis (FAO, 2021).

4. Agroforestri

Agroforestri merupakan sistem integrasi antara pohon dan tanaman pertanian dalam satu lahan. Sistem ini mampu meningkatkan stabilitas mikroklimat, memperbaiki kualitas tanah, serta mengurangi risiko erosi. Selain manfaat ekologis, agroforestri juga memberikan keuntungan ekonomi melalui diversifikasi produk pertanian (van Noordwijk *et al*., 2021).

11.3.3 Adaptasi Berbasis Pengetahuan Lokal

Pengetahuan lokal menjadi komponen penting dalam strategi adaptasi di wilayah tropis karena berkembang dari pengalaman masyarakat dalam memahami kondisi lingkungan setempat. Praktik seperti penggunaan kalender tanam tradisional dan pemanfaatan indikator alam membantu petani menyesuaikan aktivitas budidaya terhadap perubahan iklim lokal (FAO, 2021).

ntegrasi antara pengetahuan lokal dan teknologi modern melalui pendekatan *co-production of knowledge* dapat meningkatkan efektivitas strategi adaptasi serta memperkuat ketahanan sistem pertanian (Rosenzweig *et al*., 2020).

Strategi adaptasi pertanian di wilayah tropis perlu mengintegrasikan berbagai pendekatan, termasuk diversifikasi sistem, pengelolaan sumber daya air, inovasi teknologi, serta pemanfaatan pengetahuan lokal. Pendekatan berbasis agroekologi yang disesuaikan dengan kondisi lokal menjadi kunci dalam meningkatkan ketahanan sistem pertanian terhadap perubahan iklim (FAO, 2021; IPCC, 2022).

11.4 Pertanian Cerdas Iklim (*Climate-Smart Agriculture*)

Climate-Smart Agriculture (CSA) merupakan kerangka pengelolaan pertanian yang dirancang untuk merespons tekanan perubahan iklim melalui penerapan praktik budidaya yang adaptif, efisien, dan berkelanjutan. Pendekatan ini bertujuan meningkatkan produktivitas secara berkelanjutan, memperkuat kemampuan sistem pertanian dalam menyesuaikan diri terhadap perubahan kondisi lingkungan, serta mengurangi kontribusi sektor pertanian terhadap emisi gas rumah kaca. Konsep CSA dikembangkan sebagai respons terhadap meningkatnya tekanan iklim global yang memengaruhi stabilitas produksi pangan dan keberlanjutan sumber daya alam (FAO, 2018; IPCC, 2022).

Dalam implementasinya, CSA menekankan pentingnya integrasi berbagai strategi pengelolaan lahan, air, tanaman, dan sumber daya lainnya secara simultan. Pendekatan ini tidak hanya berfokus pada peningkatan hasil produksi, tetapi juga pada penguatan ketahanan sistem pertanian terhadap gangguan iklim serta perlindungan terhadap lingkungan. Dengan demikian, CSA berperan sebagai kerangka kerja yang menghubungkan aspek produksi, adaptasi, dan mitigasi dalam satu sistem yang saling mendukung (Lipper *et al*., 2018; FAO, 2021).

11.4.1 Tiga Pilar Utama *Climate-Smart Agriculture*

Pendekatan *Climate-Smart Agriculture* dibangun atas tiga komponen utama yang saling berkaitan dan tidak dapat dipisahkan dalam upaya mewujudkan sistem pertanian berkelanjutan. Ketiga komponen tersebut meliputi adaptasi terhadap perubahan iklim, mitigasi emisi gas rumah kaca, serta penguatan ketahanan pangan (Gambar 11.3).

1. Adaptasi terhadap Perubahan Iklim

Komponen adaptasi bertujuan meningkatkan kemampuan sistem pertanian dalam menghadapi perubahan kondisi iklim yang tidak menentu. Upaya adaptasi dilakukan dengan menyesuaikan praktik budidaya agar tetap sesuai dengan kondisi lingkungan yang berubah. Contohnya meliputi pemilihan varietas tanaman yang lebih toleran terhadap kekeringan atau genangan, penyesuaian waktu tanam sesuai pola curah hujan terbaru, serta penerapan sistem budidaya yang mampu mengurangi risiko kegagalan panen. Melalui strategi tersebut, stabilitas produksi dapat tetap terjaga meskipun terjadi perubahan iklim yang signifikan.

2. Mitigasi Emisi Gas Rumah Kaca

Komponen mitigasi menitikberatkan pada upaya pengurangan emisi gas rumah kaca yang dihasilkan dari aktivitas pertanian. Langkah-langkah mitigasi dapat dilakukan melalui penggunaan pupuk yang lebih efisien, pengelolaan air sawah yang tepat, serta penerapan sistem pertanian berbasis pohon seperti agroforestri yang mampu meningkatkan kapasitas penyerapan karbon. Pendekatan ini bertujuan mengurangi dampak negatif terhadap lingkungan tanpa menghambat peningkatan produksi pertanian.

3. Peningkatan Ketahanan Pangan

Komponen ketahanan pangan berfokus pada upaya memastikan ketersediaan pangan yang cukup, stabil, dan mudah diakses oleh masyarakat. Upaya ini dilakukan melalui peningkatan produktivitas lahan, diversifikasi sumber pangan, serta penguatan sistem distribusi yang efisien (FAO, 2021; IPCC, 2022; FAO *et al.*, 2023).



Gambar 11.3: Konsep *Climate-Smart Agriculture* (CSA) yang mengintegrasikan adaptasi, mitigasi, dan ketahanan pangan

11.4.2 Integrasi Tiga Pilar dalam *Climate-Smart Agriculture*

Keunggulan utama CSA terletak pada kemampuannya mengintegrasikan adaptasi, mitigasi, dan ketahanan pangan dalam satu kerangka kerja yang terpadu. Pendekatan ini mendorong terciptanya co-benefits, yaitu peningkatan produksi yang diikuti oleh pengurangan emisi serta peningkatan ketahanan sistem pertanian (Lipper *et al*., 2018; FAO, 2021).

Tanpa integrasi yang tepat, strategi adaptasi atau mitigasi dapat menimbulkan konflik kepentingan (*trade-off*) antara peningkatan produksi dan perlindungan lingkungan. Oleh karena itu, keseimbangan antara aspek produktivitas dan keberlanjutan lingkungan menjadi prinsip penting dalam penerapan CSA.

11.4.3 Peran Kebijakan dalam Implementasi CSA

Implementasi CSA memerlukan dukungan kebijakan lintas sektor yang terintegrasi, termasuk pengelolaan pupuk yang efisien, pengembangan infrastruktur irigasi, serta peningkatan kapasitas petani melalui aksi penyuluhan dan pelatihan (IPCC, 2022). Koordinasi kebijakan yang baik dapat meningkatkan efektivitas penerapan CSA sekaligus mempercepat transformasi sistem pertanian menuju sistem yang lebih berkelanjutan.

Dalam menghadapi tantangan perubahan iklim global, CSA menjadi pendekatan strategis untuk membangun sistem pertanian yang produktif, efisien, dan tangguh. Integrasi antara adaptasi, mitigasi, dan ketahanan pangan memungkinkan sistem pertanian tetap berfungsi secara berkelanjutan dalam jangka panjang (FAO, 2021; IPCC, 2022).

11.5 Mitigasi Emisi Gas Rumah Kaca dari Sektor Pertanian

Sektor pertanian berperan sebagai salah satu kontributor penting terhadap pelepasan gas rumah kaca ke atmosfer. Emisi tersebut terutama berasal dari proses biologis dan pengelolaan lahan yang melibatkan aktivitas tanaman, tanah, serta ternak. Gas rumah kaca utama yang dihasilkan dari program pertanian meliputi metana (CH_4), dinitrogen oksida (N_2O), dan karbon dioksida (CO_2), yang masing-masing memiliki sumber dan mekanisme pembentukan yang berbeda (IPCC, 2022).

Upaya mitigasi dalam sektor pertanian diarahkan pada pengurangan jumlah emisi yang dilepaskan tanpa mengurangi produktivitas sistem pertanian. Pendekatan mitigasi tidak hanya berfokus pada pengurangan sumber emisi, tetapi juga pada peningkatan efisiensi penggunaan sumber daya serta optimalisasi kemampuan lahan dan vegetasi dalam menyerap karbon. Dengan demikian, strategi mitigasi diharapkan mampu mendukung keberlanjutan produksi sekaligus menjaga keseimbangan lingkungan (FAO, 2021).

11.5.1 Sumber Utama Emisi Gas Rumah Kaca

Aktivitas pertanian menghasilkan beberapa jenis gas rumah kaca utama, terutama metana (CH_4), dinitrogen oksida (N_2O), dan karbon dioksida (CO_2), yang berasal dari proses biologis dan pengelolaan lahan. Metana umumnya terbentuk pada kondisi lingkungan tanpa oksigen (anaerob), seperti pada lahan sawah tergenang

air serta proses fermentasi yang terjadi dalam sistem pencernaan ternak ruminansia. Dinitrogen oksida dihasilkan dari proses transformasi nitrogen di dalam tanah, terutama akibat penggunaan pupuk nitrogen yang tidak efisien. Sementara itu, karbon dioksida dilepaskan sebagai akibat dari pengolahan tanah yang intensif dan berkurangnya kandungan bahan organik tanah akibat degradasi lahan (FAO, 2021; IPCC, 2022).

Perbedaan karakteristik pembentukan masing-masing gas tersebut menunjukkan bahwa strategi mitigasi perlu disesuaikan dengan sumber emisi yang dominan pada suatu sistem pertanian. Pendekatan yang tepat akan menghasilkan pengurangan emisi yang lebih efektif dan berkelanjutan.

11.5.2 Pendekatan Umum Mitigasi Emisi

Mitigasi emisi gas rumah kaca dalam sektor pertanian dapat dilakukan melalui tiga pendekatan utama, yaitu:

a. **Pengurangan sumber emisi**, melalui pengelolaan lahan dan air secara efisien.
b. **Peningkatan efisiensi sistem**, melalui penggunaan pupuk dan air secara tepat.
c. **Peningkatan penyerapan karbon**, melalui peningkatan biomassa tanaman dan bahan organik tanah (IPCC, 2022).

Ketiga pendekatan tersebut perlu diterapkan secara terpadu agar memberikan manfaat lingkungan tanpa menurunkan produktivitas pertanian.

11.5.3 Strategi Mitigasi Berbasis Tanaman dan Lahan

Upaya mitigasi pada sistem tanaman dan lahan dilakukan melalui pengelolaan air, tanah, serta residu tanaman secara berkelanjutan. Salah satu teknik yang banyak diterapkan pada budidaya padi adalah metode *Alternate Wetting and Drying* (AWD), yaitu pengaturan siklus penggenangan dan pengeringan lahan secara bergantian. Teknik ini terbukti mampu menurunkan emisi metana sekaligus meningkatkan efisiensi penggunaan air.

Selain itu, penerapan pengolahan tanah konservasi dan pengelolaan sisa tanaman secara tepat dapat meningkatkan kandungan bahan organik tanah. Peningkatan bahan organik tersebut berperan dalam mengurangi kehilangan karbon dari tanah

serta memperbaiki struktur tanah yang mendukung pertumbuhan tanaman (FAO, 2021; IPCC, 2022).

11.5.4 Strategi Mitigasi Berbasis Nutrisi

Efisiensi penggunaan pupuk nitrogen merupakan langkah penting dalam menurunkan emisi N_2O. Pemupukan berimbang berdasarkan prinsip tepat jenis, dosis, waktu, dan tempat membantu meningkatkan efisiensi penggunaan nitrogen sekaligus mengurangi kehilangan unsur hara (FAO, 2021).

Penggunaan pupuk organik dan biofertilizer juga berperan dalam meningkatkan kesuburan tanah serta menurunkan emisi gas rumah kaca dalam jangka panjang (IPCC, 2022).

11.5.5 Strategi Mitigasi pada Sistem Peternakan

Mitigasi pada sistem peternakan dilakukan melalui peningkatan kualitas pakan dan pengelolaan limbah ternak. Pakan dengan kualitas yang baik dapat meningkatkan efisiensi pencernaan ternak dan menurunkan emisi metana. Selain itu, limbah ternak yang diolah menjadi biogas dapat mengurangi emisi sekaligus menghasilkan energi alternatif yang bermanfaat bagi usaha pertanian (IPCC, 2022).

11.5.6 Peningkatan Serapan Karbon

Peningkatan serapan karbon juga dapat dilakukan melalui berbagai praktik, seperti agroforestri, penggunaan tanaman penutup tanah (cover crops), dan restorasi lahan terdegradasi. Praktik-praktik tersebut mampu meningkatkan kandungan karbon dalam biomassa tanaman dan tanah serta memperbaiki produktivitas lahan (FAO, 2021; van Noordwijk et al., 2021).

Ringkasan berbagai strategi mitigasi dan dampaknya disajikan pada Tabel 11.3.

Tabel 11.3: Strategi Mitigasi dan Dampaknya

Strategi	Target Emisi	Dampak
AWD	CH_4	↓ metana
Pemupukan efisien	N_2O	↓ N_2O
Biogas	CH_4	↓ emisi + energi
Agroforestri	CO_2	↑ serapan karbon
Konservasi tanah	CO_2	↓ kehilangan karbon

11.5.7 Keterkaitan dan Tantangan Mitigasi

Meskipun berbagai strategi mitigasi memberikan manfaat bagi lingkungan, penerapannya memerlukan pengelolaan yang tepat. Beberapa strategi dapat menimbulkan dampak tambahan jika tidak dilakukan secara optimal, seperti peningkatan emisi N_2O akibat pengelolaan nitrogen yang kurang tepat atau terjadinya kompetisi cahaya pada sistem agroforestri (IPCC, 2022). Oleh karena itu, strategi mitigasi perlu diterapkan sesuai dengan kondisi spesifik lokasi dan didukung oleh data ilmiah yang akurat agar hasilnya optimal.

Upaya mitigasi emisi pada sektor pertanian menjadi langkah strategis untuk menekan kontribusi terhadap perubahan iklim tanpa mengorbankan hasil produksi. Pendekatan mitigasi yang efektif memerlukan integrasi antara efisiensi penggunaan input, pengelolaan ekosistem secara berkelanjutan, serta peningkatan kapasitas serapan karbon (FAO, 2021; IPCC, 2022). Integrasi antara adaptasi dan mitigasi, sebagaimana diterapkan dalam konsep *Climate-Smart Agriculture*, menjadi kunci dalam membangun sistem pertanian yang produktif, tangguh terhadap perubahan iklim, dan ramah lingkungan dalam jangka panjang.

Perubahan iklim memengaruhi sistem pertanian melalui perubahan suhu, curah hujan, dan kejadian cuaca ekstrem yang berdampak pada produktivitas dan ketahanan pangan. Tingkat kerentanan ditentukan oleh paparan, sensitivitas, dan kapasitas adaptif sistem pertanian. Oleh karena itu, penerapan strategi adaptasi dan mitigasi secara terpadu, termasuk melalui pendekatan *Climate-Smart Agriculture*, menjadi kunci dalam menjaga keberlanjutan produksi pertanian dan kelestarian lingkungan.

BAB 12
PANGAN LOKAL DAN KEARIFAN TRADISIONAL

12.1 Nilai Strategis Pangan Lokal dalam Ketahanan Pangan Nasional

Pangan lokal dan kearifan tradisional memegang peranan strategis yang tidak dapat diabaikan dalam konteks agroekologi dan ketahanan pangan. Indonesia dengan keragaman ekologi dan budaya memiliki khazanah pangan lokal yang melimpah dan sistem pengetahuan tradisional yang telah teruji selama berabad-abad. Pangan lokal bukan sekadar komoditas pertanian semata. Pangan lokal merupakan representasi dari adaptasi ekologis, identitas budaya, dan kedaulatan masyarakat setempat (Soemarwoto, 1997; Iskandar, 2012; Arif, 2025).

Undang-Undang Republik Indonesia No. 18 Tahun 2012 tentang Pangan mendefinisikan ketahanan pangan sebagai ketersediaan pangan yang memenuhi kebutuhan dasar gizi masyarakat secara berkelanjutan, sekaligus menjamin keberagaman jenis pangan yang dapat memenuhi kebutuhan gizi masyarakat secara seimbang. Undang-undang yang sama juga menegaskan bahwa pangan lokal adalah makanan yang dikonsumsi oleh masyarakat setempat sesuai dengan potensi dan kearifan lokal, sebuah definisi yang secara eksplisit mengakui keterikatan antara pangan, ekologi, dan nilai budaya suatu komunitas.

Kearifan lokal dalam praktik pertanian mencerminkan pemahaman mendalam dari masyarakat tradisional terhadap ekosistem setempat, yang termanifestasi dalam praktik-praktik pertanian berkelanjutan. Pengetahuan tradisional yang berkembang di tingkat komunitas terbukti mampu mendukung pengelolaan sumber daya alam secara berkelanjutan dan relevan untuk pengembangan sistem pangan berbasis agroekologi (Reijntjes, Haverkort dan Waters-Bayer, 1992). Dalam konteks Indonesia, keberagaman hayati dan budaya memberikan peluang besar untuk mengembangkan sistem pangan berbasis sumber daya lokal. Namun, optimalisasi potensi tersebut memerlukan pendekatan yang terintegrasi, baik dari sisi produksi,

distribusi, maupun konsumsi pangan. Ketahanan pangan tidak hanya ditentukan oleh ketersediaan pangan dalam jumlah cukup, tetapi juga oleh keberagaman jenis pangan yang mampu memenuhi kebutuhan gizi masyarakat secara seimbang dan berkelanjutan.

Secara ekologis, berbagai tanaman pangan lokal yang tumbuh dan dibudidayakan di Indonesia, seperti sorgum, jewawut, jagung, sagu, sukun, dan berbagai umbi-umbian, memiliki kemampuan adaptasi yang tinggi terhadap kondisi agroekosistem setempat. Karakteristik ini menjadikannya relevan dalam menghadapi keterbatasan lahan produktif, degradasi lingkungan, dan tekanan perubahan iklim. Sagu menjadi sumber pangan pokok di Papua dan Maluku, sedangkan sorgum serta jagung lokal banyak berkembang di Nusa Tenggara Timur. Keunggulan utama komoditas-komoditas tersebut justru terletak pada kemampuannya bertahan dan berproduksi secara optimal di lingkungan yang beragam dan seringkali marginal.

Dengan demikian, pangan lokal dapat menjadi salah satu strategi penting untuk meningkatkan resiliensi sistem pangan di wilayah-wilayah tertentu. Temuan ekplorasi menunjukan bahwa tanaman pangan lokal merupakan hasil adaptasi jangka panjang terhadap lingkungan spesifik, sehingga cenderung lebih resiliens terhadap kekeringan, hama lokal, dan variabilitas iklim (Solunoğlu, 2025). Sistem pertanian yang bertumpu pada keanekaragaman lokal juga lebih tahan terhadap gangguan ekologis dan umumnya memerlukan input eksternal yang lebih rendah (Reijntjes, Haverkort dan Waters-Bayer, 1992).

Bukti empiris menunjukkan bahwa daerah dengan keragaman pangan lokal yang lebih tinggi cenderung menunjukkan ketahanan pangan yang lebih stabil. Catatan (Iskandar, 2012a) di wilayah Baduy, Banten, mendokumentasikan bahwa komunitas yang mempertahankan sistem pertanian berbasis diversifikasi, yakni menanam padi huma bersama jagung, ubi, dan kacang-kacangan, mampu menjaga ketersediaan pangan secara berkelanjutan dengan dampak yang lebih kecil terhadap ketergantungan pasokan eksternal dibandingkan komunitas yang beralih ke monokultur. Catatan (Arif, 2025) menunjukkan hal serupa: di wilayah Boti, Timor Tengah Selatan, yang masih mempertahankan diversifikasi pangan lokal lebih berketahanan pangan dan bebas gizi buruk dibandingkan dengan wilayah desa-desa lain yang telah beralih hampir sepenuhnya ke beras. Temuan ini memperkuat argumen bahwa diversifikasi pangan lokal bukan sekadar kebijaksanaan turun-

temurun, melainkan strategi adaptif yang terukur untuk memperkuat resiliensi sistem pangan.

Selama beberapa dekade terakhir, sistem pangan nasional cenderung bertumpu pada komoditas tertentu, terutama beras sebagai sumber utama karbohidrat. Data Badan Pusat Statistik (2025) menunjukkan bahwa konsumsi beras per kapita masih sangat tinggi, mencapai 79,0 kg/tahun pada 2024, menjadikannya urutan tertinggi dalam konsumsi pangan nasional. Ketergantungan yang tinggi terhadap satu jenis pangan ini menimbulkan kerentanan, khususnya ketika terjadi gangguan produksi akibat perubahan iklim, serangan hama, bencana alam, maupun fluktuasi harga di pasar. Dukungan konseptual terhadap pernyataan ini dapat dilihat dari beberapa perbandingan wilayah. Di Yogyakarta dan Nusa Tenggara Timur (Firdaus dan Cahyono, 2017), Yogyakarta memiliki skor Pola Pangan Harapan (PPH) yang lebih tinggi dan pola konsumsi yang lebih beragam, sehingga ketahanan pangannya tampak lebih baik dibandingkan Nusa Tenggara Timur yang pola konsumsinya belum cukup beragam. Sementara itu, laporan kebijakan IISD (International Institute for Sustainable Development) (Salim, 2010) mencatat bahwa pemerintah NTT dan NTB telah mengarahkan kebijakan konsumsi lokal ke ubi jalar, talas, dan sagu, meskipun implementasinya menghadapi tantangan serius. Temuan-temuan ini mengindikasikan bahwa keberagaman sumber pangan merupakan faktor penting dalam resiliensi sistem pangan, meskipun diversifikasi pangan lokal saja tidak cukup tanpa dukungan infrastruktur, kelembagaan, dan kebijakan yang memadai.

Dari perspektif ekonomi, pengembangan pangan lokal dapat mengurangi ketergantungan pada impor pangan dan distribusi pangan jarak jauh yang rentan terhadap guncangan pasar global. Revitalisasi pangan lokal menjadi salah satu solusi dengan memperkuat ekonomi daerah, menciptakan lapangan kerja di perdesaan, serta meningkatkan nilai tambah di tingkat petani. Temuan menunjukkan bahwa diversifikasi usaha tani terkait pangan lokal mampu meningkatkan pendapatan petani sekaligus mendorong pemerataan kesejahteraan (Holt dan Amilien, 2007; Rahmanto, Purnomo dan Kasiwi, 2020).

Secara sosial-budaya, pangan lokal melekat erat dengan identitas etnis, ritual adat, dan sistem pengetahuan tradisional masyarakat. Setiap komunitas memiliki pangan khas yang tidak hanya berfungsi sebagai sumber nutrisi, tetapi juga sebagai penanda identitas dan kohesi sosial. Contohnya, sagu bagi masyarakat Papua dan

Maluku, jagung untuk masyarakat Madura dan Nusa Tenggara Timur, serta berbagai jenis umbi-umbian untuk komunitas di Jawa, Nusa Tenggara, Maluku, Kalimantan dan Papua (Arif, 2025). Karena itu, penguatan pangan lokal juga berarti menjaga keberlanjutan budaya dan memperkuat basis sosial masyarakat.

Dalam hal gizi, banyak tanaman pangan lokal memiliki kandungan nutrisi yang tinggi dibandingkan komoditas pangan yang dominan. Sebagai contoh, sorgum memiliki kandungan protein dan mineral yang lebih tinggi daripada beras (Tanwar *dkk.*, 2023). Data tabel Komposisi Pangan Indonesia (TKPI) 2017 yang diterbitkan Kementerian Kesehatan RI mengenai kandungan zat gizi berbagai bahan pangan lokal menunjukkan bahwa Indonesia memiliki keragaman sumber pangan nabati yang kaya nilai gizinya. Dari kelompok serealia, beras hitam mencatat kandungan serat yang jauh lebih tinggi dibandingkan beras giling biasa. Sementara kelompok umbi-umbian dan sagu menawarkan alternatif sumber karbohidrat dengan kepadatan energi dan profil gizi yang beragam. Keunggulan gizi pangan nabati lokal juga tercermin dari kandungan protein kedelai, serta konsentrasi kalsium yang sangat tinggi pada wijen (Direktorat Gizi Masyarakat, 2018).

Pangan lokal dan kearifan tradisional bukan sekadar warisan budaya yang perlu dilestarikan, melainkan dapat menjadi fondasi strategis yang menopang ketahanan pangan nasional. Dari dimensi ekologi, pangan lokal terbukti adaptif terhadap kondisi lingkungan yang beragam dan mampu bertahan dalam tekanan iklim yang semakin tidak menentu. Dari sisi ekonomi, pengembangannya berpotensi melepaskan ketergantungan pada produk impor, dapat pula menggerakkan perekonomian perdesaan dan meningkatkan kesejahteraan petani. Dari perspektif sosial-budaya, pangan lokal memperkuat identitas komunitas dan kohesi sosial yang menjadi dasar ketahanan masyarakat dari dalam. Sementara dari aspek gizi, keragamannya membuka jalan dari berbagai masalah malnutrisi yang ada di Indonesia. Oleh karena itu, revitalisasi pangan lokal menuntut pendekatan yang terintegrasi dan berkesinambungan. Di sisi lain, penguatan pangan lokal tidak dapat dipisahkan dari sistem pengetahuan yang mendasarinya, yaitu kearifan lokal dalam praktik pertanian.

12.2 Kearifan Lokal Pertanian Nusantara dan Relevansinya

Kearifan lokal pertanian Nusantara merupakan akumulasi pengetahuan, praktik, dan kepercayaan yang telah dikembangkan oleh masyarakat lokal melalui proses adaptasi jangka panjang terhadap lingkungan ekologi, sosial, dan ekonomi setempat (Iskandar, 2009). Dalam terminologi di bidang ekologi dan antropologi, kearifan lokal ini dapat dipahami sebagai *Traditional Ecological Knowledge* (TEK), yang didefinisikan sebagai kumpulan pengetahuan, praktik, dan kepercayaan yang berkembang melalui proses adaptif dan diwariskan lintas generasi melalui transmisi kultural mengenai hubungan antara makhluk hidup satu sama lain dan dengan lingkungannya (Berkes, 2008). Berbagai praktik pertanian tradisional di Indonesia menunjukkan adanya prinsip-prinsip keberlanjutan yang kuat, mencakup pengelolaan air berbasis komunitas, pola tanam yang mengikuti musim, pemilihan benih, serta penggunaan bahan alami dalam pemupukan dan pengendalian hama.

Salah satu perwujudan dari kearifan lokal pertanian adalah sistem subak di Bali, yang telah diakui UNESCO sebagai Warisan Budaya Dunia pada tahun 2012. Subak adalah sistem irigasi komunal yang tidak hanya mengatur distribusi air untuk persawahan, tetapi juga mengintegrasikan nilai-nilai filosofis, ritual keagamaan, dan struktur sosial masyarakat Bali. Prinsip Tri Hita Karana (prinsip yang mengutamkan harmonisasi hubungan antara manusia dengan Tuhan, manusia dengan sesama manusia, dan manusia dengan alam) menjadi landasan operasional subak (Yekti *dkk.*, 2017). Hal ini menunjukkan bahwa sistem subak, yang tampak tradisional ternyata merupakan sistem manajemen sumber daya air yang efisien dan adaptif.

Praktik serupa juga ditemukan di wilayah lain dengan karakteristik berbeda. Sistem huma atau ladang berpindah yang dipraktikkan oleh masyarakat Baduy di Banten dan Kasepuhan di Jawa Barat dan Banten merepresentasikan bentuk agroekologi tradisional yang mumpuni. Sistem huma melibatkan rotasi lahan yang panjang, penanaman campuran berbagai jenis tanaman pangan (padi huma, jagung, ubi, kacang-kacangan), dan pemeliharaan hutan sekunder sebagai sumber keanekaragaman hayati dan kesuburan tanah. Meskipun produktivitas per hektar per musim tanam relatif rendah dibandingkan sawah intensif, sistem huma sangat berkelanjutan dari sisi ekologi karena tidak memerlukan input eksternal, memelihara biodiversitas tinggi, dan mencegah degradasi tanah. Larangan

penggunaan pupuk kimia dan pestisida sintetis dalam aturan adat di Baduy misalnya, menunjukkan kesadaran ekologis yang mendalam, yang selaras dengan prinsip-prinsip pertanian organik modern (Iskandar, 2012a; Iskandar dan Iskandar, 2015).

Sistem agroforestri tradisional di berbagai wilayah Indonesia juga mencerminkan kearifan lokal yang luar biasa. Di Banten dan Jawa Barat mengenal sistem *huma-reuma, talun kebun* dan pekarangan; di Sumba ada sistem *kaliwo*; di Bangka dan Belitung terdapat sistem *kaleka*. Berbagai bentuk sistem agroforestri ini mengintegrasikan pohon, tanaman pangan, dan kadang-kadang ternak dalam satu lanskap. Sistem ini tidak hanya menyediakan beragam produk (pangan, kayu, buah, obat-obatan) tetapi juga memberikan jasa ekosistem seperti konservasi tanah dan air, penyerapan karbon, dan habitat bagi keanekaragaman hayati. Sistem agroforestri ini memiliki fungsi menghasilkan bahan pangan, sumber pendapatan rumah tangga dan gizi keluarga (Iskandar, 2009).

Pengetahuan lokal tentang varietas tanaman juga sangat kaya. Petani tradisional mampu mengenali dan membedakan ratusan varietas padi lokal berdasarkan karakteristik agronomi, kuliner, dan ritualnya (Iskandar dan Ellen, 1999). Tidak hanya padi, tetapi juga beragam tanaman pangan lainnya memiliki klasifikasi lokalnya sendiri (Iskandar dan Iskandar, 2015). Selain itu, kearifan lokal ini juga tercermin dalam hubungan sosial antarpetani yang masih mengedepankan prinsip gotong royong. Praktik ini tidak hanya memperkuat kapasitas produksi, tetapi juga menjaga kohesi sosial dalam komunitas pertanian. Sistem kelembagaan tradisional seperti kelompok tani dan lumbung komunal merupakan contoh bagaimana kearifan lokal mengatur praktik pertanian secara kolektif.

Relevansi kearifan lokal pertanian di era modern terletak pada beberapa aspek penting, yaitu kearifan lokal menawarkan solusi yang telah terbukti adaptif terhadap berbagai tekanan ekologi dan sosial-ekonomi; kearifan lokal mempromosikan pendekatan holistik dan integratif yang sejalan dengan prinsip-prinsip agroekologi dan pembangunan berkelanjutan; serta kearifan lokal mampu memberdayakan masyarakat lokal.

Meskipun relevansinya terbukti, kearifan lokal pertanian menghadapi berbagai ancaman serius. Modernisasi pertanian yang agresif, urbanisasi, perubahan iklim, dan erosi budaya telah menyebabkan hilangnya banyak praktik tradisional. Oleh karena itu, diperlukan upaya dokumentasi, revitalisasi, dan adaptasi kearifan lokal

agar tetap relevan bagi generasi masa kini, termasuk mengintegrasikan pengetahuan tradisional dengan ilmu pengetahuan modern.

12.3 Diversifikasi Pangan Lokal sebagai Strategi Gizi Nasional

Kearifan lokal pertanian Nusantara menekankan keberagaman pangan. Hal ini berarti bahwa masyarakat tidak bergantung pada satu sumber makanan saja, sehingga kebutuhan gizi lebih seimbang dan risiko krisis pangan bisa ditekan. Di tengah tantangan saat ini, seperti pola konsumsi yang makin seragam dan masalah gizi, nilai-nilai ini jadi semakin relevan. Oleh karena itu, kearifan lokal bisa menjadi salah satu pijakan penting untuk mendorong diversifikasi pangan lokal sebagai strategi nyata dalam memperkuat gizi nasional.

Diversifikasi pangan lokal merupakan salah satu strategi penting untuk mendukung perbaikan gizi di Indonesia. Masalah gizi di Indonesia terkait malnutrisi masih menjadi tantangan besar. Situasi ini sebagian disebabkan oleh pola konsumsi pangan yang tidak beragam dan tidak bergizi seimbang, dengan dominasi karbohidrat sederhana, terutama dari beras, dan asupan protein, vitamin, serta mineral yang rendah. Pendekatan mendiversifikasi pangan lokal ini tidak hanya akan meningkatkan variasi makanan, tetapi juga mengatasi kekurangan nutrisi yang ada di banyak daerah. Temuan menunjukkan bahwa menggabungkan tanaman lokal seperti sorgum dan kelor dapat secara signifikan meningkatkan indikator pertumbuhan anak, mengatasi kekurangan protein dan vitamin (Karim, Arisonaningtyas dan A. Kikon, 2025). Di samping itu, diversifikasi ke sumber karbohidrat lokal seperti singkong dan ubi jalar dapat mengurangi masalah ketergantungan pada konsumsi beras, menciptakan peluang ekonomi serta meningkatkan nutrisi (Pawiroharsono, 2013).

Indonesia memiliki kekayaan sumber pangan lokal dengan profil nutrisi yang beragam dan saling melengkapi. Beberapa diversifikasi pangan lokal sumber karbohidrat dan kandungan gizinya per 100 gram bagian yang dapat dimakan (BDD), dapat dilihat pada Tabel 12.1.

Tabel 12.1: Diversifikasi Pangan Lokal Sumber Karbohidrat (per 100g BDD) (Direktorat Gizi Masyarakat, 2018)

Kelompok	Nama Bahan Pangan	Energi (Kal)	Protein (g)	Lemak (g)	Karbohidrat (g)	Serat (g)
Beras	Beras giling, mentah	357	8.4	1.7	77.1	0.2
	Beras tumbuk merah, mentah	352	7.3	0.9	76.2	0.8
	Beras hitam, mentah	351	8.0	1.3	76.9	20.1
Non-Beras (Serealia)	Jagung kuning pipil, mentah	366	9.8	7.3	69.1	2.2
	Cantel/Sorghum, mentah	366	11.0	3.3	73.0	1.2
	Jawawut, mentah	364	9.7	3.5	73.4	8.2
Non-Beras (Umbi & Sagu)	Singkong/Ketela pohon, segar	154	1.0	0.3	36.8	0.9
	Ubi jalar kuning, segar	137	1.3	1.1	29.8	0.6
	Talas bogor, segar	133	1.0	0.2	32.2	0.7
	Sagu aren, kering	355	0.6	1.1	85.6	0.3
Produk Olahan Lokal	Tiwul	353	2.4	1.1	83.4	6.5
	Rasi (Beras Singkong)	350	0.9	0.4	85.7	14.4

Berdasarkan tabel di atas terlihat bahwa kandungan serat dari pangan non-beras seperti rasi (beras singkong) dan beras hitam memiliki kandungan serat yang jauh lebih tinggi (masing-masing 14.4g dan 20.1g) dibandingkan beras giling biasa (0.2g). Variasi Energi dari kelompok umbi-umbian dalam bentuk segar (singkong, ubi jalar, talas) memiliki kepadatan energi yang lebih rendah (sekitar 133-154 Kal) karena kadar air yang lebih tinggi dibandingkan serealia kering. Jagung dan cantel menawarkan kadar protein yang bersaing atau bahkan lebih tinggi dibandingkan beras giling sehingga menjadi alternatif serealia. Sagu sebagai sumber karbohidrat memiliki kandungan karbohidrat tertinggi (85.6g) namun sangat rendah protein (0.6g). Hal ini menunjukkan bahwa Indonesia memiliki kekayaan pangan lokal

yang dapat digunakan untuk mengurangi ketergantungan pada beras giling, dengan masing-masing bahan memiliki profil keunggulan gizi tertentu.

Strategi diversifikasi pangan lokal untuk perbaikan gizi memerlukan pendekatan yang melibatkan berbagai pemangku kepentingan yang bertujuan untuk menyediakan pangan beragam, bergizi seimbang, dan berbasis sumber daya lokal. Upaya memperkenalkan kembali pangan lokal dan edukasi akan pentingnya diversifikasi konsumsi pangan menjadi langkah awal dan perlu dikuatkan.

12.4 Pelestarian Varietas Lokal dan Benih Tradisional

Pelestarian varietas lokal dan benih tradisional merupakan salah satu dasar dalam membangun ketahanan pangan yang berkelanjutan dan tangguh. Varietas lokal atau *landraces* adalah hasil evolusi dan seleksi yang dilakukan oleh petani selama ratusan atau ribuan tahun, sehingga memiliki adaptasi yang sangat spesifik terhadap kondisi agroekologis dan kebutuhan sosial-budaya lokal. Berbeda dengan varietas modern yang dikembangkan melalui pemuliaan formal, varietas lokal memiliki keragaman genetik yang tinggi dalam populasinya, yang memberikan kapasitas adaptif terhadap stres biotik dan abiotik (Brush, 2004a; Jarvis *dkk.*, 2008).

Di berbagai belahan dunia terdapat fenomena erosi genetik. Hal serupa terjadi pula di Indonesia, dimana varietas tanaman lokal yang dulu dibudidayakan petani kini telah hilang atau sangat jarang ditemukan. Erosi genetik terjadi ketika varietas tanaman lokal yang beragam digantikan oleh varietas modern yang seragam, terutama akibat modernisasi pertanian, tekanan pasar, dan kebutuhan pangan yang meningkat. Revolusi Hijau dengan mekanisasi, pupuk kimia, serta pestisida mempersempit keragaman lingkungan. Hilangnya plasma nutfah berarti hilangnya sumber genetik yang berharga; sistem pertanian menjadi lebih rentan terhadap stres lingkungan dan ketidakstabilan. Meskipun demikian, proses erosi genetik tidak selalu linier—di beberapa wilayah, petani masih mempertahankan keragaman melalui seleksi sadar dan pengelolaan lahan yang beragam (Brush, 2004b).

Menghilangnya varietas lokal bukan hanya berarti hilangnya keragaman genetik, tetapi juga hilangnya sistem pengetahuan ekologi lokal yang melekat pada setiap varietas. Ketika suatu varietas hilang, pengetahuan yang terkait dengannya juga ikut hilang, mengurangi kekayaan khazanah budaya masyarakat (Iskandar, 2012b). Hal ini terkait erat dengan erosi pangan lokal, yang berarti hilangnya keanekaragaman budaya dan terputusnya transmisi pengetahuan antargenerasi.

Strategi pelestarian varietas lokal dan benih tradisional dapat dilakukan melalui dua pendekatan yang saling melengkapi: konservasi *ex situ* dan konservasi *in situ*. Konservasi *in situ* mengacu pada konservasi sumber daya genetik dalam habitat alami atau lingkungan aslinya, memungkinkan spesies untuk terus hidup dan beradaptasi. Sedangkan konservasi ex situ melibatkan konservasi sumber daya genetik di luar habitat aslinya (Vaughan dan Te-Tzu Chang, 1992). Konservasi *in situ* memungkinkan varietas lokal untuk terus mengalami proses adaptasi secara dinamis di habitatnya, sekaligus menjaga keberlangsungan pengetahuan ekologis dan praktik budidaya tradisional yang secara historis melekat pada komunitas pengampunya. Sedangkan konservasi *ex situ* bersifat teknis dan terkontrol dapat dilakukan melalui bank gen, kebun raya, maupun lahan pertanian buatan.

Upaya pelestarian varietas lokal dan benih tradisional di Indonesia membutuhkan sinergi antara masyarakat dan pemerintah. Dari sisi masyarakat, inisiatif menjaga keberlanjutan benih lokal dapat menjadi wadah pertukaran pengetahuan antarpetani. Praktik tradisional seperti penyimpanan dan pertukaran benih pada berbagai komunitas dapat memperkuat kemandirian petani dan mengurangi ketergantungan pada pasar. Peran aktif komunitas akan menjadi penggerak dalam mempertahankan keragaman varietas lokal. Di sisi lain, dukungan kebijakan pemerintah sangat diperlukan untuk memperkuat upaya masyarakat ini.

12.5 Revitalisasi Kuliner Berbasis Tanaman Pangan Lokal

Kuliner berbasis tanaman pangan lokal merupakan bagian penting dari budaya masyarakat Indonesia. Kuliner tradisional Nusantara sangat kaya dan beragam, mencerminkan keragaman ekologi, budaya, dan sejarah dari berbagai etnis di Indonesia. Setiap daerah memiliki hidangan khas yang menggunakan bahan pangan lokal dengan teknik pengolahan yang unik, yang tidak hanya berfungsi sebagai sumber nutrisi tetapi juga sebagai penanda identitas budaya dan media transmisi pengetahuan antargenerasi.

Keragaman ini terlihat dari variasi makanan pokok di berbagai wilayah di Indonesia, dimana masyarakat Jawa, Bali, Sumatera, dan sebagian Kalimantan Barat mengonsumsi nasi dan ketela pohon; masyarakat Kalimantan, Maluku, dan Papua mengonsumsi ubi dan sagu; sementara masyarakat Sulawesi, Nusa Tenggara Barat, Nusa Tenggara Timur, dan Madura mengonsumsi jagung, ubi, dan pisang. Kekayaan kuliner lokal ini juga termanifestasi dalam berbagai hidangan khas seperti nasi sela dari Bali (campuran nasi dengan ubi jalar), nasi ampok dari

Jawa Timur Selatan dan Madura (berbahan dasar jagung), bubur barobbo dari Sulawesi Selatan (terbuat dari jagung), dan papeda dari Kalimantan, Maluku, dan Papua (dibuat dari sagu dan disajikan dengan ikan). Namun sayangnya, kearifan lokal ini mulai terkikis seiring dengan dominasi beras sebagai makanan pokok dan tingginya ketergantungan pada impor beras, padahal sumber karbohidrat alternatif dari umbi-umbian, jagung, sagu, dan pangan lokal lainnya sebenarnya tersedia melimpah di berbagai daerah (Gardjito *dkk.*, 2019).

Untuk itu, diperlukan revitalisasi kuliner lokal yang tidak sekadar melestarikan resep lama tetapi juga mengadaptasinya agar lebih relevan dengan konteks kontemporer. Dokumentasi kuliner tradisional menjadi langkah awal yang krusial. Banyak resep dan teknik pengolahan tradisional hanya bertahan dalam ingatan orang tua di perdesaan, dan berisiko terlupakan ataupun hilang jika tidak segera didokumentasikan melalui pengamatan kuliner, pembuatan buku resep, video dokumenter, dan arsip digital. Namun, dokumentasi saja tidak cukup; diperlukan upaya lanjutan berupa pendidikan, promosi, dan pengembangan produk agar pengetahuan yang terdokumentasi benar-benar kembali hidup dalam praktik konsumsi sehari-hari (Fardhani, 2024; Fitriyah, Baharuddin dan Sheyoputri, 2025).

Pengembangan produk pangan lokal dapat menjadi kunci dalam meningkatkan daya saing dan akseptabilitas masyarakat terhadap pangan lokal, khususnya di kalangan generasi muda. Inovasi terhadap bahan pangan lokal dapat dilakukan seperti singkong, sagu, talas, dan sorgum menjadi produk-produk yang lebih menarik dan memiliki nilai tambah ekonomi tinggi. Produk-produk inovatif seperti tepung mocaf (*modified cassava flour*) dari singkong, mie berbasis sagu, dan camilan dari sorgum menunjukkan bahwa pangan lokal dapat diolah menjadi produk modern yang laku di pasar.

Di Jawa Barat, revitalisasi kuliner lokal menunjukkan keberhasilan melalui pengembangan berbagai produk berbasis singkong, talas, dan bahan lokal lainnya. Produk-produk seperti peuyeum (tape singkong) yang dikemas modern, cireng (aci digoreng) dengan berbagai inovasi isi, serta beragam olahan talas telah menjadi contoh bagaimana inovasi dapat meningkatkan daya tarik pasar yang luas. Berbagai usaha tingkat mikro di wilayah ini berhasil mengembangkan produk olahan dari singkong dan talas menjadi makanan ringan, tepung alternatif, serta produk siap saji yang tidak hanya meningkatkan nilai ekonomi, tetapi juga memperkuat identitas kuliner daerah dan membuka peluang ekonomi bagi pelaku usaha lokal.

Selain itu, inovasi dalam penyajian dan presentasi kuliner lokal juga dapat meningkatkan daya tarik dengan mengkreasikan kuliner yang menggabungkan elemen tradisional dengan teknik dan estetika modern.

Masyarakat Kampung Cireundeu di Kota Cimahi, Jawa Barat, merupakan contoh menarik bagaimana kearifan lokal pangan dapat berkembang menjadi strategi ketahanan pangan tingkat komunitas. Mereka telah lama mengonsumsi rasi (beras singkong) sebagai substitusi nasi, berangkat dari pemahaman bahwa singkong dapat tumbuh di berbagai kondisi lahan tanpa memerlukan sawah yang luas. Inovasi pengolahan singkong menjadi rasi kemudian melahirkan beragam produk kuliner berbasis singkong yang dipasarkan secara mandiri di Cireundeu. Salah satu produk unggulan adalah eggroll singkong, yang memadukan telur dan singkong sehingga menghasilkan cita rasa gurih, di samping olahan lain seperti keripik kaca, slimping, dan keripik singkong berbumbu. Seluruhnya dibuat dari bahan lokal berkualitas dengan harga terjangkau. Meski skalanya masih terbatas, fenomena ini memperlihatkan bahwa singkong tidak hanya berfungsi sebagai pangan alternatif, tetapi juga memiliki potensi sebagai sumber pangan bergizi dan sehat yang sejalan dengan upaya diversifikasi pangan nasional

Revitalisasi kuliner lokal memiliki peran yang signifikan bagi ketahanan pangan dan keberlanjutan ekologi. Solunoğlu (2025) menunjukkan bahwa pengetahuan ekologi tradisional berperan dalam menjaga keberlanjutan pertanian dan budaya melalui pelestarian tanaman lokal yang dipertahankan keberadaannya lewat praktik kuliner. Dalam kerangka ini, peningkatan permintaan terhadap pangan lokal melalui jalur kuliner tidak hanya bersifat ekonomis, tetapi juga menciptakan motivasi nyata bagi petani untuk terus membudidayakan varietas lokal secara berkelanjutan. Hal ini akan berkontribusi pada pelestarian keanekaragaman hayati pertanian. Dengan demikian, pangan lokal dan kearifan ekologis yang menyertainya tidak sekadar bernilai kultural, melainkan merupakan fondasi strategis bagi ketahanan pangan masyarakat.

BAB 13
SISTEM PANGAN DAN RANTAI PASOK PERTANIAN

13.1 Konsep Sistem Pangan dari Hulu ke Hilir

13.1.1 Definisi Sistem Pangan

Sistem pangan merupakan suatu rangkaian agenda yang mencakup produksi, pengolahan, distribusi, pemasaran, hingga konsumsi pangan yang saling terhubung satu sama lain. Sistem pangan tidak hanya mencakup aspek teknis produksi, tetapi juga melibatkan dimensi sosial, ekonomi, lingkungan, serta kebijakan yang mempengaruhi ketersediaan dan akses pangan bagi Masyarakat (Marthalia, L., & Frimawaty, 2024). Menurut (Setiarsih *et al.*, 2024) , sistem pangan mencakup seluruh elemen dan aktivitas yang berkaitan dengan produksi, pengolahan, distribusi, persiapan, dan konsumsi pangan serta dampaknya terhadap ekonomi, sosial, dan lingkungan.

Dalam perspektif agroekologi, sistem pangan dipandang sebagai suatu sistem yang terintegrasi dari hulu ke hilir dengan menekankan keberlanjutan, efisiensi sumber daya, serta kesejahteraan pelaku dalam sistem pangan (Setiarsih *et al.*, 2024). Pendekatan ini menempatkan petani sebagai aktor utama dalam sistem pangan sekaligus menjaga keseimbangan ekosistem pertanian.

13.1.2 Komponen Sistem Pangan dari Hulu ke Hilir

Sistem pangan terdiri dari beberapa komponen utama yang saling terhubung, yaitu produksi, pascapanen dan pengolahan, distribusi dan pemasaran, serta konsumsi pangan (Hidayat *et al.*, 2026).



Gambar 13.1: Sistem Pangan dari Hulu ke Hilir
(Hidayat *et al.*, 2026)

1. Produksi (Hulu)

Produksi pangan merupakan tahap awal dalam sistem pangan yang melibatkan usaha budidaya tanaman, peternakan, maupun perikanan. Pada tahap ini, faktor-faktor seperti penggunaan lahan, teknologi budidaya, ketersediaan air, serta penggunaan input pertanian sangat mempengaruhi hasil produksi pangan. Pendekatan agroekologi pada tahap produksi menekankan penggunaan sumber daya lokal, diversifikasi tanaman, serta praktik pertanian ramah lingkungan untuk meningkatkan keberlanjutan sistem pangan (Altieri, 2018).

2. Pascapanen dan Pengolahan

Tahap pascapanen dan pengolahan merupakan bagian penting dalam sistem pangan karena berkaitan dengan kualitas dan nilai tambah produk pertanian. Penanganan pascapanen yang tidak tepat dapat menyebabkan kehilangan hasil yang cukup besar. Oleh karena itu, penerapan teknologi pascapanen seperti pengeringan, penyimpanan, dan pengolahan menjadi penting dalam mengurangi kehilangan hasil serta meningkatkan nilai ekonomi produk pertanian (Kitinoja & Kader, 2015).

3. Distribusi dan Pemasaran

Distribusi pangan mencakup aktivitas pengangkutan, penyimpanan, serta pemasaran produk pangan dari produsen ke konsumen. Sistem distribusi yang efisien akan meningkatkan akses pangan serta mengurangi kehilangan pangan selama proses distribusi. Dalam sistem pangan berbasis agroekologi, distribusi pangan cenderung diarahkan pada rantai distribusi yang lebih pendek melalui pasar lokal dan pasar petani guna meningkatkan keuntungan petani dan mengurangi dampak lingkungan.

4. Konsumsi (Hilir)

Tahap konsumsi merupakan bagian akhir dari sistem pangan yang berkaitan dengan pola konsumsi masyarakat. Pola konsumsi yang berkelanjutan menjadi bagian penting dalam sistem pangan, termasuk konsumsi pangan lokal, pangan beragam, serta pengurangan pemborosan pangan. Konsumen memiliki peran penting dalam mendorong sistem pangan berkelanjutan melalui pilihan konsumsi yang lebih ramah lingkungan.

13.1.3 Sistem Pangan Berbasis Agroekologi

Sistem pangan berbasis agroekologi menekankan keberlanjutan lingkungan, keadilan sosial, dan ketahanan ekonomi dalam sistem pangan. Pendekatan ini mengintegrasikan praktik pertanian ramah lingkungan dengan penguatan kelembagaan petani serta pengembangan pasar lokal. Sistem pangan berbasis agroekologi juga mendorong diversifikasi pangan serta penggunaan sumber daya lokal untuk meningkatkan ketahanan pangan (Bahari *et al.*, 2024).

Integrasi sistem pangan dari hulu ke hilir bertujuan untuk meningkatkan efisiensi sistem pangan serta memperkuat ketahanan pangan. Integrasi ini mencakup koordinasi antar pelaku sistem pangan, mulai dari petani, pengolah, distributor, hingga konsumen. Pendekatan integratif ini dapat meningkatkan nilai tambah produk serta mengurangi kehilangan pangan dalam rantai pasok.

Sistem pangan melibatkan berbagai stakeholder yang memiliki peran berbeda, antara lain (Kasanah, Suprastiyo and Lukita, 2024):

- Petani sebagai produsen utama pangan
- Pelaku usaha sebagai pengolah dan distributor

- Pemerintah sebagai pembuat kebijakan
- Konsumen sebagai pengguna akhir pangan

Kolaborasi antar stakeholder menjadi kunci dalam membangun sistem pangan berkelanjutan dan memperkuat ketahanan pangan.

13.2 Rantai Nilai Pertanian dan Posisi Petani didalamnya

13.2.1 Konsep Rantai Nilai Pertanian

Rantai nilai pertanian merupakan rangkaian aktivitas yang terjadi sejak tahap produksi hingga produk pertanian sampai ke konsumen akhir. Rantai ini mencakup berbagai aktor dan proses, mulai dari penyedia input (benih, pupuk, alat), aktivitas budidaya oleh petani, pengolahan pascapanen, distribusi, pemasaran, hingga konsumsi (Julianto and Diponegoro, 2016). Setiap tahapan dalam rantai nilai memberikan nilai tambah terhadap produk pertanian, baik dalam bentuk peningkatan kualitas, pengolahan, pengemasan, maupun akses pasar yang lebih luas. Oleh karena itu, rantai nilai pertanian tidak hanya berfokus pada produksi, tetapi juga pada bagaimana produk tersebut dikelola secara efisien dan berkelanjutan hingga sampai kepada konsumen.

Dalam praktiknya, posisi petani dalam rantai nilai pertanian sering kali berada pada tahap produksi yang menghasilkan bahan baku dengan nilai tambah yang relatif rendah. Sementara itu, keuntungan terbesar biasanya diperoleh oleh pelaku di hilir seperti pedagang besar, pengolah, distributor, dan pengecer. Kondisi ini menyebabkan petani sering berada dalam posisi tawar yang lemah, terutama ketika mereka memiliki keterbatasan akses terhadap informasi pasar, teknologi, pembiayaan, dan jaringan distribusi. Akibatnya, petani cenderung menjadi penerima harga (*price taker*), bukan penentu harga (*price maker*), sehingga pendapatan yang diperoleh kurang optimal.

Selain itu, panjangnya rantai distribusi juga menjadi salah satu faktor yang memengaruhi rendahnya pendapatan petani. Produk pertanian sering kali melewati beberapa perantara sebelum sampai ke konsumen, seperti pedagang pengumpul, pedagang besar, dan pengecer. Setiap perantara mengambil margin keuntungan, sehingga harga yang diterima petani menjadi lebih rendah dibandingkan harga yang dibayarkan konsumen. Kondisi ini menunjukkan adanya ketimpangan distribusi nilai tambah dalam rantai nilai pertanian (Syarif, 2025).

Untuk memperkuat posisi petani dalam rantai nilai, diperlukan berbagai strategi, seperti penguatan kelembagaan petani melalui kelompok tani atau koperasi, peningkatan kapasitas petani dalam pengolahan hasil, serta pengembangan akses pasar langsung (Hanifa, Sjah and Budastra, 2026). Melalui kelembagaan yang kuat, petani dapat meningkatkan skala usaha, memperbaiki posisi tawar, dan mengurangi ketergantungan pada perantara. Selain itu, pengembangan sistem pemasaran alternatif seperti pasar petani, pemasaran langsung ke konsumen, dan kemitraan dengan industri lokal juga dapat meningkatkan nilai tambah yang diterima petani.

Pendekatan agroekologi juga berperan penting dalam memperbaiki rantai nilai pertanian. Sistem agroekologi mendorong produksi yang berkelanjutan, memperkuat pasar lokal, serta meningkatkan hubungan langsung antara produsen dan konsumen (Fitri and Usni, 2024). Dengan demikian, petani tidak hanya menjadi produsen bahan mentah, tetapi juga dapat berperan sebagai pengolah, pemasar, dan pengelola sistem pangan lokal. Hal ini memungkinkan distribusi nilai tambah yang lebih adil dan meningkatkan kesejahteraan petani secara berkelanjutan.

Dengan memahami rantai nilai pertanian dan posisi petani di dalamnya, diharapkan berbagai intervensi dapat dirancang untuk memperbaiki sistem pangan secara keseluruhan. Penguatan posisi petani tidak hanya berdampak pada peningkatan pendapatan, tetapi juga pada keberlanjutan sistem pertanian, ketahanan pangan, serta pembangunan ekonomi pedesaan yang lebih inklusif dan berkeadilan.

13.2.2 Pemahaman Rantai Nilai Pertanian dan Posisi Petani

1. Komponen Rantai Nilai Pertanian

Rantai nilai pertanian terdiri dari beberapa tahapan utama diantaranya (Howara *et al.*, 2025):

a. Penyediaan Input (*Inbound Logistics*): Penyediaan benih, pupuk, pestisida, dan alat mesin pertanian (alsintan).

b. Produksi (*Operations*): Proses budidaya di lahan yang dilakukan petani, termasuk penanaman dan pemeliharaan.

c. Pemasaran & Pengumpulan: Produk hasil panen dikumpulkan oleh tengkulak atau pengepul.

d. Pemrosesan (*Processing*): Pengolahan produk mentah menjadi produk setengah jadi atau jadi (misal: gabah menjadi beras).

e. Distribusi & Ritel (*Outbound Logistics*): Penyaluran ke pasar, supermaket, atau industri.

2. Posisi Petani dalam rantai nilai

Petani menempati posisi yang krusial, namun seringkali rentan dalam rantai nilai (Feska, Stella *et al.*, 2026), adapun permasalahan yang muncul ditingkat petani diantaranya:

a. Penyedia Bahan Baku (*Chain Actors*): Petani adalah produsen utama, namun sering kali terputus dari informasi pasar langsung, sehingga bergantung pada pengepul.

b. Rendahnya Nilai Tambah: Dalam banyak kasus, nilai tambah terbesar tidak dinikmati petani, melainkan oleh perantara atau industri pemrosesan karena petani menjual produk mentah.

c. Keterbatasan Akses Pasar: Petani seringkali tidak memiliki akses langsung ke konsumen atau ritel modern, memaksa mereka menerima harga rendah yang ditetapkan pengepul.

d. Kerentanan Risiko: Petani menanggung risiko produksi paling besar (gagal panen, cuaca) namun seringkali mendapatkan keuntungan paling sedikit.

Dalam rantai nilai pertanian, posisi dan peran petani dapat berkembang secara bertahap dari tingkat paling dasar hingga paling mandiri (Ibnu, 2023). Pada tahap ***Chain Actors*** **(Pelaku Rantai)**, petani hanya berfungsi sebagai produsen bahan baku yang berfokus pada usaha budidaya tanpa keterlibatan dalam proses pengolahan maupun pemasaran. Pada kondisi ini, petani cenderung memiliki posisi tawar yang lemah dan sangat bergantung pada pengepul atau perantara, sehingga nilai tambah yang diperoleh relatif rendah. Selanjutnya, pada tahap ***Chain Partners*** **(Mitra Rantai)**, petani mulai menjalin kemitraan dengan pihak lain seperti industri atau perusahaan melalui skema kontrak pertanian. Kemitraan ini memberikan keuntungan berupa akses terhadap teknologi, input produksi, serta jaminan pasar, meskipun dalam

banyak kasus petani masih berada pada posisi yang belum sepenuhnya mandiri karena harga dan standar produksi ditentukan oleh mitra.

Perkembangan berikutnya adalah tahap ***Chain Activity Integrators* (Integrator Aktivitas)**, di mana petani tidak hanya berperan sebagai produsen, tetapi juga mulai terlibat dalam kesibukan pascapanen seperti sortasi, pengeringan, pengemasan, atau pengolahan sederhana untuk meningkatkan nilai tambah produk. Pada tahap ini, pendapatan petani cenderung meningkat karena produk yang dihasilkan memiliki kualitas dan nilai ekonomi yang lebih tinggi, serta ketergantungan terhadap perantara mulai berkurang. Tahap tertinggi adalah ***Chain Owner* (Pemilik Rantai)**, di mana petani atau kelompok tani mampu mengelola seluruh rangkaian aktivitas dari produksi hingga pemasaran secara mandiri. Dalam posisi ini, petani dapat menjual produk langsung ke konsumen, baik melalui pasar lokal, koperasi, maupun platform digital, sehingga memperoleh nilai tambah secara maksimal dan memiliki posisi tawar yang kuat. Transformasi dari pelaku rantai hingga menjadi pemilik rantai mencerminkan pergeseran penting dari ketergantungan menuju kemandirian ekonomi, yang berkontribusi signifikan terhadap peningkatan kesejahteraan petani dan keberlanjutan sistem pangan (Djazuli and Hidayat, 2024).



Gambar 13.2: Tahapan Peran Petani dalam Rantai Nilai (Djazuli and Hidayat, 2024)

13.3 Pasar lokal, Pasar Petani, dan Sistem Pangan Alternatif

13.3.1 Pasar Lokal

Pasar lokal merupakan salah satu komponen penting dalam sistem pangan yang berorientasi pada kedekatan geografis antara produsen dan konsumen. Dalam konteks ini, produk pangan diproduksi, didistribusikan, dan dikonsumsi dalam wilayah yang relatif terbatas, sehingga mampu mengurangi biaya transportasi, menjaga kesegaran produk, serta memperkuat ekonomi lokal. Menurut *Food and Agriculture Organization* (FAO), pasar lokal berperan dalam meningkatkan ketahanan pangan melalui penguatan rantai pasok pendek (*short supply chains*) yang lebih efisien dan inklusif (Kneafsey *et al.*, 2013). Selain itu, rujukan dari (Waterson, 2017) menunjukkan bahwa sistem pemasaran lokal mampu meningkatkan proporsi nilai yang diterima petani hingga 2–3 kali lipat dibandingkan rantai distribusi konvensional.

13.3.2 Pasar Petani

Pasar petani (*farmers' market*) merupakan bentuk konkret dari pasar lokal yang mempertemukan secara langsung petani dengan konsumen tanpa perantara. Model ini tidak hanya memberikan keuntungan ekonomi bagi petani melalui peningkatan margin keuntungan, tetapi juga membangun hubungan sosial dan kepercayaan antara produsen dan konsumen. Rujukan dari (Blay-Palmer, Sonnino and Custot, 2016) menemukan bahwa pasar petani berkontribusi terhadap keberlanjutan sistem pangan dengan meningkatkan transparansi, kualitas produk, serta kesadaran konsumen terhadap asal-usul pangan. Selain itu, rujukan dari berbagai negara berkembang menunjukkan bahwa partisipasi dalam pasar petani dapat meningkatkan pendapatan rumah tangga petani sebesar 20–40% dibandingkan penjualan melalui tengkulak (Afriliyeni, Sihaloho and Sita, 2021).

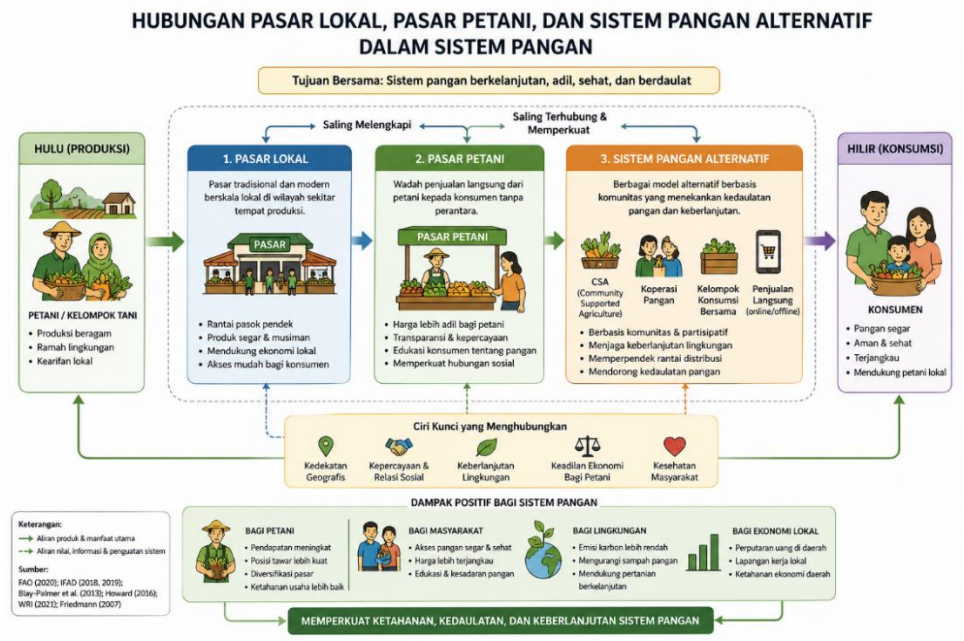
13.3.3 Sistem Pangan Alternatif

Di sisi lain, sistem pangan alternatif (*alternative food systems*) muncul sebagai respons terhadap kelemahan sistem pangan konvensional yang cenderung panjang, tidak transparan, dan seringkali merugikan petani kecil. Sistem ini mencakup berbagai pendekatan seperti *community supported agriculture* (CSA), koperasi pangan, agroekologi, serta perdagangan langsung berbasis komunitas. Menurut Harriet Friedmann (2007), sistem pangan alternatif berupaya merekonstruksi

hubungan antara produksi dan konsumsi dengan menekankan prinsip keadilan sosial, keberlanjutan lingkungan, dan kedaulatan pangan. Temuan oleh *International Fund for Agricultural Development* (IFAD, 2018) juga menunjukkan bahwa pendekatan ini mampu meningkatkan resiliensi petani kecil terhadap krisis ekonomi dan perubahan iklim melalui diversifikasi usaha dan penguatan jaringan lokal.

Lebih lanjut, integrasi antara pasar lokal, pasar petani, dan sistem pangan alternatif terbukti memberikan dampak positif terhadap pengurangan kehilangan dan pemborosan pangan (*food loss and waste*). Rujukan dari *World Resources Institute* (WRI, 2022) menunjukkan bahwa rantai pasok pendek dapat mengurangi kehilangan pangan hingga 15–20% karena waktu distribusi yang lebih singkat dan penanganan yang lebih sederhana. Hal ini sangat relevan bagi komoditas hortikultura dan rempah seperti pala, yang rentan terhadap kerusakan pascapanen.

Secara keseluruhan, pengembangan pasar lokal, pasar petani, dan sistem pangan alternatif merupakan strategi penting dalam transformasi sistem pangan menuju keberlanjutan. Ketiga pendekatan ini tidak hanya meningkatkan kesejahteraan petani melalui peningkatan nilai tambah dan posisi tawar, tetapi juga mendukung sistem pangan yang lebih adil, transparan, dan ramah lingkungan. Oleh karena itu, intervensi kebijakan dan inovasi teknologi yang mendukung penguatan ketiga aspek ini menjadi krusial dalam pembangunan pertanian modern, khususnya di negara berkembang seperti Indonesia.



Gambar 13.3: Pasar Lokal, Pasar Petani, dan Sistem Pangan (Surakarta, 2019)

13.4 Pengurangan Kehilangan dan Pemborosan Pangan

Pengurangan kehilangan dan pemborosan pangan (*food loss and waste*) merupakan salah satu aspek penting dalam mewujudkan sistem pangan berkelanjutan (Luna, 2022). Kehilangan pangan (*food loss*) terjadi pada tahap produksi, panen, pascapanen, penyimpanan, dan distribusi, sedangkan pemborosan pangan (*food waste*) umumnya terjadi pada tahap ritel dan konsumsi (Luna, 2022). Menurut *Food and Agriculture Organization* (FAO), sekitar sepertiga pangan yang diproduksi secara global setiap tahun mengalami kehilangan atau pemborosan sebelum dikonsumsi. Kondisi ini tidak hanya berdampak pada kerugian ekonomi, tetapi juga berkontribusi terhadap tekanan lingkungan dan meningkatnya kerawanan pangan.

Kehilangan pangan pada tingkat produksi dan pascapanen sering disebabkan oleh berbagai faktor, seperti teknik panen yang kurang tepat, keterbatasan fasilitas penyimpanan, kurangnya teknologi pengolahan, serta sistem distribusi yang belum efisien. Di negara berkembang, kehilangan pangan umumnya terjadi pada tahap

awal rantai nilai, terutama karena infrastruktur yang terbatas dan rendahnya akses terhadap teknologi pascapanen. Sementara itu, di negara maju, pemborosan pangan lebih banyak terjadi pada tingkat ritel dan rumah tangga akibat perilaku konsumsi yang kurang efisien dan standar kualitas produk yang tinggi (Utami *et al.*, 2025).

Upaya pengurangan kehilangan dan pemborosan pangan dapat dilakukan melalui berbagai strategi, mulai dari peningkatan teknologi pascapanen hingga perubahan perilaku konsumen. Penerapan teknologi seperti pengeringan yang tepat, penyimpanan suhu terkendali, pengemasan yang sesuai, serta pengolahan hasil pertanian dapat membantu memperpanjang umur simpan produk dan mengurangi kerusakan (Utami *et al.*, 2025). Selain itu, penguatan kapasitas petani dalam penanganan pascapanen juga menjadi langkah penting untuk mengurangi kehilangan pangan di tingkat produksi.

Pengembangan rantai pasok yang lebih pendek melalui pasar lokal dan sistem pangan alternatif juga dapat berkontribusi dalam mengurangi kehilangan pangan (Widodo and Jasmadi, 2024). Dengan distribusi yang lebih cepat dan efisien, produk pertanian dapat sampai ke konsumen dalam kondisi yang lebih segar dan berkualitas. Selain itu, pemanfaatan produk yang tidak memenuhi standar pasar modern tetapi masih layak konsumsi juga dapat mengurangi pemborosan pangan. Pendekatan ini mendorong pemanfaatan pangan secara lebih optimal dan mengurangi dampak lingkungan dari limbah pangan.

Pengurangan kehilangan dan pemborosan pangan juga menjadi bagian penting dari agenda pembangunan global, khususnya dalam *United Nations* melalui target *Sustainable Development Goals* (SDGs), terutama target 12.3 yang bertujuan mengurangi separuh pemborosan pangan global pada tingkat ritel dan konsumen serta mengurangi kehilangan pangan sepanjang rantai produksi dan pasok pada tahun 2030. Upaya ini membutuhkan keterlibatan berbagai pihak, termasuk pemerintah, sektor swasta, petani, dan konsumen, untuk menciptakan sistem pangan yang lebih efisien dan berkelanjutan.

Dengan mengurangi kehilangan dan pemborosan pangan, sistem pangan dapat menjadi lebih efisien, meningkatkan pendapatan petani, serta mengurangi tekanan terhadap sumber daya alam. Selain itu, langkah ini juga berkontribusi pada peningkatan ketahanan pangan, pengurangan emisi gas rumah kaca, serta pembangunan sistem pangan yang lebih adil dan berkelanjutan.

13.4 Transformasi Sistem Pangan Menuju Keberlanjutan

Transformasi sistem pangan menuju keberlanjutan merupakan upaya menyeluruh untuk memperbaiki cara pangan diproduksi, didistribusikan, dikonsumsi, dan dikelola agar lebih ramah lingkungan, adil secara sosial, serta layak secara ekonomi (Djazuli and Hidayat, 2024). Sistem pangan konvensional saat ini menghadapi berbagai tantangan, seperti degradasi lahan, perubahan iklim, kehilangan keanekaragaman hayati, ketimpangan pendapatan petani, serta meningkatnya pemborosan pangan. Oleh karena itu, transformasi sistem pangan menjadi kebutuhan mendesak untuk memastikan ketahanan pangan jangka panjang dan keberlanjutan sumber daya alam.

Transformasi sistem pangan berkelanjutan mencakup beberapa aspek utama, antara lain praktik produksi yang ramah lingkungan, penguatan pasar lokal, pengurangan kehilangan dan pemborosan pangan, serta peningkatan akses terhadap pangan bergizi (Sudarsih and Susilowati, 2025). Pendekatan agroekologi menjadi salah satu strategi penting dalam transformasi ini karena mengintegrasikan prinsip ekologi, sosial, dan ekonomi dalam sistem pertanian. Agroekologi mendorong diversifikasi tanaman, penggunaan sumber daya lokal, serta pengurangan ketergantungan pada input eksternal, sehingga dapat meningkatkan ketahanan sistem pertanian terhadap perubahan iklim dan fluktuasi pasar.

Selain itu, transformasi sistem pangan juga membutuhkan penguatan posisi petani kecil dalam rantai nilai pertanian. Petani kecil berperan penting dalam penyediaan pangan, tetapi sering menghadapi keterbatasan akses terhadap teknologi, pembiayaan, dan pasar. Oleh karena itu, pengembangan kelembagaan petani, koperasi, serta kemitraan yang adil antara petani dan pelaku usaha menjadi langkah penting dalam menciptakan sistem pangan yang lebih inklusif. Dengan memperkuat posisi petani, distribusi nilai tambah dapat menjadi lebih adil dan kesejahteraan petani dapat meningkat.

Transformasi sistem pangan juga melibatkan perubahan pola konsumsi masyarakat menuju konsumsi yang lebih sehat dan berkelanjutan. Konsumen didorong untuk memilih produk lokal, mengurangi pemborosan pangan, serta mengonsumsi pangan yang beragam dan bergizi. Perubahan pola konsumsi ini tidak hanya berdampak pada kesehatan masyarakat, tetapi juga mendorong sistem produksi yang lebih berkelanjutan. Dengan meningkatnya permintaan terhadap produk lokal

dan ramah lingkungan, petani memiliki insentif untuk mengadopsi praktik pertanian yang lebih berkelanjutan.

Upaya transformasi sistem pangan menuju keberlanjutan juga menjadi perhatian global, termasuk oleh *Food and Agriculture Organization* dan *United Nations* melalui agenda *Sustainable Development Goals* (SDGs). Transformasi sistem pangan berkontribusi langsung terhadap beberapa tujuan pembangunan berkelanjutan, seperti penghapusan kelaparan, produksi dan konsumsi yang bertanggung jawab, serta aksi terhadap perubahan iklim. Oleh karena itu, diperlukan kolaborasi antara pemerintah, akademisi, sektor swasta, dan masyarakat untuk mewujudkan sistem pangan yang berkelanjutan.

Dengan transformasi sistem pangan menuju keberlanjutan, diharapkan tercipta sistem pangan yang mampu memenuhi kebutuhan generasi saat ini tanpa mengorbankan kemampuan generasi mendatang. Pendekatan ini tidak hanya meningkatkan ketahanan pangan, tetapi juga menjaga kelestarian lingkungan, memperkuat ekonomi lokal, serta meningkatkan kesejahteraan petani dan masyarakat secara keseluruhan.

Transformasi sistem pangan menuju keberlanjutan mencakup tiga dimensi utama yaitu lingkungan, ekonomi, dan social (Siregar, Wulandari and Retnaningsih, 2025). Dari sisi lingkungan, sistem pangan berkelanjutan menekankan pada praktik pertanian ramah lingkungan, konservasi sumber daya alam, serta pengurangan penggunaan bahan kimia. Dari sisi ekonomi, transformasi ini bertujuan meningkatkan kesejahteraan petani melalui harga yang adil, penguatan pasar lokal, dan pengembangan rantai nilai yang lebih pendek. Sementara dari sisi sosial, sistem pangan berkelanjutan berupaya meningkatkan akses masyarakat terhadap pangan sehat, memperkuat ketahanan pangan lokal, serta meningkatkan kesejahteraan petani dan masyarakat pedesaan.

Salah satu strategi utama dalam transformasi sistem pangan adalah penerapan pendekatan agroekologi. Pendekatan ini mengintegrasikan prinsip ekologi dalam sistem pertanian melalui diversifikasi tanaman, penggunaan pupuk organik, integrasi tanaman dan ternak, serta pengendalian hama secara alami. Menurut *High Level Panel of Experts on Food Security and Nutrition*, agroekologi merupakan pendekatan yang mampu meningkatkan ketahanan pangan sekaligus menjaga keberlanjutan lingkungan (Sudarsih and Susilowati, 2025). Selain itu, penguatan pasar lokal dan rantai pasok pendek juga menjadi strategi penting dalam

transformasi sistem pangan. Pasar lokal memungkinkan petani menjual produk secara langsung kepada konsumen, sehingga meningkatkan pendapatan petani sekaligus mengurangi jejak karbon akibat transportasi jarak jauh.

Digitalisasi juga berperan penting dalam transformasi sistem pangan modern. Teknologi digital memungkinkan petani memperoleh informasi harga secara *real-time*, memperluas akses pasar melalui *platform online*, serta meningkatkan efisiensi distribusi pangan. Selain itu, upaya pengurangan kehilangan dan pemborosan pangan juga menjadi bagian penting dari sistem pangan berkelanjutan. Hal ini dapat dilakukan melalui peningkatan teknologi pascapanen, penyimpanan yang lebih baik, pengolahan hasil pertanian, serta edukasi kepada konsumen untuk mengurangi pemborosan pangan. Upaya ini sejalan dengan tujuan pembangunan berkelanjutan yang dicanangkan oleh *United Nations* melalui *Sustainable Development Goals*.

BAB 14
TEKNOLOGI PERTANIAN BERBASIS AGROEKOLOGI

Pendahuluan: Dekonstruksi Paradigma dan Visi Baru Sistem Pangan

Agroekologi kini telah melampaui batas definisi sebagai sekadar kumpulan teknik budidaya konvensional; ia telah bertransformasi menjadi sebuah gerakan sistemik yang mengintegrasikan ilmu ekologi dengan keadilan sosial dan kedaulatan pangan global (Wezel et al., 2020; Altieri & Nicholls, 2020). Di tengah tekanan krisis iklim yang kian ekstrem dan degradasi lahan yang masif, paradigma ini menawarkan solusi teknologi yang tidak hanya berfokus pada output produktivitas kuantitatif, melainkan pada penguatan resiliensi ekosistem secara jangka panjang.

Sebagai akademisi di bidang pertanian, saya menekankan bahwa tantangan utama kita saat ini bukanlah ketiadaan teknologi, melainkan bagaimana menyelaraskan teknologi tersebut agar tidak bersifat eksploitatif. Selama beberapa dekade, Revolusi Hijau telah meninggalkan jejak ketergantungan pada input kimia yang merusak struktur tanah. Transisi menuju agroekologi menuntut apa yang saya sebut sebagai "Intensifikasi Ekologis", di mana kemajuan sains justru digunakan untuk memulihkan kapasitas regeneratif bumi. Bab ini akan membedah secara mendalam bagaimana integrasi solusi berbasis alam, digitalisasi presisi, dan inovasi sosial menjadi pilar utama dalam menciptakan model pertanian yang tangguh menghadapi fluktuasi lingkungan global.

14.1 Inovasi Teknologi dalam Kerangka Agroekologi

Inovasi dalam agroekologi saat ini sedang mengalami pergeseran paradigma yang fundamental, bergerak dari ketergantungan pada input kimia sintetis menuju optimalisasi siklus biologis alami melalui nature-based solutions (NbS). Selama beberapa dekade, pertanian konvensional cenderung menyederhanakan ekosistem melalui monokultur dan intervensi kimiawi masif demi mengejar efisiensi kuantitatif jangka pendek. Namun, inovasi agroekologi modern justru menghargai

dan memanfaatkan kompleksitas interaksi antar-spesies di dalam lahan sebagai mesin penggerak produktivitas. Strategi ini sama sekali tidak menolak kemajuan sains; sebaliknya, sains diarahkan secara presisi untuk memperkuat jasa ekosistem (ecosystem services). Hal ini mencakup mekanisme pengendalian hama hayati, restorasi siklus hidrologi, dan penambatan hara secara organik yang terbukti jauh lebih resilien dan berkelanjutan dibandingkan intervensi artifisial (Tamburini et al., 2020).

Sebagai akademisi yang bergelut di bidang pertanian, saya mencermati bahwa transisi menuju NbS merupakan jawaban krusial atas fenomena kelelahan lahan (soil fatigue) yang kian mengkhawatirkan di berbagai sentra produksi pangan di Indonesia. Penggunaan pupuk nitrogen dan pestisida sintetis yang tidak terkendali telah memutus rantai simbiosis alami di dalam tanah, menyisakan lahan yang "mati" secara biologis. Pemanfaatan teknologi dalam kerangka agroekologi memungkinkan kita untuk merekayasa lingkungan perakaran (rizosfer) dan arsitektur tajuk agar tanaman memiliki daya tahan intrinsik yang lebih tinggi terhadap cekaman biotik maupun abiotik. Melalui pendekatan ini, kita tidak hanya menekan biaya produksi secara signifikan akibat pengurangan pembelian input eksternal, tetapi juga sedang melakukan investasi jangka panjang untuk memulihkan kapasitas regeneratif tanah.

Tantangan terbesar dalam mengimplementasikan NbS di Indonesia adalah hambatan psikologis dan edukatif. Kita telah terbiasa dengan "pertanian instan" di mana setiap masalah diselesaikan dengan botol kimia. Padahal, masa depan kedaulatan pangan kita bergantung pada kemampuan kita mengelola keanekaragaman hayati sebagai aset produktif. Laboratorium pertanian kita harus mulai beralih fokus; dari sekadar menguji efikasi racun baru, menjadi pusat pengembangan konsorsium mikroba dan desain polikultur yang cerdas. Kita harus meyakinkan mahasiswa dan petani bahwa memelihara musuh alami dan meningkatkan bahan organik tanah adalah bentuk teknologi tinggi yang sebenarnya—sebuah kecerdasan ekologis yang akan menjaga tanah tetap subur untuk generasi mendatang.

Strategi diversifikasi dan penguatan jasa ekosistem ini secara empiris telah terbukti mampu menjaga stabilitas hasil panen sekaligus menekan degradasi lingkungan (Duru et al., 2016). Dengan mengintegrasikan sains modern ke dalam prinsip ekologi, agroekologi menawarkan jalan keluar dari jebakan ketergantungan input

yang selama ini menjerat petani kecil dalam kemiskinan sistemik. Restorasi biologis ini adalah aset utama bagi kedaulatan pangan nasional di masa depan yang penuh ketidakpastian iklim.

14.2 Pertanian Presisi dan Digitalisasi Lahan

14.2.1 Agroecology 4.0: Augmentasi Peran Manusia dalam Ekosistem Digital

Digitalisasi dalam ranah agroekologi, atau yang kini mulai dikenal secara global sebagai Agroecology 4.0, sering kali terjebak dalam miskonsepsi sebagai upaya otomatisasi total yang bertujuan menggantikan peran manusia di lahan. Sebaliknya, esensi fundamental dari teknologi ini bukanlah substitusi tenaga kerja, melainkan sebagai instrumen augmentasi intelektual yang menyediakan data presisi bagi petani untuk mengambil keputusan strategis yang berorientasi pada keseimbangan ekologi (Bellon-Maurel & Huyghe, 2017). Pertanian presisi dalam konteks agroekologi bertujuan untuk meminimalisir intervensi eksternal melalui pemahaman mendalam terhadap heterogenitas lahan.

Dengan integrasi data sensorik, petani tidak lagi terjebak dalam praktik pemupukan secara buta (blanket application) yang sering kali menyebabkan pencemaran lingkungan akibat lindi hara. Digitalisasi memungkinkan penerapan Variable Rate Application (VRT), di mana input diberikan secara spesifik berdasarkan kebutuhan nutrisi setiap jengkal tanah yang terekam oleh sensor. Pendekatan ini secara drastis mengurangi inefisiensi dan emisi gas rumah kaca tanpa mengorbankan produktivitas (Klerkx & Rose, 2020). Teknologi digital di sini bertindak sebagai "mata" dan "telinga" bagi petani, memperkuat intuisi tradisional mereka dengan bukti empiris yang akurat.

Pandangan Dosen Pertanian: Selaku pengajar di Fakultas Pertanian, saya sering menekankan kepada mahasiswa bahwa digitalisasi pertanian bukan berarti mengubah petani menjadi operator mesin yang pasif. Sebaliknya, Agroecology 4.0 menuntut petani untuk menjadi "Manajer Ekosistem" yang cerdas. Data yang dihasilkan oleh sensor-sensor di lahan harus dibaca sebagai bahasa alam yang diterjemahkan secara digital. Keahlian utama petani masa depan bukan lagi sekadar kemampuan fisik dalam mengolah tanah, melainkan kemampuan kognitif dalam menginterpretasikan data untuk menjaga kesehatan tanah jangka panjang. Inilah esensi dari modernisasi pertanian yang tetap memanusiakan pelakunya.

Tabel 14.1: Perbandingan Efisiensi Input Pertanian Digital vs Konvensional

Parameter	Konvensional	Digital Agroekologi	Dampak Ekologis
Penggunaan Air	Tinggi (Banjir)	Rendah (Presisi)	Konservasi Air Tanah
Aplikasi Pupuk	Seragam (Broadcast)	Variabel (VRT)	Minim Pencemaran Nitrat
Pengendalian Hama	Kalender Semprot	Berbasis Ambang Ekonomi	Proteksi Polinator

14.2.2 Demokratisasi IoT untuk Petani Kecil: Menuju Inklusivitas Teknologi

Hambatan klasik yang selalu muncul dalam adopsi teknologi tinggi di negara berkembang adalah tingginya biaya investasi awal. Namun, tren terbaru menunjukkan adanya demokratisasi teknologi melalui pengembangan perangkat sensor tanah berbasis Internet of Things (IoT) berbiaya rendah (low-cost IoT). Inovasi ini telah membuka peluang baru bagi petani kecil di Indonesia untuk beralih dari praktik konvensional menuju sistem yang lebih efisien. Di lahan sayuran dataran tinggi, misalnya, implementasi sistem irigasi tetes otomatis yang dikendalikan oleh sensor kelembapan tanah telah terbukti secara empiris mampu menghemat penggunaan air hingga 60% (Luan et al., 2023).

Keberhasilan ini memberikan dampak ekonomi langsung melalui penghematan biaya input sumber daya (air dan energi pompa) serta pengurangan tenaga kerja untuk penyiraman manual. Lebih dari sekadar efisiensi, digitalisasi di tingkat petani kecil merupakan langkah nyata menuju inklusivitas teknologi, di mana kecanggihan sains tidak lagi menjadi monopoli korporasi besar. Dengan akses terhadap data mikroklimat dan kondisi tanah secara real-time, petani kecil memiliki daya tawar yang lebih kuat dalam menghadapi ketidakpastian iklim yang kian ekstrem.

Tabel 14.2: Matriks Perbandingan Efisiensi Operasional
(Penerapan Irigasi Tetes Berbasis IoT)

Parameter	Sistem Konvensional	Sistem Berbasis IoT	Persentase Efisiensi
Konsumsi Air	1.200	480	60%
Biaya Energi (Listrik/ BBM)	Tinggi	Rendah (Otomatisasi)	45%
Ketepatan Waktu Siram	Tergantung SDM	Berbasis Kebutuhan Tanaman	Sangat Tinggi
Resiko Penyati (Kelembapan)	Fluktuasi	Terkontrol	Penurunan 25%

Dalam berbagai kunjungan lapangan bahwa petani kecil kita sebenarnya sangat haus akan inovasi, asalkan teknologi tersebut "membumi" artinya murah dan mudah dirawat. Pengembangan IoT lokal adalah kunci. Kita tidak perlu mengimpor sistem mahal jika teknisi lokal dan mahasiswa kita bisa merakit sensor serupa dengan biaya sepersepuluhnya. Tugas kita di universitas adalah memastikan bahwa digitalisasi ini tidak menciptakan kesenjangan baru, melainkan menjadi alat pemberdayaan yang merata. Teknologi harus menjadi kawan, bukan beban biaya baru bagi petani.

14.3 Bioteknologi Ramah Lingkungan dalam Produksi Pangan

Bioteknologi dalam kerangka agroekologi telah mengalami pergeseran paradigma yang fundamental, bergerak dari fokus pada modifikasi genetik invasif menuju penguatan fungsi ekologis yang telah ada di alam. Pendekatan ini mengedepankan sinergi antara tanaman dan mikroorganisme untuk menciptakan sistem produksi pangan yang resilien dan berkelanjutan tanpa mengompromikan integritas genetik lokal.

14.3.1 Pemanfaatan Mikrobioma Tanah sebagai Pengganti Input Sintetis

Pilar utama bioteknologi ramah lingkungan adalah optimalisasi mikrobioma tanah sebagai stimulan pertumbuhan alami (bio-stimulant). Fokus utamanya terletak pada pemetaan dan inokulasi mikroba di area rizosfer yaitu zona tanah yang dipengaruhi oleh eksudat akar. Hal ini berfungsi untuk memperkuat interaksi biologis yang

menguntungkan. Melalui teknik non-transgenik, ilmuwan dapat mengidentifikasi konsorsium mikroba yang mampu meningkatkan ketersediaan nutrisi esensial. Mikroba seperti Rhizobium dan bakteri pelarut fosfat bekerja secara alami untuk menambat nitrogen dari udara dan mengubah fosfat tak larut menjadi bentuk yang tersedia bagi tanaman (Timmis et al., 2019). Strategi ini secara efektif mengurangi ketergantungan pada pupuk kimia sintetis yang selama ini menjadi sumber emisi gas rumah kaca dan degradasi struktur tanah.

14.3.2 Penerapan Mikroba Endofit pada Padi Lokal di Indonesia

Di Indonesia, implementasi bioteknologi ini menemukan momentumnya melalui pemanfaatan mikroba endofit, yaitu mikroorganisme yang hidup di dalam jaringan internal tanaman tanpa menyebabkan gejala penyakit. Temuan intensif pada berbagai varietas padi lokal menunjukkan bahwa inokulasi endofit spesifik mampu memicu respons fisiologis tanaman untuk lebih efisien dalam manajemen air. Mekanisme ini melibatkan peningkatan luas permukaan akar dan akumulasi osmolit yang membantu tanaman mempertahankan turgor sel. Rujukan empiris menunjukkan bahwa aplikasi endofit mampu meningkatkan ambang ketahanan padi terhadap cekaman kekeringan hingga mencapai 30% (Santi *et al*., 2022). Hal ini sangat penting bagi kedaulatan pangan nasional, karena memungkinkan petani di lahan tadah hujan tetap produktif meskipun menghadapi anomali cuaca yang semakin sulit diprediksi.

Selaku akademisi, saya memandang bahwa pemanfaatan mikrobioma dan endofit merupakan bentuk "asuransi biologis" bagi petani kecil kita. Selama beberapa dekade, pendidikan pertanian kita terlalu terfokus pada solusi struktural yang mahal seperti pembangunan bendungan besar. Sudah saatnya kita mengajarkan mahasiswa bahwa kecerdasan biologis yang tersimpan dalam tanah Indonesia jauh lebih bernilai. Dengan memperkuat simbiosis alami ini, kita tidak hanya memperbaiki hasil panen, tetapi juga merestorasi "kesehatan" tanah yang telah lelah akibat paparan zat kimia selama bertahun-tahun. Ini adalah jalan menuju kedaulatan input pertanian, di mana petani tidak lagi menjadi konsumen akhir rantai kimia industri, melainkan manajer ekosistem yang mandiri.

14.4 Teknologi Fermentasi dan Pengolahan Pupuk Organik

Teknologi fermentasi dalam kerangka agroekologi merupakan manifestasi nyata dari prinsip ekonomi sirkular (circular economy), di mana limbah organik tidak lagi dipandang sebagai residu pencemar, melainkan sebagai bahan baku strategis yang kaya akan energi dan nutrisi. Transformasi limbah melalui proses biologis terkendali ini memungkinkan terciptanya sistem pertanian tertutup (closed-loop system) yang meminimalkan kebocoran nutrisi ke lingkungan.

14.4.1 Konversi Limbah menjadi Bio-Slurry Premium

Teknologi fermentasi, khususnya melalui sistem anaerobic digester, merupakan inti dari pengelolaan limbah ternak yang cerdas. Limbah kotoran ternak yang jika dibiarkan akan melepaskan gas metana—salah satu gas rumah kaca dengan potensi pemanasan global 25 kali lebih kuat dari CO_2—dapat dikonversi menjadi energi biogas dan pupuk organik cair berkualitas tinggi. Produk akhir dari proses ini, yang dikenal sebagai bio-slurry, memiliki karakteristik keunggulan yang tidak dimiliki oleh pupuk kandang mentah.

Observasi di wilayah sentra peternakan seperti Sulawesi Utara menunjukkan bahwa bio-slurry hasil fermentasi anaerobik mengandung konsentrasi hara makro yang lebih stabil dan siap serap. Selain aspek nutrisi mineral, keunggulan utama bio-slurry terletak pada kandungan fitohormon alami seperti auksin, sitokinin, dan giberelin yang terbentuk selama proses metabolisme mikrobia (Zulfiqar et al., 2021). Hormon-hormon ini berperan krusial dalam menstimulasi pembelahan sel dan pemanjangan akar secara progresif, sehingga tanaman memiliki sistem perakaran yang lebih luas untuk mengeksplorasi sumber hara di dalam tanah.

14.4.2 Restorasi Lahan yang Mengalami Kelelahan Hara

Aplikasi hasil fermentasi ini jauh melampaui sekadar penyediaan nutrisi bagi tanaman; ia berfungsi sebagai agen restorasi bagi lahan yang telah mengalami kelelahan hara (soil fatigue). Penggunaan urea dan pupuk kimia sintetis secara monokultur dalam jangka panjang telah menyebabkan tanah menjadi "bantat" atau padat, kehilangan porositas, dan mengalami penurunan biodiversitas mikroba yang drastis. Proses fermentasi anaerobik memastikan bahwa hara dalam limbah berada dalam bentuk terlarut yang mudah diabsorpsi oleh tanaman, sekaligus membawa muatan mikrobia fungsional ke dalam tanah.

Menurut Wezel et al. (2020), bio-slurry berperan dalam menekan pertumbuhan patogen tular tanah (soil-borne pathogens) melalui mekanisme kompetisi biotik dan antibiosis. Keberadaan mikroba antagonis dalam hasil fermentasi menciptakan lingkungan yang tidak kondusif bagi perkembangan jamur atau bakteri patogen. Secara fisik, bahan organik yang telah terdekomposisi sempurna dalam bio-slurry membantu pembentukan agregat tanah, meningkatkan kapasitas tukar kation (KTK), dan memperbaiki daya pegang air (water holding capacity).

Implementasi teknologi ini di tingkat desa menciptakan kedaulatan input pertanian yang signifikan. Sebagaimana ditegaskan oleh Vermue et al. (2023), kemandirian dalam memproduksi pupuk organik berkualitas tinggi dapat memutus rantai ketergantungan petani terhadap fluktuasi harga pupuk kimia dunia yang kian tidak menentu akibat dinamika geopolitik global.

Perlu ditekankan bahwa tanah adalah entitas hidup, bukan sekadar media tanam yang pasif. Teknologi fermentasi adalah cara kita memberi "nutrisi hidup" kembali ke dalam tanah. Di Sulawesi Utara, potensi limbah ternak dan sisa pertanian sangat melimpah, namun seringkali terbuang sia-sia menjadi polutan. Dengan sistem anaerobic digester, kita melakukan dua hal besar sekaligus: memitigasi emisi gas rumah kaca dan membangun pabrik pupuk mandiri di setiap rumah tangga tani. Ini bukan sekadar tentang efisiensi biaya, melainkan tentang martabat petani yang tidak lagi didikte oleh harga input industri, melainkan berdaulat atas sumber daya organiknya sendiri.

14.5 Penerapan Teknologi Tepat Guna untuk Petani Kecil

14.5.1 Inklusivitas Teknologi Tepat Guna (TTG)

Implementasi Teknologi Tepat Guna (TTG) dalam paradigma agroekologi menuntut pemenuhan kriteria fundamental yang mencakup keterjangkauan ekonomi, kemudahan pemeliharaan secara mandiri, serta optimalisasi sumber daya lokal. TTG dirancang sebagai instrumen emansipatoris yang memungkinkan petani kecil untuk meningkatkan produktivitas tanpa terjebak dalam siklus utang akibat ketergantungan pada modal besar. Secara sosiopolitik, redistribusi modal teknologi ini menjadi krusial untuk memperbaiki ketimpangan struktur agraria global, di mana akses terhadap inovasi sering kali tersentralisasi pada korporasi besar yang cenderung meminggirkan peran petani swadaya (Lowder et al., 2021). Inklusivitas

teknologi memastikan bahwa kemajuan mekanisasi tidak menciptakan jurang ekonomi baru, melainkan menjadi alat pemerataan kesejahteraan di pedesaan.

Dalam perspektif teknis yang lebih mendalam, keberhasilan TTG sangat ditentukan oleh prinsip options-by-context, di mana teknologi harus mampu beradaptasi dengan heterogenitas lingkungan dan sosial setempat. Inovasi yang bersifat top-down dan seragam sering kali gagal karena mengabaikan keterbatasan infrastruktur dan kapasitas teknis petani di lapangan. Oleh karena itu, pengembangan TTG kini mulai beralih pada sistem open-source dan pemanfaatan material lokal yang memungkinkan petani melakukan perbaikan secara mandiri tanpa harus bergantung pada teknisi luar (Sinclair & Coe, 2019). Pendekatan ini tidak hanya menekan biaya operasional, tetapi juga menumbuhkan rasa kepemilikan dan inovasi di tingkat akar rumput, yang merupakan pilar utama dari kedaulatan teknologi petani.

Pandangan Dosen Pertanian: Selaku pengajar di Fakultas Pertanian, saya selalu menekankan kepada mahasiswa bahwa kecanggihan sebuah alat tidak diukur dari kerumitan komponennya, melainkan dari sejauh mana alat tersebut relevan dan dapat dioperasikan oleh petani kita di desa. Di Sulawesi Utara, misalnya, kita tidak butuh traktor raksasa yang mahal jika medan lahannya berbukit dan sempit; kita butuh inovasi mekanisasi skala mikro yang bisa dirawat dengan peralatan bengkel desa. TTG harus menjadi solusi yang "membumi". Tugas universitas adalah mendesain teknologi yang mampu menurunkan beban kerja fisik petani tanpa mencabut mereka dari kemandirian modalnya. Inilah esensi dari teknologi yang memanusiakan petani.

Secara sistemik, inklusivitas TTG berperan sebagai jaring pengaman ekonomi yang memperkuat resiliensi petani terhadap fluktuasi pasar global. Dengan mengurangi ketergantungan pada input eksternal yang harganya sering kali tidak menentu, petani memiliki kendali penuh atas proses produksi mereka. Menurut Vermue et al. (2023), inovasi agroekologi yang sukses adalah inovasi yang mampu mengintegrasikan kearifan lokal dengan sentuhan sains modern sehingga menciptakan efisiensi yang berkeadilan. Dengan demikian, TTG bukan sekadar alat mekanis sederhana, melainkan sebuah strategi politik ekonomi untuk mendesentralisasi kekuatan produksi pangan ke tangan rakyat, menciptakan sistem pangan yang lebih demokratis dan resilien menghadapi tantangan masa depan.

14.5.2 Regenerasi dan Diseminasi Digital: Peran Petani Milenial sebagai Katalisator

Keberhasilan transisi menuju pertanian berbasis teknologi tepat guna di Indonesia tidak hanya bergantung pada ketersediaan alat, tetapi sangat ditentukan oleh kehadiran "Petani Milenial" sebagai penggerak utama. Di era Agroecology 4.0, regenerasi petani bukan sekadar isu demografis, melainkan kebutuhan mendesak untuk mengisi celah literasi teknologi di perdesaan. Kelompok generasi muda ini memiliki fleksibilitas kognitif dan literasi digital yang memungkinkan mereka mengoperasikan aplikasi kompleks, mulai dari sistem manajemen risiko iklim berbasis satelit hingga platform pemantauan harga pasar secara real-time. Keahlian teknis ini menjadi krusial untuk meningkatkan nilai tawar kolektif petani di tengah rantai pasok global yang semakin terdigitalisasi (Klerkx & Rose, 2020).

Proses diseminasi teknologi di tingkat desa sering kali menghadapi hambatan sosio-psikologis berupa resistensi dari petani senior terhadap inovasi yang dianggap asing. Dalam konteks ini, Petani Milenial berperan sebagai "penerjemah budaya" atau jembatan komunikasi. Mereka mampu menyederhanakan kompleksitas data analitik menjadi bahasa praktik yang aplikatif dan mudah diterima oleh petani senior. Rujukan dari (Rose & Chilvers, 2018) menunjukkan bahwa adopsi teknologi digital di pedesaan meningkat secara signifikan ketika alih pengetahuan dilakukan melalui pendampingan sebaya (*peer-to-peer learning*) yang melibatkan generasi muda lokal sebagai aktor utama. Mekanisme ini memastikan bahwa kearifan lokal yang dimiliki petani senior tidak hilang, melainkan diperkuat dengan akurasi data digital.

Pandangan Dosen Pertanian: Selaku akademisi, saya melihat mahasiswa pertanian kita adalah aset strategis nasional yang sering kali belum dioptimalkan perannya. Mahasiswa bukan sekadar pencari kerja di sektor korporasi, melainkan agen perubahan yang harus kembali ke desa dengan membawa kedaulatan data. Di ruang kuliah, kita mengajarkan mereka algoritma dan sensor, namun di lapangan, mereka harus mampu merangkul petani senior dengan empati. Saya selalu menekankan bahwa teknologi tanpa sentuhan sosial adalah alat yang hampa. Keberhasilan seorang sarjana pertanian diukur dari sejauh mana ia mampu membuat petani di desanya lebih berdaya dan tidak lagi tertinggal oleh informasi pasar. Literasi digital mahasiswa adalah "senjata" untuk melawan eksploitasi tengkulak dan ketidakpastian iklim.

Secara sistemik, diseminasi digital yang dipelopori oleh generasi muda mampu menciptakan ekosistem pertanian yang lebih transparan dan inklusif. Menurut Long et al. (2016), keberlanjutan inovasi pertanian digital sangat bergantung pada kapasitas aktor lokal untuk mengelola dan memodifikasi teknologi sesuai dengan konteks lingkungan mereka (options-by-context). Dengan keterlibatan aktif Petani Milenial, teknologi tidak lagi menjadi barang impor yang kaku, melainkan menjadi alat yang dinamis dan adaptif. Upaya regenerasi ini pada akhirnya akan memperkuat jaring pengaman sosial ekonomi di perdesaan, memastikan bahwa transformasi digital pertanian tetap berakar pada keadilan sosial dan keberlanjutan ekologi.

BAB 15
KEBIJAKAN DAN TATA KELOLA AGROEKOLOGI

15.1 Kebijakan Pertanian Nasional dalam Perspektif Agroekologi

Transformasi sistem pertanian menjadi lebih berkelanjutan menuntut perubahan mendasar dalam arah kebijakan nasional yang selama ini cenderung berorientasi pada produktivitas semata. Pendekatan agroekologi hadir sebagai alternatif yang menyeimbangkan aspek ekologis, sosial, dan ekonomi secara terpadu. Kebijakan pertanian tidak lagi hanya berfokus pada peningkatan hasil, tetapi juga menjaga keberlanjutan sumber daya alam, memperkuat kemandirian petani, serta membangun sistem pangan yang resilien terhadap perubahan iklim dan dinamika global.

15.1.1 Paradigma Agroekologi dalam Kebijakan Pertanian Nasional

Paradigma agroekologi dalam kebijakan pertanian nasional berkembang sebagai respons terhadap keterbatasan pendekatan pertanian konvensional yang cenderung eksploitatif terhadap sumber daya alam. Pendekatan ini menempatkan ekosistem sebagai fondasi utama dalam praktik pertanian, sehingga setiap kebijakan yang dirumuskan selain berfokus pada peningkatan produksi, juga menjaga keseimbangan lingkungan. Pemerintah mulai mengadopsi konsep ini melalui berbagai kebijakan strategis yang menekankan pentingnya keberlanjutan, efisiensi sumber daya, serta perlindungan biodiversitas. Perubahan paradigma ini juga mencerminkan kesadaran bahwa keberhasilan sektor pertanian tidak dapat diukur semata dari output ekonomi, tetapi juga dari dampak jangka panjang terhadap lingkungan dan masyarakat.

Penerapan paradigma agroekologi dalam kebijakan nasional memerlukan integrasi lintas sektor yang kuat, mengingat pertanian berkaitan erat dengan aspek lingkungan, sosial, dan ekonomi. Kebijakan yang efektif harus mampu mengakomodasi kebutuhan petani kecil, menjaga keseimbangan ekosistem, serta mendukung ketahanan pangan nasional. Proses ini melibatkan berbagai aktor, termasuk pemerintah pusat, lembaga keilmuan, organisasi petani, dan sektor swasta. Sinergi antarpihak menjadi kunci dalam memastikan bahwa prinsip agroekologi tidak hanya menjadi wacana, tetapi juga benar-benar diterapkan dalam praktik pertanian.

Pendekatan agroekologi juga mendorong perubahan dalam cara pandang terhadap teknologi pertanian. Teknologi tidak lagi dipandang sebagai alat untuk meningkatkan produksi semata, tetapi sebagai sarana untuk mendukung keberlanjutan ekosistem. Inovasi yang dikembangkan harus selaras dengan prinsip-prinsip agroekologi, seperti penggunaan input alami, diversifikasi tanaman, dan pengelolaan sumber daya secara efisien. Kebijakan nasional berperan penting dalam mendorong temuan dan pengembangan teknologi yang sesuai dengan kebutuhan tersebut, sekaligus memastikan akses petani terhadap inovasi yang dihasilkan.

Penguatan paradigma agroekologi dalam kebijakan pertanian nasional juga menghadapi berbagai tantangan, termasuk resistensi terhadap perubahan, keterbatasan sumber daya, dan kurangnya pemahaman di tingkat pelaksana. Upaya edukasi dan sosialisasi menjadi sangat penting untuk meningkatkan kesadaran dan kapasitas para pemangku kepentingan. Pemerintah perlu memastikan bahwa kebijakan yang dirumuskan didukung oleh sistem implementasi yang kuat, termasuk mekanisme monitoring dan evaluasi yang efektif. Pendekatan yang komprehensif dan berkelanjutan akan memastikan bahwa paradigma agroekologi dapat diintegrasikan secara optimal dalam sistem pertanian nasional.

15.1.2 Integrasi Prinsip Agroekologi dalam Perencanaan Pertanian

Integrasi prinsip agroekologi dalam perencanaan pertanian merupakan langkah strategis untuk memastikan keberlanjutan sistem pertanian dalam jangka panjang. Perencanaan yang berbasis agroekologi menekankan pentingnya memahami karakteristik lokal, termasuk kondisi tanah, iklim, dan keanekaragaman hayati. Pendekatan ini memungkinkan pengembangan sistem pertanian yang lebih adaptif dan resilien terhadap perubahan lingkungan. Kebijakan nasional harus mampu

mengakomodasi keragaman kondisi tersebut melalui perencanaan yang fleksibel dan berbasis data yang akurat.

Perencanaan pertanian berbasis agroekologi juga menuntut adanya partisipasi aktif dari berbagai pemangku kepentingan, terutama petani sebagai pelaku utama. Proses perencanaan tidak lagi bersifat top-down, tetapi lebih partisipatif dan inklusif. Keterlibatan petani dalam perumusan kebijakan akan memastikan bahwa program yang dirancang sesuai dengan kebutuhan dan kondisi di lapangan. Pendekatan ini juga meningkatkan rasa memiliki terhadap kebijakan yang dihasilkan, sehingga implementasinya menjadi lebih efektif dan berkelanjutan.

Pengintegrasian prinsip agroekologi dalam perencanaan juga mencakup pengelolaan sumber daya secara holistik. Tanah, air, dan biodiversitas diperlakukan sebagai satu kesatuan yang saling terkait, sehingga pengelolaannya harus dilakukan secara terpadu. Kebijakan nasional perlu mendorong praktik-praktik pertanian yang mendukung konservasi sumber daya, seperti rotasi tanaman, agroforestri, dan penggunaan pupuk organik. Pendekatan ini selain meningkatkan produktivitas, juga menjaga keberlanjutan ekosistem pertanian.

Tantangan dalam integrasi prinsip agroekologi dalam perencanaan pertanian meliputi keterbatasan data, kapasitas kelembagaan, dan koordinasi antarsektor. Pemerintah perlu memperkuat sistem informasi pertanian untuk mendukung perencanaan yang berbasis bukti. Selain itu, peningkatan kapasitas sumber daya manusia dan kelembagaan menjadi faktor kunci dalam memastikan keberhasilan implementasi. Koordinasi yang efektif antarsektor juga diperlukan untuk menghindari tumpang tindih kebijakan dan memastikan sinergi dalam pelaksanaan program.

15.1.3 Tantangan Implementasi Kebijakan Agroekologi di Tingkat Nasional

Implementasi kebijakan agroekologi di tingkat nasional menghadapi berbagai tantangan yang kompleks dan multidimensional yang tidak dapat diselesaikan melalui pendekatan tunggal. Perbedaan kondisi geografis, sosial, dan ekonomi antarwilayah menjadi salah satu faktor yang memengaruhi efektivitas kebijakan secara signifikan dalam praktiknya. Kebijakan yang bersifat umum sering kali sulit diterapkan secara optimal di tingkat lokal tanpa adanya penyesuaian yang memadai terhadap karakteristik wilayah. Kondisi agroekosistem yang berbeda menuntut

adanya fleksibilitas dalam perumusan dan implementasi kebijakan. Pemerintah perlu mengembangkan pendekatan yang lebih kontekstual untuk memastikan bahwa kebijakan agroekologi dapat diimplementasikan secara efektif di berbagai wilayah dengan mempertimbangkan kondisi lokal, kearifan tradisional, serta kapasitas masyarakat setempat dalam mengadopsi inovasi yang berkelanjutan.

Keterbatasan sumber daya, baik dari segi pendanaan maupun sumber daya manusia, juga menjadi kendala utama dalam implementasi kebijakan agroekologi secara nasional. Program-program yang mendukung agroekologi sering kali memerlukan investasi awal yang cukup besar, sementara manfaatnya baru dapat dirasakan dalam jangka panjang sehingga kurang menarik dalam perencanaan anggaran jangka pendek. Hal ini menjadi tantangan bagi pemerintah dalam mengalokasikan anggaran secara efektif dan berkelanjutan. Selain itu, kurangnya tenaga ahli yang memahami konsep agroekologi secara komprehensif juga menghambat proses implementasi di lapangan. Keterbatasan kapasitas penyuluh pertanian dalam mentransformasikan pengetahuan kepada petani turut memperlambat adopsi praktik agroekologi secara luas dan konsisten di berbagai wilayah.

Aspek kelembagaan juga memainkan peran penting dalam keberhasilan implementasi kebijakan agroekologi, terutama dalam hal koordinasi dan integrasi program lintas sektor. Koordinasi antar lembaga pemerintah yang belum optimal sering kali menyebabkan tumpang tindih program serta inefisiensi dalam penggunaan sumber daya yang tersedia. Fragmentasi kebijakan antara sektor pertanian, lingkungan, dan pembangunan daerah menjadi salah satu hambatan struktural yang cukup serius. Penguatan kelembagaan menjadi sangat penting untuk memastikan bahwa kebijakan yang dirumuskan dapat diimplementasikan secara efektif dan berkelanjutan. Pemerintah perlu membangun sistem koordinasi yang lebih baik serta memperjelas peran dan tanggung jawab masing-masing lembaga agar tercipta sinergi dalam pelaksanaan kebijakan agroekologi secara nasional.

Perubahan perilaku dan pola pikir juga menjadi tantangan krusial dalam implementasi kebijakan agroekologi karena berkaitan langsung dengan praktik sehari-hari petani. Petani yang telah lama terbiasa dengan praktik pertanian konvensional cenderung memiliki ketergantungan terhadap input kimia dan metode intensifikasi yang kurang ramah lingkungan. Kondisi ini menyebabkan

adanya resistensi terhadap perubahan menuju pendekatan agroekologi yang dianggap lebih kompleks dan membutuhkan proses adaptasi. Edukasi dan pendampingan menjadi kunci dalam mengatasi tantangan ini secara berkelanjutan. Pemerintah perlu mengembangkan program pelatihan dan penyuluhan yang efektif, partisipatif, serta berbasis kebutuhan lokal untuk meningkatkan pemahaman dan kapasitas petani dalam menerapkan prinsip agroekologi sehingga transformasi menuju sistem pertanian berkelanjutan dapat terjadi secara bertahap dan konsisten.

15.2 Regulasi dan Insentif untuk Pertanian Berkelanjutan

Transformasi sektor pertanian menuju keberlanjutan menuntut kerangka regulasi yang adaptif dan insentif yang mampu mendorong perubahan perilaku pelaku usaha tani. Pendekatan agroekologi menghadirkan keseimbangan antara produktivitas, kelestarian lingkungan, dan kesejahteraan sosial. Keterpaduan kebijakan menjadi fondasi penting agar praktik pertanian selain berorientasi pada hasil jangka pendek, juga keberlanjutan jangka panjang yang berdampak luas bagi sistem pangan dan ekosistem.

15.2.1 Kerangka Regulasi Pertanian Berkelanjutan

Kerangka regulasi pertanian berkelanjutan merupakan instrumen utama dalam mengarahkan transformasi sistem produksi pangan menuju praktik yang lebih ramah lingkungan dan berkeadilan sosial. Regulasi tersebut mencakup berbagai kebijakan yang mengatur penggunaan lahan, pengelolaan sumber daya alam, distribusi input pertanian, serta perlindungan terhadap ekosistem pertanian. Pemerintah memiliki peran strategis dalam merumuskan regulasi yang tidaklah bersifat normatif, tetapi juga operasional sehingga dapat diimplementasikan secara efektif oleh petani dan pelaku agribisnis. Kejelasan aturan menjadi faktor penting dalam menciptakan kepastian hukum serta mendorong investasi pada sektor pertanian berkelanjutan. Regulasi yang baik harus mampu mengintegrasikan prinsip agroekologi seperti diversifikasi tanaman, pengurangan penggunaan bahan kimia sintetis, serta konservasi keanekaragaman hayati dalam setiap aspek kebijakan pertanian nasional.

Pendekatan regulasi yang efektif memerlukan koordinasi lintas sektor yang kuat antara kementerian, lembaga pemerintah, dan otoritas daerah. Integrasi kebijakan menjadi penting karena sektor pertanian memiliki keterkaitan erat dengan sektor lingkungan, perdagangan, dan industri. Regulasi yang tidak terkoordinasi dapat menimbulkan tumpang tindih kebijakan yang justru menghambat implementasi pertanian berkelanjutan. Mekanisme pengawasan dan evaluasi juga harus menjadi bagian integral dari kerangka regulasi agar setiap kebijakan dapat diukur keberhasilannya secara berkala. Transparansi dalam penyusunan regulasi akan meningkatkan partisipasi publik dan memperkuat legitimasi kebijakan yang dihasilkan. Partisipasi petani sebagai aktor utama dalam sistem pertanian menjadi kunci agar regulasi yang dibuat benar-benar sesuai dengan kebutuhan di lapangan.

Kualitas implementasi regulasi sangat bergantung pada kapasitas kelembagaan serta sumber daya manusia yang terlibat dalam pelaksanaannya. Aparatur pemerintah yang memahami prinsip agroekologi akan lebih mampu menerjemahkan kebijakan ke dalam program nyata yang aplikatif. Ketersediaan pedoman teknis yang jelas juga menjadi faktor penting dalam menghindari interpretasi yang berbeda di tingkat daerah. Penguatan kapasitas melalui pelatihan dan pendidikan menjadi langkah strategis untuk memastikan bahwa regulasi tidaklah berhenti pada tataran dokumen, tetapi benar-benar dijalankan secara konsisten. Dukungan teknologi informasi juga dapat meningkatkan efisiensi pelaksanaan regulasi melalui sistem monitoring yang terintegrasi.

Dinamika global dan perubahan iklim turut memengaruhi arah pengembangan regulasi pertanian berkelanjutan. Kebijakan yang adaptif diperlukan untuk merespons tantangan seperti degradasi lahan, krisis air, serta fluktuasi harga komoditas. Regulasi yang terlalu kaku berpotensi menghambat inovasi, sehingga diperlukan fleksibilitas dalam penerapannya tanpa mengurangi prinsip keberlanjutan. Pemerintah perlu mendorong inovasi teknologi pertanian yang selaras dengan konsep agroekologi melalui regulasi yang mendukung pemahaman dan pengembangan. Harmonisasi antara regulasi nasional dan standar internasional juga menjadi penting agar produk pertanian dapat bersaing di pasar global tanpa mengorbankan prinsip keberlanjutan yang telah diterapkan di tingkat domestik (Ujj *et al.*, 2025).

15.2.2 Skema Insentif Ekonomi bagi Petani Agroekologi

Insentif ekonomi menjadi salah satu strategi yang efektif dalam mendorong petani untuk mengadopsi praktik agroekologi secara lebih luas. Perubahan sistem pertanian sering kali memerlukan biaya awal yang tidak sedikit, sehingga dukungan finansial menjadi faktor penentu dalam proses transisi tersebut. Insentif dapat diberikan dalam berbagai bentuk, seperti subsidi input ramah lingkungan, bantuan teknis, akses kredit berbunga rendah, serta jaminan harga produk. Kebijakan insentif yang dirancang dengan baik mampu mengurangi risiko yang dihadapi petani sekaligus meningkatkan daya tarik praktik pertanian berkelanjutan. Pendekatan ini selain memberi manfaat ekonomi jangka pendek, juga menciptakan dampak positif jangka panjang terhadap lingkungan dan ketahanan pangan.

Desain skema insentif harus mempertimbangkan karakteristik lokal serta kebutuhan spesifik petani di berbagai wilayah. Kebijakan yang bersifat seragam sering kali tidak efektif karena perbedaan kondisi agroekosistem dan sosial ekonomi masyarakat. Pemerintah perlu melakukan pemetaan kebutuhan secara komprehensif agar insentif yang diberikan benar-benar tepat sasaran. Kolaborasi dengan lembaga keuangan, organisasi nonpemerintah, serta sektor swasta dapat memperluas jangkauan program insentif dan meningkatkan efektivitas implementasinya. Transparansi dalam penyaluran insentif menjadi faktor penting untuk mencegah penyalahgunaan serta memastikan bahwa manfaatnya dirasakan langsung oleh petani yang berkomitmen pada praktik agroekologi.

Efektivitas insentif juga dipengaruhi oleh mekanisme distribusi dan kemudahan akses bagi petani. Sistem birokrasi yang rumit dapat menjadi hambatan utama dalam pemanfaatan insentif, terutama bagi petani kecil yang memiliki keterbatasan informasi dan sumber daya. Penyederhanaan prosedur serta pemanfaatan teknologi digital dalam penyaluran bantuan dapat meningkatkan efisiensi dan inklusivitas program. Pendampingan teknis menjadi aspek penting agar petani selain menerima insentif, tetapi juga mampu menggunakannya secara optimal untuk meningkatkan produktivitas dan keberlanjutan usaha tani. Integrasi antara insentif finansial dan peningkatan kapasitas akan menghasilkan dampak yang lebih signifikan daripada pendekatan yang parsial.

Keberlanjutan program insentif menjadi tantangan tersendiri dalam implementasi kebijakan pertanian berkelanjutan. Ketergantungan yang berlebihan terhadap subsidi dapat menimbulkan distorsi pasar jika tidak dikelola dengan baik. Pendekatan yang lebih strategis adalah mengarahkan insentif sebagai pemicu awal transformasi, kemudian secara bertahap mendorong kemandirian petani melalui peningkatan kapasitas dan akses pasar. Pengembangan rantai nilai produk agroekologi menjadi penting agar petani dapat memperoleh nilai tambah yang lebih tinggi dari hasil produksinya. Insentif yang terintegrasi dengan penguatan pasar akan menciptakan sistem pertanian yang lebih resilien dan berkelanjutan tanpa bergantung sepenuhnya pada dukungan pemerintah (van Asseldonk *et al.*, 2023).

15.2.3 Evaluasi Efektivitas Regulasi dan Insentif

Evaluasi terhadap regulasi dan insentif merupakan langkah krusial untuk memastikan bahwa kebijakan yang diterapkan benar-benar memberikan dampak positif terhadap pengembangan pertanian berkelanjutan. Proses evaluasi selain berfokus pada pencapaian target kuantitatif, juga pada perubahan kualitas sistem pertanian secara menyeluruh. Indikator evaluasi perlu mencakup aspek lingkungan, ekonomi, dan sosial agar memberikan gambaran yang komprehensif mengenai keberhasilan kebijakan. Penggunaan data yang akurat dan metode penafsiran yang tepat menjadi dasar dalam menghasilkan evaluasi yang objektif. Evaluasi tersebut kemudian dapat digunakan sebagai bahan perbaikan kebijakan agar lebih adaptif terhadap dinamika yang terjadi di lapangan.

Pelibatan berbagai pemangku kepentingan dalam proses evaluasi akan meningkatkan kualitas hasil yang diperoleh. Petani, akademisi, lembaga swadaya masyarakat, serta sektor swasta memiliki perspektif yang berbeda yang dapat memperkaya pemahaman kebijakan. Pendekatan partisipatif dalam evaluasi akan menciptakan rasa memiliki terhadap kebijakan yang dihasilkan sehingga meningkatkan tingkat kepatuhan dalam implementasinya. Mekanisme umpan balik yang efektif memungkinkan pemerintah untuk merespons permasalahan secara cepat dan tepat. Evaluasi yang dilakukan secara berkala juga dapat mengidentifikasi praktik terbaik yang dapat direplikasi di wilayah lain untuk mempercepat adopsi pertanian berkelanjutan.

Pendekatan evaluasi modern menuntut pemanfaatan teknologi dan sistem informasi yang mampu mengintegrasikan data dari berbagai sumber secara real time. Penggunaan platform digital memungkinkan pengumpulan data yang lebih cepat, akurat, dan transparan sehingga memudahkan proses pemahaman kebijakan. Sistem pemantauan berbasis teknologi juga dapat membantu dalam mengidentifikasi kendala implementasi sejak dini. Penguatan kapasitas institusi dalam mengelola data menjadi aspek penting agar hasil evaluasi dapat diinterpretasikan dengan tepat dan digunakan secara efektif dalam pengambilan keputusan. Integrasi teknologi dalam evaluasi menciptakan efisiensi sekaligus meningkatkan kualitas kebijakan yang dihasilkan.

Perubahan lingkungan global menuntut adanya sistem evaluasi yang dinamis dan berkelanjutan. Kebijakan yang efektif pada satu periode belum tentu relevan pada periode berikutnya, sehingga diperlukan fleksibilitas dalam proses penyesuaian kebijakan. Integrasi teknologi informasi dalam sistem evaluasi dapat meningkatkan efisiensi serta akurasi pengumpulan data. Penggunaan platform digital memungkinkan pemantauan secara real time terhadap implementasi regulasi dan insentif di berbagai daerah. Hasil evaluasi yang transparan akan memperkuat akuntabilitas pemerintah sekaligus meningkatkan kepercayaan publik terhadap kebijakan pertanian berkelanjutan yang sedang dijalankan (Kelinsky-Jones and Anderson, 2026).

15.3 Peran Pemerintah Daerah dalam Pengembangan Agroekologi

Penguatan agroekologi selain bergantung pada kebijakan nasional, juga pada kapasitas dan komitmen pemerintah daerah dalam menerjemahkan prinsip keberlanjutan ke dalam praktik nyata. Dinamika sosial, ekonomi, dan ekologi yang berbeda di setiap wilayah menuntut pendekatan yang kontekstual dan adaptif. Pemerintah daerah memiliki posisi strategis dalam merancang kebijakan yang responsif terhadap kebutuhan lokal sekaligus mendorong transformasi sistem pertanian menuju keberlanjutan yang inklusif dan berdaya saing tinggi.

15.3.1 Desentralisasi Kebijakan Pertanian dan Peran Daerah

Desentralisasi kebijakan pertanian memberikan ruang yang lebih luas bagi pemerintah daerah untuk merancang strategi pembangunan yang sesuai dengan karakteristik wilayahnya. Otonomi daerah memungkinkan penyesuaian kebijakan

dengan kondisi agroekosistem lokal, termasuk jenis tanah, iklim, serta budaya bertani masyarakat. Pendekatan ini menjadi penting dalam pengembangan agroekologi karena prinsip dasarnya menekankan keberagaman dan kearifan lokal. Pemerintah daerah dapat memanfaatkan kewenangan ini untuk menyusun regulasi yang mendukung praktik pertanian ramah lingkungan, seperti pengurangan penggunaan bahan kimia sintetis dan peningkatan penggunaan pupuk organik. Keberhasilan implementasi kebijakan tersebut sangat bergantung pada kapasitas kelembagaan daerah, termasuk sumber daya manusia dan sistem administrasi yang efektif. Koordinasi lintas sektor juga menjadi faktor penting karena agroekologi selain berkaitan dengan pertanian , juga berkaitan dengan lingkungan, kesehatan, dan ekonomi lokal (Gemmill-Herren *et al.*, 2023).

Peran pemerintah daerah dalam konteks desentralisasi, selain perumusan kebijakan, juga mencakup fungsi fasilitasi dan pengawasan. Pemerintah daerah dapat mengembangkan program pelatihan bagi petani untuk meningkatkan pemahaman tentang praktik agroekologi, termasuk teknik konservasi tanah dan pengelolaan hama secara alami. Pendekatan partisipatif menjadi kunci dalam proses ini, di mana petani dilibatkan secara aktif dalam perencanaan dan pelaksanaan program. Model ini selain meningkatkan efektivitas kebijakan, juga memperkuat rasa kepemilikan masyarakat terhadap program yang dijalankan. Pemerintah daerah juga memiliki peran penting dalam membangun kemitraan dengan berbagai pihak, termasuk lembaga keilmuan, organisasi masyarakat sipil, dan sektor swasta. Kolaborasi ini dapat mempercepat transfer pengetahuan dan teknologi yang mendukung pengembangan agroekologi (Timpanaro *et al.*, 2026).

Tantangan dalam implementasi desentralisasi kebijakan pertanian sering muncul dari keterbatasan sumber daya dan perbedaan kapasitas antardaerah. Ketimpangan ini dapat menghambat pemerataan pengembangan agroekologi di tingkat nasional. Pemerintah daerah perlu mengembangkan strategi inovatif untuk mengatasi keterbatasan tersebut, seperti memanfaatkan teknologi digital untuk penyuluhan dan monitoring. Penguatan kapasitas aparatur daerah juga menjadi prioritas, terutama dalam memahami konsep dan praktik agroekologi secara komprehensif. Evaluasi kebijakan secara berkala diperlukan untuk memastikan bahwa program yang dijalankan memberikan dampak positif terhadap lingkungan dan kesejahteraan petani. Komitmen politik dari pimpinan daerah menjadi faktor penentu dalam keberlanjutan program, karena tanpa dukungan yang kuat, kebijakan yang telah dirancang berpotensi tidak berjalan secara optimal.

15.3.2 Inovasi Program Daerah dalam Mendukung Agroekologi

Inovasi program daerah menjadi salah satu kunci dalam mempercepat pengembangan agroekologi di tingkat lokal. Pemerintah daerah dapat mengembangkan berbagai inisiatif yang disesuaikan dengan potensi dan kebutuhan wilayah, seperti program pertanian organik terpadu atau pengembangan desa agroekologi. Pendekatan inovatif ini, selain berfokus pada aspek produksi, juga mencakup pengolahan dan pemasaran hasil pertanian. Integrasi antara berbagai tahapan dalam rantai nilai pertanian dapat meningkatkan nilai tambah bagi petani sekaligus memperkuat ketahanan ekonomi lokal. Pemanfaatan teknologi juga menjadi bagian penting dalam inovasi, seperti penggunaan aplikasi digital untuk memantau kondisi lahan atau menghubungkan petani dengan pasar. Inovasi ini memungkinkan peningkatan efisiensi dan transparansi dalam sistem pertanian.

Program inovatif yang dikembangkan oleh pemerintah daerah sering melibatkan pendekatan berbasis komunitas. Masyarakat lokal didorong untuk berperan aktif dalam merancang dan menjalankan program, sehingga solusi yang dihasilkan lebih relevan dan berkelanjutan. Pendekatan ini juga memperkuat jaringan sosial di tingkat desa, yang menjadi salah satu faktor penting dalam keberhasilan agroekologi. Pemerintah daerah dapat memfasilitasi pembentukan kelompok tani atau koperasi yang berfokus pada praktik pertanian berkelanjutan. Kelembagaan ini berperan sebagai wadah untuk berbagi pengetahuan, mengakses sumber daya, dan memperkuat posisi tawar petani di pasar. Dukungan dalam bentuk pembiayaan dan akses terhadap sarana produksi juga menjadi bagian dari inovasi yang dapat meningkatkan adopsi agroekologi (Fiore *et al.*, 2024).

Keberhasilan inovasi program daerah sangat dipengaruhi oleh kemampuan pemerintah dalam melakukan evaluasi dan replikasi program. Program yang berhasil di satu wilayah dapat menjadi model bagi daerah lain dengan penyesuaian tertentu. Dokumentasi dan diseminasi praktik terbaik menjadi langkah penting dalam proses ini. Pemerintah daerah juga perlu membangun sistem monitoring yang efektif untuk mengukur dampak program terhadap lingkungan dan kesejahteraan masyarakat (GFNS, 2022).

15.3.3 Kolaborasi Pemerintah Daerah dengan Komunitas Lokal

Kolaborasi antara pemerintah daerah dan komunitas lokal merupakan elemen penting dalam pengembangan agroekologi yang berkelanjutan. Hubungan yang harmonis antara kedua pihak dapat menciptakan sinergi dalam perencanaan dan pelaksanaan program. Pemerintah daerah memiliki peran sebagai fasilitator yang menyediakan dukungan kebijakan dan sumber daya, sementara komunitas lokal berkontribusi melalui pengetahuan tradisional dan pengalaman praktis. Kombinasi antara pengetahuan ilmiah dan kearifan lokal menjadi kekuatan utama dalam agroekologi. Pendekatan kolaboratif ini juga memungkinkan identifikasi masalah dan solusi yang lebih akurat, karena melibatkan pihak yang langsung berinteraksi dengan lingkungan. Partisipasi aktif masyarakat dalam setiap tahap program menjadi indikator keberhasilan kolaborasi tersebut.

Penguatan kapasitas komunitas lokal menjadi bagian integral dari kolaborasi ini. Pemerintah daerah dapat menyelenggarakan pelatihan dan pendampingan untuk meningkatkan keterampilan petani dalam menerapkan praktik agroekologi. Program ini selain berfokus pada aspek teknis, juga mencakup manajemen usaha dan pemasaran. Pendekatan holistik diperlukan untuk memastikan bahwa petani selain mampu memproduksi secara berkelanjutan, juga memperoleh keuntungan layak. Pemerintah daerah juga dapat mendorong terbentuknya jaringan antarkomunitas untuk berbagi pengalaman dan pengetahuan (Wenzel *et al.*, 2024).

Keberlanjutan kolaborasi antara pemerintah daerah dan komunitas lokal memerlukan komitmen jangka panjang dari kedua pihak. Pemerintah daerah perlu memastikan bahwa kebijakan yang dibuat konsisten dan memberikan ruang bagi partisipasi masyarakat. Transparansi dalam pengelolaan program menjadi faktor penting untuk membangun kepercayaan. Komunitas lokal juga perlu terus meningkatkan kapasitas dan adaptasi terhadap perubahan, baik dari sisi lingkungan maupun pasar (Herrera *et al.*, 2025).

15.4 Tata Kelola Sumber Daya Alam dan Lahan Pertanian

Pemanfaatan sumber daya alam dalam sektor pertanian menuntut pendekatan yang seimbang antara kebutuhan produksi dan keberlanjutan lingkungan. Dinamika perubahan iklim, tekanan ekonomi, serta peningkatan kebutuhan pangan mendorong pentingnya sistem tata kelola yang adaptif dan berorientasi jangka panjang. Pendekatan agroekologi menawarkan perspektif integratif yang

menempatkan ekosistem sebagai fondasi utama dalam pengambilan kebijakan, sehingga pengelolaan lahan dan sumber daya dapat berjalan selaras dengan prinsip keberlanjutan.

15.4.1 Prinsip Tata Kelola Sumber Daya Alam Berkelanjutan

Prinsip tata kelola sumber daya alam berkelanjutan berakar pada keseimbangan antara eksploitasi dan konservasi yang memastikan keberlanjutan fungsi ekologis dalam jangka panjang. Pendekatan ini menekankan pentingnya integrasi antara aspek lingkungan, sosial, dan ekonomi dalam pengambilan keputusan. Praktik tata kelola yang baik menuntut adanya transparansi, akuntabilitas, serta partisipasi aktif dari berbagai pemangku kepentingan, termasuk petani, pemerintah, dan masyarakat lokal. Pengelolaan sumber daya alam yang berkelanjutan juga mensyaratkan pemanfaatan teknologi yang ramah lingkungan dan berbasis pengetahuan lokal. Pendekatan agroekologi memperkuat prinsip ini dengan mendorong diversifikasi tanaman, pengurangan input kimia, serta peningkatan kesuburan tanah secara alami melalui praktik seperti rotasi tanaman dan penggunaan pupuk organik.

Keterkaitan antara tata kelola sumber daya alam dan keberlanjutan pertanian menuntut adanya kebijakan yang konsisten dan berbasis data. Pemerintah memiliki peran penting dalam menetapkan regulasi yang mendukung konservasi sumber daya, termasuk perlindungan terhadap tanah, air, dan keanekaragaman hayati. Sistem monitoring dan evaluasi yang efektif diperlukan untuk memastikan implementasi kebijakan berjalan sesuai dengan tujuan yang telah ditetapkan. Selain itu, pendekatan berbasis ekosistem harus menjadi landasan dalam setiap kebijakan, sehingga setiap aktivitas pertanian mempertimbangkan dampaknya terhadap lingkungan. Pendekatan ini juga mendorong integrasi antara sektor pertanian dengan sektor lain seperti kehutanan dan perikanan dalam kerangka pembangunan berkelanjutan (Chaerani and Wulandari, 2026).

Penerapan prinsip keberlanjutan dalam tata kelola sumber daya alam tidak terlepas dari tantangan struktural dan kultural yang ada di masyarakat. Keterbatasan akses terhadap informasi, teknologi, dan pendanaan sering menjadi hambatan dalam implementasi praktik berkelanjutan. Pendidikan dan penyuluhan menjadi faktor kunci dalam meningkatkan kesadaran dan kapasitas petani untuk mengadopsi praktik agroekologi. Dukungan kelembagaan yang kuat juga diperlukan untuk memastikan keberlanjutan program dan kebijakan yang telah dirancang. Perubahan

paradigma dari eksploitasi menuju konservasi membutuhkan waktu dan komitmen yang konsisten dari semua pihak. Upaya ini harus didukung oleh insentif yang mendorong praktik ramah lingkungan serta sanksi bagi aktivitas yang merusak ekosistem. Dengan pendekatan yang komprehensif dan kolaboratif, tata kelola sumber daya alam dapat menjadi fondasi yang kuat bagi pembangunan pertanian berkelanjutan (Sudarsih *et al.*, 2025).

15.4.2 Pengelolaan Lahan Pertanian Berbasis Ekologi

Pengelolaan lahan pertanian berbasis ekologi menempatkan hubungan antara tanah, air, tanaman, dan organisme hidup sebagai satu kesatuan yang saling berinteraksi. Pendekatan ini menekankan pentingnya menjaga keseimbangan alami dalam ekosistem pertanian untuk meningkatkan produktivitas tanpa merusak lingkungan. Praktik seperti agroforestri, sistem tanam campuran, serta penggunaan pupuk organik menjadi bagian penting dalam strategi ini. Lahan pertanian selain dipandang sebagai alat produksi, juga sebagai sistem hidup yang harus dijaga keberlanjutannya. Pengelolaan berbasis ekologi juga memperhatikan aspek konservasi tanah melalui teknik seperti terasering dan penanaman penutup tanah untuk mencegah erosi. Air sebagai sumber daya vital dalam pertanian dikelola secara efisien melalui sistem irigasi yang hemat dan berkelanjutan. Pendekatan ini memberikan manfaat jangka panjang dalam menjaga kesuburan tanah dan meningkatkan ketahanan terhadap perubahan iklim.

Integrasi teknologi dalam pengelolaan lahan berbasis ekologi menjadi faktor penting dalam meningkatkan efisiensi dan efektivitas praktik pertanian. Teknologi seperti pemantauan kelembaban tanah, penggunaan sensor, serta sistem informasi geografis dapat membantu petani dalam mengambil keputusan yang lebih tepat. Pendekatan ini selain meningkatkan produktivitas, juga mengurangi dampak negatif terhadap lingkungan. Penggunaan varietas tanaman lokal yang adaptif terhadap kondisi lingkungan setempat juga menjadi bagian dari strategi pengelolaan yang berkelanjutan. Pengetahuan tradisional yang dimiliki oleh masyarakat lokal menjadi sumber informasi yang berharga dalam mengembangkan praktik pertanian yang sesuai dengan kondisi ekosistem. Kombinasi antara teknologi modern dan kearifan lokal menciptakan sistem pertanian yang resilien dan berkelanjutan (Hanifa *et al.*, 2025).

Penerapan pengelolaan lahan berbasis ekologi memerlukan dukungan kebijakan yang kuat serta partisipasi aktif dari berbagai pihak. Pemerintah perlu menyediakan insentif bagi petani yang menerapkan praktik ramah lingkungan, serta memberikan akses terhadap pelatihan dan teknologi yang dibutuhkan. Kelembagaan lokal seperti kelompok tani dan koperasi memiliki peran penting dalam mendukung implementasi praktik ini di tingkat lapangan. Kolaborasi antara pemerintah, akademisi, dan sektor swasta dapat mempercepat adopsi inovasi dalam pengelolaan lahan. Tantangan seperti keterbatasan sumber daya dan resistensi terhadap perubahan perlu diatasi melalui pendekatan yang inklusif dan partisipatif. Kesadaran akan pentingnya keberlanjutan harus ditanamkan sejak dini untuk memastikan keberhasilan jangka panjang. Dengan dukungan yang tepat, pengelolaan lahan berbasis ekologi dapat menjadi solusi efektif dalam menghadapi tantangan pertanian modern (Sandhiyana, Suwardji and Susilowati, 2025).

15.4.3 Konflik dan Resolusi dalam Pemanfaatan Sumber Daya

Konflik dalam pemanfaatan sumber daya alam dan lahan pertanian sering muncul akibat perbedaan kepentingan antara berbagai pihak yang terlibat. Tekanan terhadap lahan yang semakin meningkat, baik untuk kebutuhan pertanian, industri, maupun permukiman, menciptakan persaingan yang intensif. Ketidakjelasan hak atas tanah dan lemahnya penegakan hukum sering memperburuk situasi ini. Konflik selain berdampak pada kerugian ekonomi, juga mengganggu stabilitas sosial dan keberlanjutan lingkungan. Pendekatan agroekologi menawarkan perspektif yang menekankan pentingnya keadilan dan keberlanjutan dalam pemanfaatan sumber daya. Pengakuan terhadap hak masyarakat adat dan lokal menjadi bagian penting dalam mengurangi konflik. Sistem tata kelola yang inklusif dan transparan dapat membantu menciptakan kepercayaan antara berbagai pihak dan meminimalkan potensi konflik.

Resolusi konflik memerlukan pendekatan yang komprehensif dan melibatkan semua pemangku kepentingan. Mediasi dan dialog menjadi langkah awal yang penting dalam menyelesaikan konflik secara damai. Peran pemerintah sebagai fasilitator sangat krusial dalam memastikan proses resolusi berjalan adil dan transparan. Pendekatan berbasis komunitas dapat meningkatkan efektivitas resolusi dengan melibatkan masyarakat lokal dalam pengambilan keputusan. Penggunaan data dan informasi yang akurat juga penting untuk mendukung proses penyelesaian konflik. Sistem pemetaan partisipatif dapat membantu mengidentifikasi batas-batas

lahan dan hak kepemilikan secara lebih jelas. Pendekatan ini selain menyelesaikan konflik yang ada, juga mencegah konflik baru di masa depan (Utomo *et al.*, 2025).

Keterlibatan masyarakat dalam proses perencanaan dan pengambilan keputusan dapat meningkatkan rasa memiliki dan tanggung jawab terhadap sumber daya yang ada. Kebijakan yang adaptif dan responsif terhadap dinamika sosial dan lingkungan sangat diperlukan untuk menjaga keseimbangan antara kebutuhan pembangunan dan keberlanjutan. Dengan pendekatan yang holistik, konflik dapat dikelola secara efektif dan menjadi peluang untuk memperkuat sistem tata kelola yang lebih adil dan berkelanjutan (Yuniastuti and Setyawati, 2024).

15.5 Kebijakan Internasional terkait Pangan dan Agroekologi

Kebijakan internasional memainkan peran strategis dalam membentuk arah pembangunan sistem pangan global yang berkelanjutan. Dinamika globalisasi, perubahan iklim, serta meningkatnya kebutuhan pangan menuntut adanya pendekatan yang lebih terintegrasi dan berbasis ekologi. Agroekologi hadir sebagai alternatif yang selain memperhatikan produktivitas, juga keseimbangan lingkungan dan keadilan sosial. Dalam konteks ini, kebijakan internasional menjadi instrumen penting dalam mendorong transformasi sistem pangan menuju praktik yang lebih berkelanjutan dan inklusif.

15.5.1 Peran Organisasi Internasional dalam Pengembangan Agroekologi

Organisasi internasional memiliki peran strategis dalam mendorong adopsi agroekologi melalui penyusunan kebijakan global, penyediaan panduan teknis, serta fasilitasi kerja sama lintas negara. Lembaga-lembaga seperti FAO, IFAD, dan UNEP aktif mempromosikan praktik pertanian berkelanjutan yang mengintegrasikan prinsip ekologi dengan kebutuhan produksi pangan. Pendekatan ini didorong melalui program global yang bertujuan memperkuat kapasitas negara berkembang dalam mengelola sumber daya alam secara berkelanjutan. Dukungan tersebut tidak hanya berbentuk arahan kebijakan, tetapi juga bantuan teknis, pendanaan, serta penguatan kelembagaan. Peran organisasi internasional menjadi semakin relevan ketika dihadapkan pada tantangan perubahan iklim, degradasi lahan, dan ketimpangan akses pangan yang terjadi di berbagai belahan dunia (Wibowo, 2025).

Dinamika global menunjukkan bahwa organisasi internasional, selain berperan sebagai pemberi arahan, juga sebagai katalisator perubahan sistem pangan. Pendekatan agroekologi semakin mendapat pengakuan sebagai solusi integratif yang mampu menjawab tantangan multidimensional. Dukungan inovasi lokal dan praktik tradisional menjadi bagian penting strategi pengembangan inklusif. Peran organisasi internasional dalam memfasilitasi pertukaran pengetahuan antarnegara juga mempercepat adopsi praktik terbaik (Anderson and Maughan, 2021).

15.5.2 Kesepakatan Global tentang Ketahanan Pangan dan Lingkungan

Kesepakatan global menjadi instrumen penting dalam mengarahkan kebijakan negara menuju sistem pangan yang berkelanjutan dan berketahanan. Berbagai perjanjian internasional seperti *Sustainable Development Goals, Paris Agreement,* dan *Convention on Biological Diversity* memberikan kerangka kerja yang komprehensif dalam mengintegrasikan aspek lingkungan dan pangan. Komitmen negara terhadap kesepakatan tersebut mencerminkan kesadaran kolektif akan pentingnya menjaga keseimbangan antara produksi pangan dan kelestarian lingkungan. Prinsip agroekologi sejalan dengan tujuan tersebut, terutama dalam hal konservasi keanekaragaman hayati, pengurangan emisi gas rumah kaca, dan peningkatan kesejahteraan petani (Fahmid, Fahmid and Badrani, 2025).

Implementasi kesepakatan global memerlukan adaptasi kebijakan di tingkat nasional yang mempertimbangkan kondisi sosial, ekonomi, dan ekologis masing-masing negara. Proses ini sering menghadapi tantangan dalam hal koordinasi lintas sektor dan keterbatasan sumber daya. Peran pemerintah menjadi krusial dalam menerjemahkan komitmen global ke dalam kebijakan yang operasional dan berdampak nyata. Integrasi agroekologi dalam strategi nasional dapat menjadi pendekatan efektif dalam mencapai target-target global tersebut. Pendekatan ini selain berfokus pada hasil produksi, juga pada proses yang berkelanjutan dan inklusif (Dagunga *et al.*, 2023).

Konsistensi dalam pelaksanaan kesepakatan global menjadi faktor penentu keberhasilan dalam mencapai ketahanan pangan dan lingkungan. Mekanisme pelaporan dan evaluasi yang transparan membantu memastikan bahwa komitmen yang telah disepakati benar-benar diimplementasikan. Partisipasi aktif masyarakat sipil dan sektor swasta juga memperkuat akuntabilitas pelaksanaan kebijakan.

15.5.3 Adaptasi Kebijakan Internasional ke Konteks Nasional

Adaptasi kebijakan internasional ke dalam konteks nasional merupakan langkah penting dalam memastikan relevansi dan efektivitas implementasi agroekologi. Setiap negara memiliki karakteristik unik yang memengaruhi cara kebijakan diterapkan, termasuk kondisi geografis, struktur ekonomi, dan budaya pertanian. Proses adaptasi memerlukan pemahaman mendalam terhadap kebutuhan lokal serta keterlibatan aktif pemangku kepentingan. Pendekatan *top-down* yang tidak mempertimbangkan konteks lokal menghasilkan kebijakan yang kurang efektif.

Peran pemerintah nasional sangat penting dalam menjembatani kebijakan internasional dengan implementasi di lapangan. Penyusunan regulasi yang fleksibel dan responsif terhadap dinamika lokal menjadi salah satu strategi yang dapat diterapkan. Selain itu, penguatan kapasitas petani dan lembaga lokal juga menjadi bagian dari proses adaptasi yang berkelanjutan. Pendidikan dan pelatihan berbasis agroekologi membantu meningkatkan pemahaman dan keterampilan dalam mengelola sistem pertanian secara berkelanjutan.

Keberhasilan adaptasi kebijakan internasional sangat bergantung pada koordinasi yang efektif antara berbagai tingkat pemerintahan. Sinergi antara kebijakan pusat dan daerah memastikan bahwa implementasi berjalan secara konsisten dan terintegrasi. Evaluasi berkala terhadap kebijakan yang diterapkan membantu mengidentifikasi tantangan dan peluang perbaikan. Pendekatan partisipatif yang melibatkan masyarakat dalam proses perencanaan dan pelaksanaan kebijakan meningkatkan rasa kepemilikan dan keberlanjutan program (Gervazio, Junior and de Souza-Esquerdo[3], 2025).

BAB 16
PENDIDIKAN DAN PENYULUHAN AGROEKOLOGI

16.1 Peran Pendidikan dalam Transformasi Sistem Pertanian

Pendidikan memiliki peran yang sangat penting dalam transformasi sistem pertanian, terutama ketika dunia menghadapi tantangan besar berupa perubahan iklim, degradasi lingkungan, alih fungsi lahan, ketimpangan akses sumber daya, dan ancaman krisis pangan. Dalam konteks agroekologi, pendidikan tidak lagi dipahami semata-mata sebagai proses transfer pengetahuan teknis mengenai budidaya tanaman, tetapi sebagai proses pembentukan kesadaran kritis, perubahan cara pandang, serta penguatan kapasitas petani dan masyarakat untuk mengelola sumber daya alam secara berkelanjutan. Pendidikan menjadi instrumen utama dalam membangun paradigma baru pertanian yang tidak hanya berorientasi pada peningkatan produksi, tetapi juga memperhatikan keseimbangan ekologis, keadilan sosial, dan keberlanjutan ekonomi.

Transformasi sistem pertanian memerlukan perubahan mendasar dari model pertanian konvensional yang cenderung eksploitatif menuju model pertanian yang lebih ramah lingkungan, adaptif, dan berbasis pada kearifan lokal. Pada masa lalu, pembangunan pertanian sering kali bertumpu pada pendekatan revolusi hijau yang menekankan penggunaan benih unggul, pupuk kimia, pestisida sintetis, dan mekanisasi pertanian dalam skala besar. Meskipun pendekatan tersebut berhasil meningkatkan produksi pangan dalam jangka pendek, dampaknya terhadap lingkungan dan sosial cukup besar, seperti menurunnya kesuburan tanah, pencemaran air, hilangnya keanekaragaman hayati, serta meningkatnya ketergantungan petani terhadap input eksternal (Altieri, 2018).

Dalam situasi tersebut, pendidikan menjadi sarana penting untuk memperkenalkan konsep agroekologi sebagai pendekatan alternatif dalam pembangunan pertanian. Agroekologi menempatkan pertanian sebagai bagian dari sistem ekologi yang saling terkait, sehingga pengelolaan lahan, air, tanaman, hewan, dan manusia harus

dilakukan secara terpadu. Melalui pendidikan, petani dapat memahami bahwa keberhasilan pertanian tidak hanya ditentukan oleh banyaknya hasil panen, tetapi juga oleh kemampuan menjaga keseimbangan lingkungan dan keberlanjutan sumber daya alam untuk generasi mendatang (Wezel *et al.*, 2020).

Pendidikan dalam agroekologi juga berfungsi untuk membangun kesadaran kritis petani terhadap berbagai persoalan struktural yang mereka hadapi. Banyak petani kecil sering kali berada dalam posisi yang rentan akibat keterbatasan akses terhadap lahan, modal, teknologi, pasar, dan informasi. Dalam kondisi demikian, pendidikan dapat menjadi alat pemberdayaan yang memungkinkan petani untuk memahami hak-hak mereka, memperkuat posisi tawar, dan meningkatkan kemampuan dalam mengambil keputusan yang lebih mandiri. Paulo Freire menegaskan bahwa pendidikan seharusnya tidak hanya membebaskan manusia dari kebodohan, tetapi juga dari berbagai bentuk ketidakadilan dan ketergantungan sosial yang membatasi kemampuan mereka untuk berkembang (Freire, 2000).

Pendidikan yang mendukung transformasi sistem pertanian harus bersifat partisipatif, kontekstual, dan berbasis pengalaman nyata masyarakat. Dalam pendekatan ini, petani tidak dipandang sebagai objek penerima pengetahuan, melainkan sebagai subjek yang memiliki pengalaman, pengetahuan lokal, dan kemampuan untuk menciptakan inovasi. Pengetahuan lokal yang dimiliki petani, seperti pola tanam tradisional, penggunaan pupuk organik, pengendalian hama alami, serta konservasi air dan tanah, merupakan aset penting yang harus diintegrasikan dalam proses pendidikan agroekologi. Pendekatan pendidikan semacam ini sejalan dengan pandangan bahwa transformasi pertanian akan lebih efektif jika dilakukan melalui dialog antara ilmu pengetahuan modern dan kearifan lokal masyarakat (Gliessman, 2016).

Dalam praktiknya, pendidikan agroekologi dapat dilakukan melalui berbagai jalur, baik formal, nonformal, maupun informal. Pada jalur formal, lembaga pendidikan seperti sekolah, perguruan tinggi, dan lembaga pelatihan memiliki tanggung jawab untuk memasukkan materi agroekologi ke dalam kurikulum. Hal ini penting agar generasi muda memiliki pemahaman sejak dini tentang pentingnya pertanian berkelanjutan. Pendidikan formal juga dapat mendorong lahirnya tenaga-tenaga profesional di bidang pertanian yang memiliki orientasi ekologis, mampu melakukan investigasi, serta dapat mengembangkan inovasi yang sesuai dengan kebutuhan masyarakat.

Pada jalur nonformal, pendidikan dapat dilakukan melalui aksi penyuluhan, pelatihan, sekolah lapang, demonstrasi plot, dan pendampingan masyarakat. Pendekatan ini sangat relevan karena sebagian besar petani tidak selalu memiliki akses terhadap pendidikan formal yang tinggi. Melalui penyuluhan yang efektif, petani dapat mempelajari berbagai teknik budidaya agroekologi, seperti diversifikasi tanaman, penggunaan pupuk kompos, rotasi tanaman, agroforestri, dan pengendalian hama terpadu. Pendidikan nonformal juga berperan dalam memperkuat solidaritas sosial antarpetani melalui pembentukan kelompok tani, koperasi, dan komunitas belajar bersama.

Selain itu, pendidikan memiliki peran strategis dalam memperkuat ketahanan pangan masyarakat. Ketahanan pangan tidak hanya berkaitan dengan ketersediaan pangan, tetapi juga akses, kualitas, stabilitas, dan keberlanjutan pangan. Sistem pertanian yang berbasis agroekologi cenderung lebih tahan terhadap perubahan iklim karena mengandalkan keberagaman tanaman, konservasi sumber daya, dan pengurangan ketergantungan terhadap input eksternal. Oleh karena itu, pendidikan yang mendorong praktik agroekologi dapat membantu masyarakat membangun sistem pangan yang lebih tangguh, sehat, dan berkelanjutan (Barrios *et al.*, 2019).

Pendidikan juga berperan dalam membentuk generasi muda agar tertarik kembali pada sektor pertanian. Saat ini, banyak generasi muda yang memandang pertanian sebagai pekerjaan yang kurang menjanjikan, berat, dan tidak modern. Akibatnya, sektor pertanian menghadapi masalah regenerasi petani. Melalui pendidikan yang inovatif dan relevan dengan perkembangan teknologi, pertanian dapat diperkenalkan sebagai sektor yang memiliki potensi besar untuk dikembangkan. Pemanfaatan teknologi digital, pertanian presisi, pemasaran berbasis daring, dan inovasi pengolahan hasil pertanian dapat menjadi daya tarik bagi generasi muda untuk terlibat dalam pembangunan pertanian berkelanjutan.

Lebih jauh lagi, pendidikan agroekologi dapat menjadi sarana untuk membangun kesadaran ekologis masyarakat secara luas. Kesadaran ini penting karena krisis lingkungan yang terjadi saat ini bukan hanya disebabkan oleh praktik pertanian yang tidak berkelanjutan, tetapi juga oleh pola konsumsi dan gaya hidup masyarakat yang cenderung eksploitatif. Dengan pendidikan, masyarakat dapat memahami pentingnya memilih produk pangan lokal, mendukung petani kecil, mengurangi limbah pangan, dan menjaga kelestarian lingkungan. Dalam perspektif ini, pendidikan tidak hanya berfungsi untuk mengubah praktik pertanian, tetapi

juga mengubah budaya dan perilaku masyarakat menuju sistem pangan yang lebih adil dan berkelanjutan.

Dengan demikian, pendidikan merupakan fondasi utama dalam transformasi sistem pertanian menuju agroekologi dan ketahanan pangan. Pendidikan tidak hanya menghasilkan pengetahuan teknis, tetapi juga membentuk kesadaran kritis, sikap ekologis, dan kemampuan masyarakat untuk menghadapi tantangan masa depan. Tanpa pendidikan yang kuat, transformasi pertanian hanya akan bersifat parsial dan sulit mencapai keberlanjutan jangka panjang. Oleh karena itu, penguatan pendidikan agroekologi harus menjadi bagian penting dari kebijakan pembangunan pertanian di berbagai tingkat, mulai dari keluarga, komunitas, lembaga pendidikan, hingga pemerintah.

16.2 Kurikulum Agroekologi di Perguruan Tinggi Pertanian

Kurikulum agroekologi di perguruan tinggi pertanian merupakan kebutuhan mendesak di tengah meningkatnya kompleksitas persoalan pangan, perubahan iklim, kerusakan lingkungan, penurunan kualitas lahan, serta ketimpangan sosial ekonomi di wilayah pedesaan. Selama bertahun-tahun, pendidikan pertanian di banyak perguruan tinggi lebih menitikberatkan pada paradigma modernisasi pertanian yang berorientasi pada peningkatan produksi melalui penggunaan teknologi intensif, pupuk kimia, pestisida sintetis, benih unggul, dan mekanisasi. Pendekatan tersebut memang berhasil meningkatkan produktivitas dalam jangka pendek, tetapi juga memunculkan berbagai persoalan baru berupa degradasi tanah, pencemaran air, hilangnya biodiversitas, ketergantungan petani terhadap input eksternal, serta semakin melemahnya sistem pertanian lokal. Dalam konteks inilah, kurikulum agroekologi menjadi penting sebagai upaya untuk mengubah cara pandang pendidikan pertanian dari sekadar mengejar hasil produksi menuju pembangunan sistem pangan yang berkelanjutan, adil, dan resilien.

Kurikulum agroekologi tidak hanya dimaksudkan sebagai penambahan mata kuliah baru dalam struktur program pendidikan pertanian, melainkan sebagai perubahan paradigma dalam proses pendidikan itu sendiri. Perguruan tinggi pertanian perlu memandang bahwa persoalan pertanian tidak lagi dapat diselesaikan melalui pendekatan teknis semata. Sistem pertanian selalu berkaitan dengan dimensi sosial, ekonomi, budaya, politik, dan lingkungan yang saling memengaruhi. Oleh karena itu, mahasiswa perlu dibekali dengan kemampuan untuk memahami pertanian secara holistik dan sistemik. Pendidikan agroekologi

harus mampu membentuk lulusan yang tidak hanya ahli dalam budidaya tanaman, tetapi juga memahami persoalan petani kecil, konflik agraria, ketahanan pangan, keadilan distribusi sumber daya, serta dampak ekologis dari praktik pertanian modern (Méndez, Bacon and Cohen, 2013).

Pengembangan kurikulum agroekologi di perguruan tinggi juga harus didasarkan pada kebutuhan nyata masyarakat. Selama ini, banyak kurikulum pertanian dirancang lebih dekat dengan kepentingan industri agribisnis besar daripada kebutuhan petani kecil. Mahasiswa lebih banyak dikenalkan pada teknologi produksi skala besar, sementara persoalan yang dihadapi petani lokal seperti keterbatasan lahan, minimnya modal, perubahan musim, serta akses pasar sering kali kurang mendapat perhatian. Akibatnya, lulusan perguruan tinggi pertanian sering mengalami kesenjangan antara pengetahuan yang diperoleh di kampus dengan realitas di lapangan. Kurikulum agroekologi harus mampu menjembatani kesenjangan tersebut dengan menghadirkan pembelajaran yang kontekstual, relevan, dan berbasis pada persoalan nyata masyarakat pedesaan (Levidow, Pimbert and Vanloqueren, 2014).

Dalam implementasinya, kurikulum agroekologi perlu dirancang secara interdisipliner. Mahasiswa tidak cukup hanya mempelajari agronomi, ilmu tanah, atau perlindungan tanaman secara terpisah, tetapi juga perlu memahami sosiologi pedesaan, antropologi pertanian, ekonomi politik pangan, etika lingkungan, dan kebijakan publik. Pendekatan interdisipliner ini penting karena persoalan pertanian modern sangat kompleks dan tidak dapat dijelaskan hanya melalui satu disiplin ilmu. Misalnya, penurunan produksi pangan tidak selalu disebabkan oleh masalah teknis budidaya, tetapi juga dapat dipengaruhi oleh alih fungsi lahan, ketimpangan akses air, lemahnya kelembagaan petani, serta kebijakan perdagangan yang tidak berpihak kepada produsen kecil. Dengan memahami berbagai aspek tersebut, mahasiswa akan memiliki kemampuan berpikir kritis dan mampu menawarkan solusi yang lebih komprehensif.

Kurikulum agroekologi juga perlu menempatkan pengalaman lapangan sebagai bagian penting dari proses pembelajaran. Pendidikan pertanian yang hanya berlangsung di ruang kelas akan sulit membentuk pemahaman mendalam mengenai kondisi nyata yang dihadapi petani. Oleh sebab itu, mahasiswa perlu dilibatkan dalam berbagai aktivitas seperti praktik lapangan, sekolah lapang, investigasi partisipatif, eksplorasi di desa, pendampingan kelompok tani, serta

gerakan pengabdian masyarakat. Melalui pengalaman tersebut, mahasiswa dapat belajar langsung mengenai pola tanam lokal, teknik konservasi tanah, pengelolaan air, diversifikasi tanaman, hingga dinamika sosial ekonomi masyarakat pedesaan. Pembelajaran berbasis pengalaman memungkinkan mahasiswa tidak hanya memperoleh pengetahuan teoritis, tetapi juga mengembangkan empati sosial, kemampuan komunikasi, dan keterampilan problem solving yang sangat dibutuhkan dalam dunia pertanian (Kolb, 1984).

Selain itu, kurikulum agroekologi harus memberikan ruang yang besar bagi pengakuan terhadap pengetahuan lokal dan kearifan tradisional masyarakat. Selama ini, pendidikan pertanian modern sering kali menganggap bahwa inovasi hanya berasal dari laboratorium, lembaga keilmuan, atau perusahaan teknologi. Padahal, banyak komunitas petani memiliki pengetahuan yang sangat kaya mengenai pengelolaan sumber daya alam, konservasi tanah, pola tanam campuran, pemanfaatan tanaman lokal, serta pengendalian hama alami. Pengetahuan tersebut terbentuk melalui pengalaman panjang dan adaptasi terhadap kondisi lingkungan setempat. Oleh karena itu, perguruan tinggi perlu mengintegrasikan pengetahuan lokal ke dalam kurikulum agar mahasiswa dapat memahami bahwa inovasi pertanian tidak selalu harus berbasis teknologi tinggi, tetapi juga dapat berasal dari praktik-praktik tradisional yang terbukti berkelanjutan (Holt-Giménez, 2006).

Kurikulum agroekologi juga harus mampu merespons perubahan zaman dan perkembangan teknologi. Di era digital saat ini, sektor pertanian tidak lagi identik dengan pekerjaan tradisional yang tertinggal, melainkan menjadi bidang yang sangat dinamis dan inovatif. Perguruan tinggi perlu memperkenalkan mahasiswa pada berbagai perkembangan baru seperti pertanian presisi, pemanfaatan data iklim, sistem informasi geografis, pemasaran digital, teknologi sensor, hingga platform perdagangan daring untuk produk pangan lokal. Namun demikian, pemanfaatan teknologi tersebut harus tetap ditempatkan dalam kerangka keberlanjutan ekologis dan keadilan sosial. Teknologi tidak boleh digunakan semata-mata untuk meningkatkan produksi, tetapi juga harus mendukung efisiensi penggunaan sumber daya, mengurangi limbah, memperkuat posisi petani kecil, dan meningkatkan akses masyarakat terhadap pangan sehat.

Lebih jauh, kurikulum agroekologi di perguruan tinggi pertanian harus diarahkan untuk membangun kesadaran mahasiswa mengenai pentingnya kedaulatan pangan. Kedaulatan pangan bukan hanya berkaitan dengan kemampuan suatu negara untuk

memenuhi kebutuhan pangan, tetapi juga berkaitan dengan hak masyarakat untuk menentukan sistem pangan yang sesuai dengan kondisi sosial, budaya, dan ekologinya. Dalam konteks ini, mahasiswa perlu memahami bahwa sistem pangan global yang terlalu bergantung pada korporasi besar dan perdagangan internasional dapat melemahkan ketahanan pangan lokal. Oleh karena itu, pendidikan agroekologi harus mendorong lahirnya generasi muda yang memiliki keberpihakan terhadap petani kecil, pangan lokal, keanekaragaman hayati, dan sistem distribusi pangan yang lebih adil (Ruiz-Almeida and Rivera-Ferre, 2019).

Pada akhirnya, kurikulum agroekologi di perguruan tinggi pertanian merupakan bagian penting dari transformasi pendidikan menuju sistem pertanian yang lebih berkelanjutan. Kurikulum ini tidak hanya berfungsi untuk menghasilkan lulusan yang memiliki kompetensi teknis, tetapi juga membentuk kesadaran ekologis, kepekaan sosial, kemampuan berpikir kritis, serta komitmen terhadap keberlanjutan pangan. Perguruan tinggi pertanian memiliki tanggung jawab besar untuk mencetak generasi baru petani, penyuluh, akademisi, dan pembuat kebijakan yang mampu menjawab tantangan pertanian masa depan secara lebih adil, inklusif, dan berwawasan lingkungan.

16.3 Sekolah Lapang Petani sebagai Model Penyuluhan Partisipatif

Sekolah Lapang Petani merupakan salah satu model penyuluhan partisipatif yang berkembang sebagai respons terhadap keterbatasan pendekatan penyuluhan pertanian konvensional. Selama bertahun-tahun, penyuluhan pertanian sering dilaksanakan melalui pendekatan top-down, di mana petani diposisikan sebagai penerima informasi dan teknologi yang berasal dari pemerintah, peneliti, atau lembaga penyuluhan. Dalam pendekatan tersebut, petani sering dianggap tidak memiliki pengetahuan yang memadai sehingga tugas penyuluh hanya sebatas mentransfer inovasi dari luar kepada masyarakat. Pola seperti ini pada akhirnya menimbulkan ketergantungan petani terhadap pihak eksternal, mengurangi ruang bagi pengetahuan lokal, dan sering kali menghasilkan teknologi yang tidak sesuai dengan kebutuhan serta kondisi spesifik wilayah setempat.

Sekolah Lapang Petani hadir untuk mengubah paradigma tersebut dengan menempatkan petani sebagai subjek utama dalam proses pembelajaran. Dalam model ini, petani tidak lagi dipandang sebagai objek yang harus menerima arahan,

tetapi sebagai individu yang memiliki pengalaman, pengetahuan, dan kemampuan untuk memahami persoalan pertanian yang mereka hadapi. Sekolah Lapang Petani pada dasarnya merupakan proses belajar bersama yang berlangsung di lahan pertanian secara langsung, sehingga petani dapat mengamati, mencoba, mendiskusikan, dan mengevaluasi berbagai praktik budidaya berdasarkan pengalaman nyata di lapangan. Dengan demikian, proses belajar menjadi lebih kontekstual, praktis, dan relevan dengan kondisi lokal masyarakat (Pretty, 1995).

Konsep Sekolah Lapang Petani pertama kali berkembang melalui program pengendalian hama terpadu atau Integrated Pest Management yang diperkenalkan oleh Organisasi Pangan dan Pertanian Dunia pada akhir 1980-an di beberapa negara Asia, termasuk Indonesia. Program ini muncul karena penggunaan pestisida secara berlebihan telah menimbulkan berbagai dampak negatif, seperti resistensi hama, menurunnya populasi musuh alami, pencemaran lingkungan, dan meningkatnya biaya produksi. Melalui Sekolah Lapang Petani, petani diajak untuk mempelajari ekosistem pertanian secara menyeluruh, mengenali siklus hidup hama dan musuh alaminya, serta memahami bahwa pengendalian hama tidak selalu harus dilakukan melalui penggunaan bahan kimia. Pendekatan ini terbukti mampu meningkatkan kemampuan petani dalam mengambil keputusan secara mandiri dan mengurangi ketergantungan terhadap pestisida sintetis (Pontius, Dilts and Bartlett, 2002).

Dalam perspektif agroekologi, Sekolah Lapang Petani memiliki peran yang sangat penting karena sejalan dengan prinsip pembelajaran partisipatif dan pemberdayaan masyarakat. Agroekologi menekankan bahwa sistem pertanian yang berkelanjutan tidak dapat dibangun hanya melalui penerapan teknologi modern, tetapi juga melalui penguatan kapasitas petani, pengakuan terhadap pengetahuan lokal, dan pengembangan inovasi berbasis komunitas. Sekolah Lapang Petani menjadi ruang bagi petani untuk saling bertukar pengalaman, mengembangkan eksperimen lapangan, dan menemukan solusi yang sesuai dengan kebutuhan mereka sendiri. Melalui proses tersebut, petani tidak hanya memperoleh pengetahuan baru, tetapi juga membangun rasa percaya diri, solidaritas sosial, dan kemampuan kolektif untuk menghadapi tantangan pertanian (Leeuwis, 2013).

Salah satu keunggulan utama Sekolah Lapang Petani adalah pendekatannya yang berbasis pengalaman langsung. Petani belajar melalui praktik nyata di lapangan, bukan hanya melalui ceramah atau penyampaian teori. Mereka melakukan

pengamatan terhadap pertumbuhan tanaman, kondisi tanah, curah hujan, serangan hama, penggunaan pupuk, dan berbagai faktor lain yang memengaruhi hasil pertanian. Dari hasil pengamatan tersebut, petani kemudian mendiskusikan temuan mereka bersama kelompok dan penyuluh untuk merumuskan langkah-langkah yang tepat. Model pembelajaran seperti ini jauh lebih efektif dibandingkan pendekatan konvensional karena petani dapat melihat secara langsung dampak dari setiap keputusan yang mereka ambil. Pembelajaran berbasis pengalaman juga membantu petani mengembangkan keterampilan analitis dan kemampuan memecahkan masalah secara mandiri (Roling and Wagemakers, 2000).

Sekolah Lapang Petani juga memiliki peran penting dalam memperkuat kelembagaan petani. Proses belajar yang dilakukan secara kelompok memungkinkan terbangunnya hubungan sosial yang lebih erat antaranggota masyarakat. Petani dapat saling membantu, berbagi informasi, dan bekerja sama dalam menghadapi persoalan yang mereka hadapi. Dalam jangka panjang, Sekolah Lapang Petani dapat menjadi dasar bagi terbentuknya kelompok tani, koperasi, komunitas pertanian organik, maupun jaringan pemasaran bersama. Kelembagaan semacam ini sangat penting karena banyak persoalan pertanian tidak dapat diselesaikan secara individual, melainkan membutuhkan kerja sama kolektif, baik dalam hal akses terhadap modal, teknologi, pasar, maupun advokasi kebijakan.

Selain itu, Sekolah Lapang Petani juga berkontribusi terhadap peningkatan ketahanan pangan masyarakat. Melalui model pembelajaran partisipatif, petani dapat mempelajari teknik budidaya yang lebih efisien, ramah lingkungan, dan adaptif terhadap perubahan iklim. Misalnya, petani dapat belajar mengenai diversifikasi tanaman, penggunaan pupuk organik, konservasi air, agroforestri, dan pengelolaan benih lokal. Praktik-praktik tersebut tidak hanya membantu meningkatkan produktivitas, tetapi juga mengurangi risiko kegagalan panen dan memperkuat ketahanan sistem pertanian terhadap gangguan lingkungan. Dengan demikian, Sekolah Lapang Petani tidak hanya berfungsi sebagai sarana pendidikan, tetapi juga sebagai instrumen penting dalam mendukung ketahanan pangan dan pembangunan pedesaan.

Dalam konteks Indonesia, Sekolah Lapang Petani memiliki relevansi yang sangat tinggi karena sebagian besar petani masih menghadapi berbagai keterbatasan, seperti rendahnya tingkat pendidikan formal, minimnya akses terhadap teknologi, dan lemahnya posisi tawar dalam pasar. Sekolah Lapang Petani dapat menjadi

sarana yang efektif untuk menjembatani kesenjangan tersebut karena menggunakan metode belajar yang sederhana, kontekstual, dan sesuai dengan kehidupan sehari-hari petani. Namun demikian, keberhasilan Sekolah Lapang Petani sangat bergantung pada kualitas fasilitator, dukungan kebijakan pemerintah, serta keterlibatan aktif masyarakat. Penyuluh tidak lagi berperan sebagai instruktur yang memberi perintah, tetapi sebagai fasilitator yang mendorong proses dialog, refleksi, dan pembelajaran bersama.

Pada akhirnya, Sekolah Lapang Petani merupakan model penyuluhan partisipatif yang memiliki potensi besar dalam mendukung transformasi sistem pertanian menuju arah yang lebih berkelanjutan. Melalui pendekatan ini, petani tidak hanya memperoleh pengetahuan teknis, tetapi juga menjadi lebih mandiri, kritis, dan percaya diri dalam mengambil keputusan. Sekolah Lapang Petani juga memperkuat hubungan sosial, menghidupkan kembali pengetahuan lokal, dan membuka ruang bagi inovasi berbasis komunitas. Dalam kerangka agroekologi dan ketahanan pangan, model ini sangat penting karena mampu menghubungkan antara proses pendidikan, pemberdayaan masyarakat, dan pembangunan pertanian yang berkeadilan.

16.4 Peran Penyuluh Pertanian dalam Diseminasi Agroekologi

Penyuluh pertanian memiliki posisi yang sangat strategis dalam proses diseminasi agroekologi karena mereka menjadi penghubung utama antara pengetahuan ilmiah, inovasi teknologi, kebijakan pemerintah, dan praktik pertanian di tingkat masyarakat. Dalam konteks pembangunan pertanian modern, penyuluh tidak lagi hanya berperan sebagai penyampai informasi teknis kepada petani, tetapi juga sebagai fasilitator, mediator, pendamping, dan agen perubahan sosial. Perubahan peran ini menjadi sangat penting karena tantangan pertanian saat ini semakin kompleks, meliputi perubahan iklim, degradasi lahan, penurunan kualitas lingkungan, ketimpangan akses sumber daya, dan kerentanan sistem pangan. Dalam situasi seperti ini, diseminasi agroekologi membutuhkan pendekatan yang tidak hanya bersifat teknis, tetapi juga partisipatif, kontekstual, dan berbasis pemberdayaan masyarakat.

Agroekologi pada dasarnya menawarkan paradigma baru dalam pembangunan pertanian yang tidak hanya menekankan peningkatan produksi, tetapi juga keberlanjutan lingkungan, keadilan sosial, dan ketahanan pangan. Oleh karena itu, penyuluh pertanian memiliki tanggung jawab besar untuk memperkenalkan cara pandang baru kepada petani bahwa keberhasilan pertanian tidak hanya diukur dari jumlah hasil panen, tetapi juga dari kemampuan menjaga kesuburan tanah, melestarikan keanekaragaman hayati, mengurangi ketergantungan terhadap input eksternal, serta memperkuat kemandirian petani. Dalam hal ini, penyuluh berperan penting dalam membangun kesadaran kritis petani mengenai dampak negatif dari praktik pertanian konvensional yang terlalu bergantung pada pupuk kimia, pestisida sintetis, dan benih komersial (Chambers and Thrupp, 1994).

Peran penyuluh dalam diseminasi agroekologi tidak dapat dipisahkan dari kemampuan mereka dalam membangun hubungan yang setara dengan petani. Penyuluh yang efektif bukanlah mereka yang hanya datang membawa instruksi atau teknologi dari luar, melainkan mereka yang mampu mendengarkan, memahami, dan menghargai pengalaman petani. Banyak petani memiliki pengetahuan lokal yang sangat kaya mengenai pola tanam, musim, konservasi air, pengelolaan hama, dan penggunaan tanaman lokal. Pengetahuan tersebut sering kali terbentuk melalui pengalaman panjang dan diwariskan secara turun-temurun. Penyuluh perlu menjadikan pengetahuan lokal tersebut sebagai bagian penting dari proses pembelajaran, sehingga inovasi yang dikembangkan benar-benar sesuai dengan kondisi dan kebutuhan masyarakat setempat (Scoones and Thompson, 2009).

Dalam praktiknya, penyuluh pertanian memiliki peran penting dalam memperkenalkan berbagai teknik agroekologi yang dapat diterapkan oleh petani. Teknik tersebut meliputi penggunaan pupuk organik, diversifikasi tanaman, rotasi tanaman, agroforestri, konservasi tanah dan air, pengelolaan benih lokal, serta pengendalian hama terpadu. Namun, penyuluh tidak cukup hanya menjelaskan manfaat dari teknik-teknik tersebut secara teoritis. Mereka perlu menunjukkan bukti nyata melalui demonstrasi lapangan, sekolah lapang, plot percontohan, dan praktik langsung di lahan petani. Pendekatan semacam ini sangat penting karena petani cenderung lebih percaya pada pengalaman yang dapat mereka lihat dan rasakan secara langsung dibandingkan hanya melalui penjelasan verbal semata.

Penyuluh juga memiliki peran penting dalam memperkuat kelembagaan petani. Agroekologi tidak dapat berkembang secara optimal jika petani bekerja secara individual dan terisolasi. Banyak persoalan pertanian seperti akses terhadap modal, benih, pasar, informasi, dan kebijakan memerlukan kerja sama kolektif. Oleh karena itu, penyuluh perlu mendorong terbentuknya kelompok tani, koperasi, komunitas pertanian organik, dan jaringan pemasaran bersama. Kelembagaan yang kuat akan membantu petani meningkatkan posisi tawar mereka, memperluas akses terhadap sumber daya, serta memperkuat solidaritas sosial di tingkat lokal. Dalam hal ini, penyuluh bukan hanya menjadi pendamping teknis, tetapi juga fasilitator dalam penguatan organisasi masyarakat tani (Klerkx, Van Mierlo and Leeuwis, 2012).

Selain itu, penyuluh memiliki tanggung jawab untuk membantu petani beradaptasi terhadap perubahan iklim. Perubahan pola hujan, meningkatnya suhu, banjir, kekeringan, dan serangan hama yang semakin sulit diprediksi telah menjadi ancaman nyata bagi keberlanjutan pertanian. Agroekologi menawarkan berbagai pendekatan adaptif, seperti diversifikasi tanaman, pemanfaatan varietas lokal yang tahan iklim ekstrem, pengelolaan air yang efisien, dan peningkatan bahan organik tanah. Penyuluh memiliki peran penting dalam menyampaikan informasi mengenai strategi adaptasi tersebut kepada petani, sekaligus membantu mereka merancang sistem pertanian yang lebih tangguh terhadap perubahan lingkungan (Darnhofer, 2014).

Di era digital, peran penyuluh pertanian juga mengalami perkembangan yang signifikan. Penyuluh tidak lagi hanya mengandalkan pertemuan tatap muka, tetapi juga dapat memanfaatkan teknologi informasi dan komunikasi untuk memperluas jangkauan diseminasi agroekologi. Media sosial, aplikasi pertanian, video pembelajaran, grup pesan instan, dan platform digital lainnya dapat digunakan untuk menyebarkan informasi mengenai teknik budidaya, harga pasar, kondisi cuaca, serta inovasi pertanian berkelanjutan. Pemanfaatan teknologi ini menjadi penting terutama di daerah yang sulit dijangkau atau ketika jumlah penyuluh terbatas. Namun demikian, penggunaan teknologi digital harus tetap memperhatikan kondisi sosial dan tingkat literasi masyarakat agar informasi yang disampaikan benar-benar dapat dipahami dan dimanfaatkan oleh petani.

Keberhasilan penyuluh dalam diseminasi agroekologi juga sangat dipengaruhi oleh dukungan kelembagaan dan kebijakan pemerintah. Penyuluh sering kali menghadapi berbagai kendala seperti keterbatasan anggaran, minimnya pelatihan, rendahnya jumlah tenaga penyuluh, serta kurangnya fasilitas kerja. Padahal, penyuluh membutuhkan kapasitas yang memadai agar mampu memahami konsep agroekologi secara komprehensif dan menyampaikannya kepada masyarakat. Oleh karena itu, pemerintah perlu memberikan dukungan melalui peningkatan kapasitas penyuluh, penyediaan sarana dan prasarana, serta penguatan sistem penyuluhan yang lebih partisipatif dan berkelanjutan. Tanpa dukungan yang memadai, sulit bagi penyuluh untuk menjalankan peran mereka secara optimal.

Pada akhirnya, penyuluh pertanian merupakan aktor kunci dalam proses transformasi pertanian menuju sistem yang lebih berkelanjutan. Mereka tidak hanya bertugas menyebarkan teknologi, tetapi juga membangun kesadaran, memperkuat kapasitas petani, mendorong kerja sama kolektif, dan membantu masyarakat menghadapi tantangan pertanian masa depan. Dalam konteks agroekologi, penyuluh berperan sebagai jembatan antara ilmu pengetahuan, pengalaman lokal, dan kebutuhan masyarakat. Oleh karena itu, penguatan peran penyuluh pertanian harus menjadi bagian penting dari strategi pembangunan pertanian dan ketahanan pangan di masa mendatang.

16.5 Literasi Pangan dan Agroekologi di Masyarakat

Literasi pangan dan agroekologi di masyarakat merupakan aspek yang sangat penting dalam upaya mewujudkan sistem pangan yang berkelanjutan, sehat, adil, dan berdaya tahan. Selama ini, pembahasan mengenai pangan sering kali hanya berfokus pada aspek produksi dan distribusi, padahal persoalan pangan juga sangat dipengaruhi oleh tingkat pengetahuan, sikap, dan perilaku masyarakat dalam memilih, mengonsumsi, memproduksi, dan mengelola sumber daya pangan. Dalam konteks ini, literasi pangan dapat dipahami sebagai kemampuan individu dan masyarakat untuk memahami berbagai aspek yang berkaitan dengan pangan, mulai dari nilai gizi, keamanan pangan, pola konsumsi, asal-usul bahan pangan, hingga dampak sosial dan lingkungan dari sistem produksi pangan. Sementara itu, literasi agroekologi merujuk pada kemampuan masyarakat untuk memahami hubungan antara pertanian, lingkungan, kesehatan, budaya, dan ketahanan pangan secara lebih menyeluruh.

Pentingnya literasi pangan dan agroekologi semakin terlihat di tengah meningkatnya berbagai persoalan global, seperti perubahan iklim, degradasi lingkungan, ketimpangan akses pangan, meningkatnya konsumsi pangan olahan, serta menurunnya minat masyarakat terhadap pangan lokal. Banyak masyarakat yang belum memahami bahwa pilihan konsumsi mereka memiliki dampak langsung terhadap sistem produksi pangan dan keberlanjutan lingkungan. Konsumsi pangan yang berlebihan, ketergantungan pada produk impor, penggunaan bahan kimia secara berlebihan, serta tingginya limbah makanan merupakan contoh perilaku yang sering kali muncul akibat rendahnya literasi pangan di masyarakat. Dalam jangka panjang, kondisi ini dapat memperburuk ketahanan pangan dan memperbesar tekanan terhadap sumber daya alam (Tilman and Clark, 2014).

Literasi pangan tidak hanya berkaitan dengan kemampuan memahami kandungan gizi suatu makanan, tetapi juga menyangkut kesadaran tentang bagaimana pangan diproduksi, didistribusikan, dan dikonsumsi. Masyarakat perlu memahami bahwa pangan yang mereka konsumsi berasal dari proses panjang yang melibatkan petani, lahan, air, benih, tenaga kerja, pasar, dan kebijakan pemerintah. Kesadaran semacam ini penting karena dapat mendorong masyarakat untuk lebih menghargai pangan, mengurangi pemborosan, dan mendukung sistem produksi yang lebih adil dan berkelanjutan. Pengetahuan tentang rantai pangan juga dapat membantu masyarakat memahami pentingnya mendukung petani lokal, membeli produk musiman, dan memilih pangan yang diproduksi dengan cara yang ramah lingkungan (Sumner, 2005).

Dalam perspektif agroekologi, literasi masyarakat tidak cukup hanya berfokus pada aspek konsumsi, tetapi juga harus mencakup pemahaman mengenai prinsip-prinsip dasar pertanian berkelanjutan. Masyarakat perlu mengetahui bahwa sistem pertanian yang terlalu bergantung pada pupuk kimia, pestisida sintetis, dan monokultur dapat menimbulkan berbagai dampak negatif, seperti pencemaran tanah dan air, hilangnya biodiversitas, serta meningkatnya kerentanan terhadap perubahan iklim. Sebaliknya, pendekatan agroekologi menawarkan sistem pertanian yang lebih ramah lingkungan melalui diversifikasi tanaman, penggunaan pupuk organik, konservasi tanah, pemanfaatan benih lokal, serta pengelolaan sumber daya alam secara bijaksana. Dengan meningkatnya literasi agroekologi, masyarakat akan lebih memahami bahwa keberlanjutan pangan tidak hanya

bergantung pada banyaknya produksi, tetapi juga pada kualitas sistem produksi itu sendiri .

Literasi pangan dan agroekologi juga memiliki hubungan yang erat dengan kesehatan masyarakat. Pola konsumsi yang tidak sehat, seperti tingginya konsumsi makanan cepat saji, minuman manis, serta pangan olahan, telah menjadi salah satu penyebab meningkatnya berbagai penyakit tidak menular seperti diabetes, hipertensi, obesitas, dan penyakit jantung. Di sisi lain, rendahnya konsumsi sayur, buah, dan pangan lokal yang kaya gizi juga memperburuk kualitas kesehatan masyarakat. Melalui literasi pangan, masyarakat dapat didorong untuk lebih memahami pentingnya konsumsi makanan yang bergizi, seimbang, aman, dan beragam. Pemahaman ini tidak hanya bermanfaat bagi kesehatan individu, tetapi juga dapat memperkuat ketahanan pangan keluarga dan masyarakat secara keseluruhan (Nicholls and Altieri, 2018).

Pendidikan memiliki peran yang sangat penting dalam meningkatkan literasi pangan dan agroekologi di masyarakat. Pendidikan formal melalui sekolah dan perguruan tinggi dapat menjadi sarana untuk memperkenalkan pengetahuan mengenai gizi, pertanian berkelanjutan, ketahanan pangan, dan lingkungan hidup sejak usia dini. Selain itu, pendidikan nonformal melalui penyuluhan, pelatihan, media massa, kampanye publik, dan program komunitas juga dapat membantu memperluas pemahaman masyarakat mengenai pentingnya pangan sehat dan sistem pertanian yang berkelanjutan. Dalam konteks ini, keluarga juga memiliki peran penting karena kebiasaan makan, pola konsumsi, dan sikap terhadap pangan sering kali dibentuk sejak kecil melalui lingkungan rumah tangga.

Di masyarakat pedesaan, literasi agroekologi dapat diperkuat melalui berbagai usaha seperti sekolah lapang, kebun percontohan, pelatihan pertanian organik, dan pendampingan kelompok tani. Sementara itu, di wilayah perkotaan, literasi pangan dapat ditingkatkan melalui gerakan urban farming, pasar pangan lokal, kampanye konsumsi pangan sehat, serta pengurangan limbah makanan. Berbagai usaha tersebut tidak hanya meningkatkan pengetahuan masyarakat, tetapi juga mendorong perubahan perilaku yang lebih berkelanjutan. Ketika masyarakat mulai memahami pentingnya menanam sendiri, mengonsumsi produk lokal, memilah limbah organik, dan mendukung petani kecil, maka akan terbentuk sistem pangan yang lebih resilien dan berbasis komunitas (Morgan and Sonnino, 2010).

Selain itu, literasi pangan dan agroekologi juga sangat penting dalam mendukung kedaulatan pangan. Kedaulatan pangan menekankan hak masyarakat untuk menentukan sistem pangan yang sesuai dengan kebutuhan, budaya, dan kondisi ekologis mereka sendiri. Tanpa literasi yang memadai, masyarakat cenderung menjadi konsumen pasif yang hanya bergantung pada produk pangan industri dan tidak memiliki kesadaran mengenai dampak sosial maupun ekologis dari pilihan konsumsi mereka. Sebaliknya, masyarakat yang memiliki literasi pangan dan agroekologi yang baik akan lebih mampu mengambil keputusan yang bijaksana terkait pangan, baik sebagai konsumen maupun produsen. Mereka juga akan lebih siap untuk menghadapi tantangan seperti krisis pangan, perubahan iklim, dan fluktuasi harga bahan pangan.

Pada akhirnya, literasi pangan dan agroekologi di masyarakat bukan hanya soal pengetahuan teknis, tetapi juga berkaitan dengan pembentukan kesadaran, nilai, dan tanggung jawab sosial terhadap pangan dan lingkungan. Literasi yang baik akan membantu masyarakat memahami bahwa pangan bukan sekadar komoditas ekonomi, tetapi juga bagian dari hak dasar manusia, identitas budaya, kesehatan, dan keberlanjutan kehidupan. Oleh karena itu, peningkatan literasi pangan dan agroekologi harus menjadi bagian penting dari strategi pembangunan pertanian, pendidikan, kesehatan, dan ketahanan pangan di masa depan.

BAB 17
AGROEKOLOGI PERKOTAAN DAN PERTANIAN SKALA KECIL

17.1 Konsep dan Perkembangan Pertanian Perkotaan (Urban Farming)

Agroekologi perkotaan atau urban farming adalah aktivitas budidaya di wilayah kota dan peri-urban untuk memenuhi kebutuhan pangan lokal dengan memanfaatkan sumber daya setempat seperti lahan, air, dan tenaga kerja (Mougeot, 2000; Pamungkas, 2023). Sistem ini mencakup produksi hingga distribusi pangan dengan metode seperti hidroponik, akuaponik, dan taman vertikal yang efisien, serta berkontribusi pada ketahanan pangan, pengurangan emisi, dan perbaikan lingkungan (United Nations, 2018; Food and Agriculture Organization, 2019; United States Department Agriculture, 2020). Selain itu, urban farming juga mendorong ekonomi lokal melalui usaha pangan dan agrowisata, sehingga perlu didukung kebijakan tata ruang, insentif, dan perlindungan lahan produktif (Quon, 1999).



Gambar 17.1: Pertanian Perkotaan di Amerika Serikat (Gattupalli, 2024)

Ruang lingkup pertanian perkotaan dapat dibedakan berdasarkan jenis pemanfaatan lahannya, yaitu lahan privat dan lahan publik. Lahan privat biasanya dikelola oleh individu atau rumah tangga, seperti pada pekarangan atau atap bangunan dengan penerapan teknik hidroponik dan vertikultur, sedangkan lahan publik dikelola oleh pemerintah untuk kepentingan bersama (Orsini et al., 2013; Fauzi et al., 2016; Artmann, M. and Sartison, 2018). Pembagian ini menunjukkan fleksibilitas pertanian perkotaan dalam memanfaatkan ruang terbatas di wilayah urban, sekaligus memberikan manfaat nyata bagi rumah tangga, seperti meningkatkan ketersediaan pangan secara mandiri dan mengurangi pengeluaran kebutuhan pangan (Taylor, J.R. and Lovell, 2014; Nizar, R. and Amalia, 2024).

Pemanfaatan lahan publik dalam pertanian perkotaan dapat dilakukan melalui taman kota, lahan kosong milik negara, maupun fasilitas umum yang diubah menjadi ruang produksi sekaligus edukasi (Hamzens, W.P.S. and Moestopo, 2018; Iswoyo et al., 2018). Optimalisasi ini tidak hanya mendorong partisipasi masyarakat, memperbaiki kualitas lingkungan, dan memperindah kota, tetapi juga berkontribusi pada ketahanan pangan serta membuka peluang ekonomi (Andita et al., 2024). Namun, keberhasilannya sangat bergantung pada pengelolaan yang efektif dan berkelanjutan, sehingga dibutuhkan keterlibatan masyarakat serta sistem manajemen yang terstruktur agar dapat mendukung kemandirian pangan dan pengurangan pengangguran di perkotaan (Fauzi et al., 2016). Secara umum, urban farming memiliki tujuan serupa dengan pertanian konvensional, yaitu memenuhi kebutuhan pangan, tetapi berkembang dengan karakteristik khas karena keterbatasan ruang (Sanyé-Mengual et al., 2018), sehingga membentuk ciri yang berbeda dibandingkan pertanian konvensional, diantaranya:

1. **Pemanfaatan lahan terbatas dan kurang produktif**

   Pemanfaatan ruang dalam pertanian perkotaan dilakukan pada lahan terbatas dengan tujuan mengoptimalkan ruang yang kurang dimanfaatkan menjadi produktif sekaligus mendukung produksi pangan yang berkelanjutan (Suryani et al., 2020; Setiawan, T. and Pratama, 2024; Muna et al., 2025).

2. **Kolaborasi antara tanaman dan hewan**

   Dalam praktiknya, urban farming mencakup budidaya berbagai komoditas yang bernilai konsumsi maupun ekonomi. Pada beberapa kasus, sistem ini juga dikembangkan secara terpadu dengan mengombinasikan budidaya tanaman dan peternakan dalam satu kawasan, sehingga mendukung sistem produksi yang berkelanjutan (Dongmo et al., 2010; Quaye et al., 2025).

3. **Teknik yang digunakan beragam dan inovatif**

   Untuk mengatasi keterbatasan lahan, pertanian perkotaan memanfaatkan teknik seperti taman vertikal, hidroponik, aquaponik, dan penanaman dalam wadah yang lebih efisien ruang, sehingga menjadi solusi efektif bagi produksi pangan di lahan terbatas (Love et al., 2015; Benke, K. and Tomkins, 2017; Delaide et al., 2017).

4. **Pertanian berkelanjutan dan kelestarian lingkungan**

   Pertanian perkotaan mendorong sistem pangan berkelanjutan sekaligus menjaga kualitas lingkungan (Goldstein et al., 2016; Budi et al., 2020; Fadhilah et al., 2024). Karena itu, urban farming tidak hanya menyediakan pangan, tetapi juga mendukung keberlanjutan lingkungan (Sugihartini et al., 2023).

5. **Manfaat pada sisi sosial, edukasi dan ekonomi**

   Agenda ini mendorong kemandirian pangan, memperkuat interaksi sosial, serta membuka peluang ekonomi lokal (Draper, C. and Freedman, 2010; Yuan et al., 2022; Kafle et al., 2023). Secara keseluruhan, pertanian perkotaan berkontribusi pada peningkatan kesejahteraan masyarakat.

Urban farming sebenarnya telah dikenal sejak lama, namun dalam konteks modern mulai berkembang pesat dan mendapat perhatian lebih sejak abad ke-20. Praktik ini kini banyak diterapkan di berbagai negara, termasuk Indonesia, sebagai upaya memanfaatkan keterbatasan lahan di perkotaan untuk menghasilkan pangan segar dan sehat. Berikut adalah sejarah perkembangan urban farming.

Pertanian perkotaan telah berkembang sejak peradaban kuno, ketika masyarakat di wilayah seperti Mesopotamia dan Romawi Kuno mulai memanfaatkan lahan di sekitar permukiman untuk memenuhi kebutuhan pangan, yang kemudian berlanjut pada abad pertengahan melalui keberadaan kebun biara di Eropa sebagai sumber

pangan lokal (Mougeot, 2005; De Zeeuw et al., 2011). Perkembangan signifikan terjadi pada awal abad ke-20 melalui gerakan *Victory Gardens* selama Perang Dunia I dan II, yang mendorong pemanfaatan lahan kosong di kota dan terbukti mampu menyuplai sebagian besar kebutuhan sayuran masyarakat (Lawson, 2005). Setelah mengalami penurunan, praktik ini kembali berkembang pada periode 1970-an hingga 2000-an sebagai respons terhadap krisis ekonomi, urbanisasi, dan meningkatnya kesadaran akan keberlanjutan lingkungan (Viljoen, A. and Bohn, 2014). Memasuki abad ke-21, pertanian perkotaan mengalami transformasi pesat melalui pemanfaatan teknologi modern seperti hidroponik, akuaponik, dan pertanian vertikal, yang kini banyak diterapkan di kota-kota besar dunia untuk mengatasi keterbatasan lahan dan memperkuat ketahanan pangan (Despommier, 2010; Specht et al., 2014).

Di Indonesia, pertanian perkotaan berkembang sejak tahun 2000-an seiring meningkatnya kesadaran akan ketahanan pangan dan lingkungan. Inisiatif seperti Jakarta Berkebun dan Bandung Berkebun menunjukkan perannya tidak hanya sebagai penyedia pangan, tetapi juga sebagai sarana edukasi dan pemberdayaan masyarakat (Pamungkas, 2023). Hingga kini, urban farming terus berkembang sebagai solusi adaptif terhadap tantangan urbanisasi dan keberlanjutan pangan.



Gambar 17.2: Timeline Sejarah Pertanian Perkotaan
(Dokumen Pribadi)

Dalam beberapa tahun terakhir, urban farming berkembang pesat secara global sebagai respons terhadap urbanisasi, perubahan iklim, dan tantangan ketahanan pangan. Perkembangannya ditandai oleh adopsi teknologi seperti hidroponik, akuaponik, pertanian vertikal, serta integrasi *Internet of Things* (IoT) yang memungkinkan produksi lebih efisien dan berkelanjutan sepanjang tahun (Gurung et al., 2024). Namun demikian, praktik ini masih menghadapi berbagai kendala, seperti keterbatasan lahan, tingginya biaya teknologi, dan isu keberlanjutan energi, sehingga diperlukan inovasi dan dukungan kebijakan yang berkelanjutan untuk mengoptimalkan potensinya.

17.2 Model Kebun Komunitas dan Pertanian Vertikal

Ruang Terbuka Hijau (RTH) penting bagi keseimbangan lingkungan perkotaan, tetapi terus berkurang akibat pembangunan dan pertumbuhan penduduk yang memicu masalah seperti kenaikan suhu, penurunan kualitas udara, dan banjir. Kondisi ini mendorong pentingnya pengelolaan RTH yang berkelanjutan, sejalan dengan munculnya inisiatif urban farming berbasis komunitas di Indonesia sejak 2010 melalui Jakarta Berkebun yang menginspirasi kota lain dan meningkatkan partisipasi masyarakat (Kurnianingtyas, 2013).

Urban farming melalui kebun komunitas memanfaatkan lahan perkotaan untuk budidaya tanaman atau ternak dalam bentuk kebun keluarga, bersama, maupun edukatif yang melibatkan partisipasi masyarakat (Van Veenhuizen, 2006). Selain sebagai ruang hijau, kebun ini mendukung produksi pangan mandiri, mengurangi ketergantungan pasokan luar, serta memperkuat interaksi sosial dan pembelajaran lintas generasi (Sinaga et al., 2022). Pengelolaannya dipengaruhi aktor dan dukungan institusi, dengan tiga model utama: komunitas, pemerintah, dan kolaboratif, di mana model kolaboratif dinilai paling efektif karena menggabungkan partisipasi masyarakat dan dukungan administratif (Fox-Kämper et al., 2018; Jacob, M. and Rocha, 2021; Janowska, B., Łój, J. and Andrzejak, 2022).

Keberlanjutan kebun komunitas sangat ditentukan oleh tata kelola dan dukungan kelembagaan yang menyertainya. Kebun yang mendapat dukungan dari pemerintah atau lembaga formal umumnya lebih stabil dan mampu bertahan lebih lama (Jacob, M. and Rocha, 2021), namun keterlibatan aktif masyarakat tetap menjadi kunci utama karena membangun rasa memiliki dan tanggung jawab bersama.

Pengelolaan kebun komunitas dilakukan dengan pembagian peran, baik secara individu (plot-based) maupun kolektif, sesuai tujuan dan kondisi sosial (Fox-Kämper et al., 2018). Keberlanjutannya bergantung pada integrasi dalam perencanaan kota serta sinergi masyarakat, pemerintah, dan sistem kebijakan (Kurnianingtyas, 2013).



Gambar 17.3: Kebun Komunitas di Rio de Janeiro
(Alvim, 2022)



Gambar 17.4: Aktivitas Panen Terong (*brinjals*) di Kebun Komunitas "The Giving Garden" @ Kim Tian West Resident
(Liew, 2021)



Gambar 17.5: Teknik Pertanian Vertikal
(Irfan, 2021)

Pertanian vertikal merupakan inovasi pertanian perkotaan yang memanfaatkan ruang secara bertingkat seperti rak, dinding, atau struktur bangunan untuk mengatasi keterbatasan lahan sekaligus meningkatkan efisiensi produksi di wilayah urban yang kebutuhan pangannya terus meningkat (Banerjee, C. and Adenaeuer, 2014; Pamungkas, 2023). Perkembangannya kini juga didukung teknologi modern seperti hidroponik, aeroponik, serta pencahayaan buatan (LED) yang memungkinkan tanaman tumbuh optimal tanpa sepenuhnya bergantung pada kondisi alam, ditambah sistem kontrol iklim dan nutrisi otomatis yang membuat penggunaan air, energi, dan input produksi menjadi lebih efisien (Al-Kodmany, 2018; Beacham et al., 2019).

Dalam praktiknya, pertanian vertikal banyak menggunakan teknik budidaya tanpa tanah seperti hidroponik, aeroponik, dan akuaponik, yang memungkinkan pemberian nutrisi secara presisi sehingga lebih hemat air dan pupuk, sekaligus mempercepat pertumbuhan tanaman dan mengurangi risiko penyakit dari tanah (Banerjee, C. and Adenaeuer, 2014; Kalantari et al., 2018). Selain itu, penggunaan pencahayaan buatan seperti LED serta sistem kontrol lingkungan, di mana sensor dan sistem monitoring memungkinkan pengelolaan kondisi tanaman secara real-time, seperti kebutuhan air, nutrisi, dan pencahayaan, sehingga produktivitas dapat ditingkatkan secara konsisten sepanjang tahun (Al-Kodmany, 2018).

17.3 Pekarangan Produktif sebagai Sumber Pangan Keluarga

Pekarangan produktif adalah pemanfaatan lahan di sekitar rumah untuk mendukung ketersediaan pangan keluarga melalui budidaya tanaman atau sistem terpadu (Suradi et al., 2025). Konsep ini muncul sebagai respons terhadap keterbatasan lahan dan meningkatnya kebutuhan pangan, terutama di perkotaan, sehingga pekarangan berperan sebagai sumber pangan berkelanjutan yang mendukung kemandirian keluarga (Sasmita et al., 2023; Sitinjak et al., 2024). Pemanfaatannya dapat dilakukan melalui vertikultur, hidroponik, dan akuaponik yang efisien pada lahan sempit dengan pengelolaan air dan nutrisi yang terkontrol (Harahap, A.S. and Lubis, 2020; Hasanah et al., 2021), serta diperkuat pendekatan permakultur yang mengintegrasikan tanaman pangan, obat, dan pengolahan limbah organik (Shofyan, M. and Lestari, 2024). Secara umum, sistem ini memberi manfaat ekonomi dan sosial berupa penghematan biaya, peningkatan akses pangan sehat, serta peluang usaha kecil (Hasanah, Z., Yulianto, T. and Yudistira, 2021; Suradi et al., 2025).

Pekarangan produktif merupakan bentuk pemanfaatan lahan rumah tangga yang difungsikan sebagai unit produksi pangan secara mandiri dan berkelanjutan, sehingga berperan strategis dalam memperkuat ketahanan pangan dan gizi keluarga (Ritonga et al., 2023; Sasmita et al., 2023). Dengan demikian, pengembangan pekarangan produktif tidak hanya mendukung pemenuhan kebutuhan pangan keluarga dan ketahanan pangan lokal, tetapi juga berkontribusi pada peningkatan kualitas hidup masyarakat serta keberlanjutan sistem pangan secara lebih luas (Harahap, A.S. and Lubis, 2020; Sitinjak et al., 2024; Suradi et al., 2025).



Gambar 17.6: Pemanfaatan Pekarangan di Kelurahan Caturharjo (Admin, 2019)

Sistem budidaya di pekarangan dapat dilakukan dengan berbagai teknik sesuai kondisi lahan, seperti vertikultur yang memanfaatkan ruang vertikal untuk meningkatkan produktivitas pada lahan terbatas (Harahap, A.S. and Lubis, 2020; Sitinjak et al., 2024), hidroponik yang menggunakan larutan nutrisi air sehingga lebih efisien dan higienis (Nurwahyuni, 2012; Putra et al., 2019; Harmain et al., 2022), serta aquaponik yang mengintegrasikan ikan dan tanaman dalam satu sistem saling mendukung dan ramah lingkungan (Hasanah et al., 2021).

Pemanfaatan pekarangan sebagai lahan produktif dapat dilakukan melalui pendekatan sederhana hingga berbasis teknologi (Shofyan, M. and Lestari, 2024), pengelolaan ini tidak hanya ramah lingkungan, tetapi juga mendukung pemberdayaan masyarakat melalui peningkatan keterampilan, kemandirian pangan, dan tambahan pendapatan rumah tangga (Minarni et al., 2017; Putra et al., 2019). Selain itu, pemanfaatan pekarangan menjadi bentuk adaptasi keterbatasan lahan perkotaan yang berdampak pada lingkungan dan kesejahteraan masyarakat, sehingga perlu didukung edukasi dan kebijakan yang tepat agar manfaatnya optimal (Khotimah et al., 2023; Ritonga et al., 2023). Adapun manfaat yang dapat diperoleh antara lain sebagai berikut:

1. **Mendukung ketahanan pangan**

   Pemanfaatan pekarangan dapat menjadi cara sederhana namun efektif untuk menyediakan pangan secara mandiri. Melalui pengelolaan yang optimal, kebutuhan pangan dapat dipenuhi tanpa sepenuhnya bergantung pada pasar (Sasmita et al., 2023; Suradi et al., 2025).

2. **Manfaat ekonomi**

   Selain mendukung ketahanan pangan, pekarangan produktif juga memberikan manfaat ekonomi bagi rumah tangga. Hasil budidaya dapat mengurangi pengeluaran harian dan bahkan menjadi sumber pendapatan tambahan jika dikelola secara lebih intensif dan berorientasi pasar (Nurwahyuni, 2012; Harahap, A.S. and Lubis, 2020).

3. **Manfaat lingkungan**

   Penerapan praktik budidaya seperti penggunaan pupuk organik dan pemanfaatan limbah rumah tangga menjadi kompos membantu mengurangi pencemaran sekaligus meningkatkan kesuburan tanah (Khotimah et al., 2023; Shofyan, M. and Lestari, 2024).

4. **Manfaat sosial**

   Program pemanfaatan pekarangan umumnya melibatkan kelompok masyarakat seperti kelompok wanita tani, yang tidak hanya meningkatkan keterampilan dan kapasitas anggotanya, tetapi juga mendorong partisipasi dalam kesibukan produktif (Minarni et al., 2017; Sitinjak et al., 2024).

Dalam perspektif agroekologi, pekarangan dipandang sebagai sistem sosial-ekologis yang mengintegrasikan produksi pangan dengan keberlanjutan lingkungan dan kearifan lokal. Menurut Altieri (2018), Francis et al. (2003) dan Gliessman (2016), pendekatan ini menekankan pemanfaatan sumber daya lokal secara efisien sekaligus menjaga keseimbangan manusia dan lingkungan, sehingga pekarangan berperan sebagai ruang produksi sekaligus penopang ekosistem. Wezel et al. (2020) juga menyoroti pentingnya diversifikasi tanaman yang meningkatkan keanekaragaman hayati serta ketahanan sistem terhadap hama dan perubahan iklim, sejalan dengan Altieri (2013) yang menyatakan bahwa sistem beragam lebih stabil dan efisien.

Agroekologi menekankan sistem siklus tertutup dalam pengelolaan input pertanian Tittonell (2019), yang pada pekarangan terlihat dari pemanfaatan limbah organik menjadi kompos, efisiensi air, serta integrasi tanaman dengan ternak atau ikan, sehingga tercipta sistem produksi yang sekaligus mendaur ulang sumber daya secara berkelanjutan. Dari sisi sosial, pendekatan ini memperkuat partisipasi keluarga dan kemandirian pangan melalui aktivitas budidaya yang juga membangun kerja sama, gotong royong, serta transfer pengetahuan antar generasi (Food and Agriculture Organization, 2018). Selain itu, sistem pangan lokal berbasis agroekologi meningkatkan akses pangan sehat dan mengurangi ketergantungan pada sistem pangan global (Nicoletis et al., 2019).

Pemanfaatan pekarangan dalam pembangunan ketahanan pangan Indonesia didorong melalui program Kawasan Rumah Pangan Lestari (KRPL) yang mengoptimalkan pekarangan sebagai sumber pangan berkelanjutan berbasis rumah tangga. KRPL berfokus pada peningkatan ketersediaan pangan beragam, bergizi, dan aman melalui pemberdayaan masyarakat, terutama Kelompok Wanita Tani (KWT), serta pengembangan budidaya tanaman pangan dengan pelatihan dan pendampingan (Badan Pangan Nasional, 2019; Widarawati et al., 2021). Implementasinya turut didukung inovasi seperti hidroponik, vertikultur, dan aquaponik untuk meningkatkan efisiensi lahan dan produksi (Prita, D.S. and Widiyawati, 2019), sehingga berdampak pada pemenuhan kebutuhan pangan, peningkatan pendapatan, dan pola konsumsi lebih sehat (Nizar, R. and Amalia, 2024). Namun, keberhasilannya masih terkendala keterbatasan pengetahuan, pendampingan, dan konsistensi pengelolaan, sehingga membutuhkan dukungan kelembagaan dan keberlanjutan program (Ashari et al., 2012). Secara keseluruhan, pemanfaatan pekarangan berpotensi memperkuat ketahanan pangan rumah tangga melalui integrasi sosial, ekonomi, dan teknologi.

17.4 Kontribusi Pertanian Perkotaan terhadap Ketahanan Pangan Lokal

Ketahanan pangan adalah kondisi terpenuhinya kebutuhan pangan yang cukup, aman, dan berkelanjutan. Menurut (Sjarkowi, 2014), ketahanan pangan bersifat multidimensi karena mencakup kecukupan, keamanan, kemandirian, dan keberagaman pangan yang saling terkait dari produksi hingga konsumsi. Dalam penguatannya, sistem pangan lokal seperti urban farming dapat menjadi solusi di

wilayah terbatas lahan karena mampu mendukung produksi pangan mandiri serta mengurangi ketergantungan pada rantai distribusi panjang (Fauzi et al., 2016).

Sejalan dengan berbagai temuan, urban farming di tingkat rumah tangga terbukti mampu meningkatkan kemandirian dan ketahanan pangan keluarga melalui peningkatan ketersediaan bahan pangan segar yang mudah diakses (Safitri, D.A. and Rasyidah, 2022), sekaligus berperan sebagai strategi adaptif menghadapi keterbatasan lahan dan pertumbuhan penduduk di perkotaan (Septya et al., 2022). Dalam perspektif keberlanjutan, pengembangan pertanian perkotaan perlu mengintegrasikan aspek ekonomi, sosial, dan lingkungan agar tidak hanya berfokus pada kuantitas, tetapi juga kualitas dan kesejahteraan masyarakat (Sugihartini et al., 2023; Amri, 2024), serta memanfaatkan ruang sempit perkotaan untuk mengurangi ketergantungan pada pasokan luar wilayah (Fauzi et al., 2016). Lebih jauh, praktik ini juga memperpendek rantai distribusi sehingga pangan menjadi lebih segar dan mudah diakses, sekaligus meningkatkan produksi lokal secara berkelanjutan di tingkat rumah tangga (Safitri, D.A. and Rasyidah, 2022), yang pada akhirnya memperkuat stabilitas ketersediaan pangan di perkotaan, terutama saat terjadi gangguan distribusi atau krisis (Amri, 2024).

Stabilitas pangan merujuk pada kemampuan sistem pangan dalam menjaga ketersediaan dan akses pangan secara konsisten meskipun terjadi gangguan seperti fluktuasi harga, perubahan iklim, atau masalah distribusi. Fauzi et al. (2016) menjelaskan bahwa pertanian perkotaan berperan penting dalam memperkuat stabilitas pangan lokal karena mampu menyediakan produksi pangan berbasis komunitas yang tersebar, sehingga ketergantungan pada pasokan luar wilayah dapat berkurang dan sistem pangan menjadi lebih tangguh. Dalam praktiknya, stabilitas ini juga didukung oleh keberlanjutan produksi di tingkat rumah tangga maupun komunitas, Amri (2024) menekankan bahwa urban farming yang dilakukan secara rutin dapat menjaga kontinuitas ketersediaan pangan, terutama sayuran, sehingga masyarakat memiliki cadangan yang lebih stabil dan tidak terlalu terpengaruh fluktuasi pasar. Selain itu, Safitri, D.A. and Rasyidah (2022) serta Septya et al. (2022) menunjukkan bahwa urban farming dapat mengurangi risiko gangguan distribusi melalui pemendekan rantai pasok dan meningkatkan akses pangan yang lebih cepat, sekaligus memperkuat resiliensi rumah tangga terhadap perubahan sosial-ekonomi. Dalam jangka panjang, Sugihartini et al. (2023) menambahkan bahwa diversifikasi komoditas dan integrasi sistem budidaya dalam pertanian perkotaan dapat memperkuat stabilitas pangan secara menyeluruh,

sehingga tidak hanya meningkatkan ketersediaan pangan, tetapi juga memastikan ketersediaannya tetap stabil.

17.5 Tantangan dan Peluang Agroekologi di Wilayah Perkotaan

Pertanian perkotaan menghadapi tantangan struktural yang cukup kompleks, terutama terkait dengan keterbatasan lahan dan dinamika tata ruang kota. Wilayah perkotaan yang padat penduduk menyebabkan ruang terbuka yang tersedia untuk usaha pertanian menjadi semakin terbatas dan terfragmentasi. Kondisi ini diperparah oleh tingginya nilai ekonomi lahan di perkotaan, sehingga alokasi ruang lebih diprioritaskan untuk pembangunan infrastruktur, perumahan, dan sektor komersial dibandingkan dengan usaha pertanian (Gulyas, B.Z. and Edmondson, 2021). Akibatnya, praktik pertanian perkotaan seringkali bersifat temporer dan rentan terhadap alih fungsi lahan.

Selain keterbatasan fisik lahan, kebijakan tata ruang dan regulasi zonasi juga menjadi hambatan signifikan. Banyak kota masih menerapkan kebijakan yang belum sepenuhnya mengakomodasi aktivitas pertanian dalam perencanaan wilayahnya. Pembatasan penggunaan lahan, kekhawatiran terhadap gangguan lingkungan, serta regulasi yang tidak adaptif sering kali menghambat pengembangan pertanian perkotaan secara formal (Çelik, 2017). Hal ini menunjukkan adanya kesenjangan antara kebutuhan masyarakat terhadap sistem pangan lokal dengan kerangka kebijakan yang tersedia.

Tantangan struktural lainnya berkaitan dengan kualitas lingkungan perkotaan, khususnya kondisi tanah dan tingkat pencemaran. Tanah di wilayah perkotaan sering terkontaminasi oleh logam berat, limbah industri, dan residu bahan kimia, yang dapat membahayakan kesehatan manusia dan mengganggu pertumbuhan tanaman (Igalavithana et al., 2015). Selain itu, polusi udara dan air juga berpotensi mempengaruhi kualitas hasil pertanian, sehingga diperlukan upaya mitigasi seperti penggunaan media tanam alternatif, raised bed, dan teknik fitoremediasi.

Selain itu, akses terhadap teknologi dan inovasi juga belum merata, meskipun berbagai teknologi seperti *Internet of Things* (IoT), sistem irigasi otomatis, dan sensor lingkungan telah berkembang pesat, implementasinya masih terbatas pada kalangan tertentu yang memiliki kapasitas finansial dan pengetahuan teknis yang

memadai. Hal ini menciptakan kesenjangan antara potensi teknologi dan realitas di lapangan (Wortman, S.E. and Lovell, 2013).

Dari perspektif efisiensi, penggunaan teknologi dalam pertanian perkotaan sebenarnya memiliki potensi besar dalam mengoptimalkan penggunaan air, energi, dan nutrisi. Sistem seperti hidroponik dan aeroponik memungkinkan produksi yang lebih efisien dibandingkan metode konvensional, terutama dalam kondisi lahan terbatas. Namun, tingginya ketergantungan terhadap teknologi juga meningkatkan risiko operasional, seperti kegagalan sistem dan biaya pemeliharaan yang tinggi.

Tantangan ekonomi, teknologi, sosial, dan kelembagaan dalam agroekologi perkotaan menuntut adanya keseimbangan antara inovasi dan keterjangkauan, sekaligus penguatan kapasitas masyarakat. Pengembangan teknologi yang adaptif, murah, dan mudah diakses menjadi kunci untuk memperluas adopsi di wilayah perkotaan, namun keberhasilannya juga sangat dipengaruhi oleh aspek sosial seperti rendahnya pengetahuan dan keterampilan masyarakat dalam mengelola pertanian kota. Karena banyak warga urban tidak memiliki latar belakang pertanian, diperlukan pelatihan dan pendampingan agar pengelolaan usaha tani dapat berjalan efektif (Hendrickson, M.K. and Porth, 2012).

Selain itu, partisipasi masyarakat dalam proses pertanian perkotaan juga masih bervariasi. Faktor seperti keterbatasan waktu, minat, serta persepsi terhadap pertanian sebagai pekerjaan yang kurang menarik dapat menghambat keterlibatan aktif masyarakat. Padahal, keberhasilan model seperti kebun komunitas sangat bergantung pada kolaborasi dan partisipasi kolektif (Sousa, R. and Batista, 2013).

Dari sisi kelembagaan, kurangnya dukungan dari pemerintah dan lemahnya koordinasi antar pemangku kepentingan menjadi hambatan tambahan. Kebijakan yang belum terintegrasi, minimnya program pendampingan, serta keterbatasan akses terhadap bantuan teknis dan finansial menyebabkan pengembangan pertanian perkotaan berjalan secara sporadis dan tidak berkelanjutan (Poulsen, 2017).

Lebih lanjut, isu keadilan sosial juga menjadi perhatian dalam pengembangan pertanian perkotaan. Kelompok masyarakat berpenghasilan rendah seringkali menghadapi hambatan dalam mengakses lahan, teknologi, dan pasar, sehingga berpotensi memperlebar kesenjangan dalam sistem pangan perkotaan. Oleh karena

itu, pendekatan inklusif dan berbasis komunitas menjadi penting dalam memastikan keberlanjutan dan keadilan dalam sistem agroekologi perkotaan. Di tengah berbagai tantangan, agroekologi perkotaan memiliki peluang besar untuk dikembangkan sebagai bagian dari sistem pangan berkelanjutan. Meningkatnya kesadaran masyarakat terhadap pentingnya pangan sehat, aman, dan ramah lingkungan menjadi salah satu pendorong utama. Tren gaya hidup berkelanjutan mendorong permintaan terhadap produk lokal yang segar dan bebas bahan kimia (Lorenz, 2015)

Agroekologi perkotaan memiliki potensi dalam mendukung ekonomi lokal melalui pengembangan usaha urban farming, seperti penjualan produk segar, olahan pangan, hingga agrowisata yang dapat menciptakan lapangan kerja serta meningkatkan pendapatan masyarakat, sehingga berkontribusi pada pembangunan ekonomi hijau yang berkelanjutan. Untuk mewujudkannya, diperlukan strategi yang terintegrasi dengan melibatkan berbagai pemangku kepentingan, termasuk penguatan kebijakan yang mengintegrasikan pertanian dalam perencanaan tata ruang kota, penyediaan regulasi yang adaptif, pemberian insentif bagi pelaku pertanian perkotaan, serta perlindungan terhadap lahan produktif (Quon, 1999).

Selain itu, peningkatan kapasitas masyarakat melalui edukasi dan pelatihan menjadi faktor kunci. Program pelatihan tentang teknik budidaya, manajemen usaha, serta penggunaan teknologi perlu dikembangkan secara sistematis untuk meningkatkan kompetensi pelaku urban farming. Pendampingan berkelanjutan juga penting untuk memastikan keberhasilan implementasi di lapangan.

Dari sisi teknologi, pengembangan inovasi yang terjangkau dan mudah diadopsi perlu menjadi prioritas. Kolaborasi antara pemerintah, akademisi, dan sektor swasta dapat mendorong pengembangan teknologi yang sesuai dengan kondisi lokal. Selain itu, pemanfaatan teknologi digital dapat membantu dalam pemasaran, manajemen produksi, dan distribusi hasil pertanian. Terakhir, penguatan kelembagaan dan jejaring menjadi strategi penting dalam mendukung keberlanjutan agroekologi perkotaan. Pembentukan kelompok tani, koperasi, serta kemitraan dengan sektor swasta dapat meningkatkan akses terhadap pasar dan sumber daya. Dengan pendekatan yang komprehensif dan kolaboratif, agroekologi perkotaan dapat berkembang sebagai sistem pangan yang tangguh, inklusif, dan berkelanjutan.

BAB 18
PERSPEKTIF DAN PENGEMBANGAN AGROEKOLOGI

18.1 Paradigma Keilmuan dalam Agroekologi

Era globalisasi saat ini menuntut berbagai sektor kehidupan berkembang secara cepat dan adaptif, termasuk sektor pertanian (Arizpe *et al.,* 2011). Pertumbuhan jumlah penduduk dunia yang terus meningkat berbanding lurus dengan kenaikan kebutuhan pangan global. Kondisi tersebut mendorong intensifikasi pertanian melalui penerapan sistem pertanian konvensional yang berorientasi pada peningkatan produksi dalam waktu singkat dan skala besar. Praktik ini umumnya ditandai dengan penggunaan input eksternal secara masif, seperti pupuk sintetis, pestisida kimia, serta mekanisasi intensif untuk mencapai produktivitas yang tinggi. Namun, di balik keberhasilannya dalam meningkatkan hasil produksi, sistem pertanian konvensional juga menimbulkan berbagai dampak negatif terhadap lingkungan maupun kehidupan sosial masyarakat (Migliorin *et al.*, 2018). Degradasi kualitas tanah dan air akibat residu bahan kimia, hilangnya keanekaragaman hayati pada ekosistem pertanian, hingga meningkatnya risiko gangguan kesehatan pada petani akibat paparan bahan berbahaya menjadi beberapa permasalahan yang semakin mendapat perhatian global. Oleh karena itu, muncul kebutuhan akan pendekatan pertanian yang tidak hanya berorientasi pada produktivitas, tetapi juga mampu menjaga keseimbangan ekologi, kesehatan manusia, serta keberlanjutan sistem pangan dalam jangka panjang.

Salah satu pendekatan yang dinilai mampu menjawab berbagai problematika pertanian modern tersebut adalah konsep agroekologi. Agroekologi didefinisikan sebagai disiplin ilmu yang mempelajari hubungan antara organisme hidup, lingkungan, serta aktivitas sosial dalam suatu sistem pertanian. Sebagai cabang ilmu pengetahuan, agroekologi mengkaji interaksi berbagai komponen biotik dan abiotik yang membentuk agroekosistem, termasuk hubungan antara tanaman, tanah, mikroorganisme, iklim, hingga aktivitas manusia di dalamnya. Sementara itu, dalam aspek praktik, agroekologi menekankan penerapan sistem pertanian

berkelanjutan yang tidak hanya berorientasi pada peningkatan produksi, tetapi juga menjaga keseimbangan ekologi dan keberlanjutan sumber daya alam. Seiring dengan berkembangnya tantangan pangan global, definisi dan ruang lingkup agroekologi juga mengalami pergeseran paradigma. Agroekologi tidak lagi dipandang sebagai pendekatan pertanian tradisional atau praktik budidaya berskala kecil yang bersifat konvensional, melainkan telah berkembang menjadi pendekatan ilmiah dan strategis dalam pembangunan sistem pangan berkelanjutan (Arapis and Fostieri, 2020). Paradigma baru tersebut menempatkan agroekologi sebagai solusi yang mampu meningkatkan produktivitas pertanian sekaligus menjaga stabilitas lingkungan dan kesejahteraan sosial masyarakat. Perkembangan agroekologi dewasa ini tidak hanya ditunjukkan melalui inovasi metode budidaya yang lebih adaptif dan ramah lingkungan, tetapi juga melalui penguatan interaksi sosial antar pelaku pertanian, pemberdayaan petani, serta pemanfaatan teknologi modern yang mendukung efisiensi dan keberlanjutan sistem pertanian.

18.2 Pendekatan Partisipatif Berbasis Petani

Petani Dalam pendekatan agroekologi, petani memegang peranan penting sebagai aktor utama dalam keberlangsungan sistem pertanian. Namun, dalam berbagai pembahasan pertanian, petani masih sering diposisikan sebatas sebagai objek pengamatan, baik dalam uraian mengenai kebiasaan budidaya, pola perilaku, maupun tingkat produksi yang dihasilkan. Kondisi tersebut menjadikan petani hanya berada pada posisi diamati tanpa keterlibatan aktif dalam proses pengambilan keputusan maupun pengembangan inovasi pertanian (Behera and France, 2023). Padahal, perkembangan pertanian modern menunjukkan bahwa petani saat ini semakin terbuka terhadap perubahan, inovasi, dan penerapan teknologi baru yang mendukung keberlanjutan sistem pertanian. Oleh karena itu, diperlukan pendekatan keilmuan yang mampu membangun kolaborasi aktif antara akademisi, pendamping lapangan, dan petani melalui proses pertukaran pengetahuan, pengalaman, serta teknologi secara langsung.

Pendekatan partisipatif menjadi salah satu metode yang relevan dalam mendukung pengembangan agroekologi berkelanjutan (Kyveryga, 2019). Melalui pendekatan ini, petani tidak hanya berperan sebagai responden, tetapi juga terlibat sebagai mitra dalam proses identifikasi masalah, perencanaan aktivitas, pelaksanaan eksplorasi, hingga evaluasi hasil. Kolaborasi tersebut

memungkinkan terjadinya transfer ilmu pengetahuan dari akademisi maupun praktisi kepada petani secara lebih aplikatif dan kontekstual sesuai kondisi lapangan. Salah satu bentuk observasi partisipatif yang banyak diterapkan dalam pengembangan pertanian berkelanjutan adalah *On-Farm Research* (OFR), yaitu metode eksplorasi yang dilaksanakan secara langsung di lahan pertanian milik petani. Pada penerapannya, *On-Farm Researc*h memiliki beberapa prinsip utama yang menjadi dasar dalam pendekatan partisipatif.

1. Sistem pertanian dipandang sebagai suatu kesatuan yang saling terhubung sehingga setiap komponen dalam agroekosistem perlu dipahami secara menyeluruh. Pendekatan ini memungkinkan identifikasi masalah dan penentuan prioritas pengembangan pertanian secara lebih tepat.
2. Prosedur pemeriksaan dirancang sesederhana mungkin agar mudah dipahami dan diterapkan oleh petani, terutama karena sebagian besar petani memiliki keterbatasan dalam aspek teknis dan akademik, seperti pengolahan data dan pengawasan.
3. Temuan diarahkan pada tujuan yang aplikatif dan mampu memberikan manfaat nyata bagi pengembangan praktik budidaya maupun penanganan pascapanen.
4. Pendekatan ini mendorong pemanfaatan potensi sumber daya lokal yang tersedia di sekitar lingkungan pertanian sehingga mampu menciptakan inovasi teknologi yang lebih adaptif, efisien, dan berkelanjutan.

Penerapan prinsip-prinsip tersebut bertujuan menciptakan hubungan kolaboratif antara peneliti dan petani dalam proses pengambilan keputusan berbasis kondisi nyata sistem pertanian. Selain berfokus pada penyelesaian permasalahan budidaya, investigasi partisipatif dalam agroekologi juga berkembang ke arah penguatan aspek sosial dan ekonomi masyarakat pertanian (Vliet and Giller, 2017). Dengan demikian, pendekatan ini tidak hanya menghasilkan inovasi teknologi pertanian, tetapi juga mendorong pemberdayaan petani dan pembangunan sistem pertanian yang lebih inklusif dan berkelanjutan.

Tidak hanya terbatas pada *On-Farm Research* (OFR), pendekatan partisipatif berbasis petani juga dapat diimplementasikan melalui berbagai pendekatan lain, seperti *Farmer Field School* (FFS), *Participatory Action Research* (PAR), dan

Participatory Rural Appraisal (PRA). Masing-masing metode memiliki karakteristik dan tujuan yang berbeda, namun tetap menempatkan petani sebagai aktor utama dalam proses pengembangan pertanian berkelanjutan. Dalam praktiknya, berbagai pendekatan tersebut sering kali saling terhubung dan digunakan secara bersamaan untuk mendukung pengembangan agroekologi yang lebih adaptif dan aplikatif. Kombinasi antarmetode memungkinkan terjadinya integrasi antara pemahaman lapangan, proses pembelajaran partisipatif, identifikasi permasalahan lokal, hingga pemberdayaan masyarakat pertanian secara menyeluruh.

Salah satu metode yang banyak diterapkan dalam pengembangan agroekologi adalah *Farmer Field School* (FFS) atau sekolah lapang petani (Abdullatip, A. Anwar, M. Sarlan, M. Prasetyowati, 2025). Metode ini merupakan pendekatan pembelajaran partisipatif yang dilaksanakan secara langsung di lahan pertanian melalui operasi pengamatan, diskusi, dan eksperimen bersama antara petani dan fasilitator (Bhuiyan and Maharjan, 2022). Pendekatan FFS dinilai efektif dalam meningkatkan kapasitas petani karena proses pembelajaran dilakukan berdasarkan kondisi nyata di lapangan. Berdasarkan *Campbell Systematic Review*, metode FFS terbukti mampu meningkatkan pengetahuan dan keterampilan petani dalam berbagai tahapan budidaya, mulai dari pemeliharaan tanaman, penggunaan pestisida yang lebih bijak, hingga kesibukan panen dan pascapanen. Uraian tersebut menggunakan 92 data kuantitatif dan 20 laporan kualitatif yang berasal dari berbagai negara berpendapatan rendah dan menengah. Hasil sintesis data menunjukkan bahwa penerapan FFS mampu meningkatkan produktivitas pertanian sebesar 13% serta meningkatkan pendapatan petani hingga 20% (Waddington *et al.*, 2014).

Investigasi partisipatif berbasis petani menjadi salah satu pendekatan penting dalam pengembangan agroekologi karena mampu mengintegrasikan pengetahuan lokal petani dengan inovasi ilmiah secara lebih aplikatif dan berkelanjutan. Kolaborasi tersebut menunjukkan bahwa pengembangan sistem pertanian modern tidak hanya memerlukan keterlibatan petani, tetapi juga dukungan berbagai disiplin ilmu dan pemangku kepentingan lainnya. Oleh karena itu, pendekatan transdisiplin menjadi aspek penting dalam pengamatan agroekologi guna menjawab kompleksitas permasalahan pertanian dan pangan secara lebih holistik.

18.3 Pendekatan Transdisiplin dalam Pengembangan Agroekologi

Pendekatan transdisiplin dalam agroekologi berkembang sebagai upaya untuk memahami sistem pertanian secara menyeluruh. Agroekosistem tidak hanya berkaitan dengan aspek budidaya, tetapi juga melibatkan interaksi antara lingkungan, masyarakat, ekonomi, serta kebijakan yang saling memengaruhi (Freudenberger *et al.*, 2018). Oleh karena itu, agroekologi memerlukan integrasi berbagai disiplin ilmu dan keterlibatan banyak pihak guna menghasilkan solusi pertanian yang lebih berkelanjutan dan adaptif. Pendekatan transdisiplin menggabungkan lebih dari satu bidang ilmu melalui perpaduan konsep, pendekatan, dan teori dari disiplin ilmu yang berbeda, sekaligus melibatkan aktor non-akademik dalam proses penyusunan solusi terhadap suatu permasalahan (Xiangjie *et al.*, 2019). Dalam agroekologi, pendekatan ini tidak hanya menghubungkan ilmu agronomi dan ekologi, tetapi juga mencakup aspek sosial, ekonomi, budaya, kesehatan, teknologi, serta kebijakan publik dalam memahami sistem pertanian secara utuh.

Pendekatan transdisiplin dalam agroekologi dapat diimplementasikan melalui integrasi berbagai bidang ilmu yang saling mendukung dalam pengembangan sistem pertanian berkelanjutan. Integrasi tersebut tidak hanya berfokus pada peningkatan produksi pertanian, tetapi juga mempertimbangkan keberlanjutan lingkungan, kesejahteraan masyarakat, perkembangan teknologi, hingga ketahanan pangan (Samaniego *et al.*, 2025). Melalui keterkaitan antarbidang tersebut, agroekologi berkembang menjadi pendekatan yang mampu menjawab tantangan pertanian modern secara lebih holistik.

1. Agronomi

Dalam bidang agronomi, pengembangan agroekologi menekankan praktik budidaya yang tidak hanya berorientasi pada peningkatan hasil produksi, tetapi juga menjaga keseimbangan faktor biotik dan abiotik dalam agroekosistem. Penggunaan pupuk dan pestisida tetap diperlukan untuk mendukung pertumbuhan tanaman, namun penerapannya harus mempertimbangkan jenis, dosis, serta dampak lingkungan yang ditimbulkan. Saat ini, berbagai inovasi telah dikembangkan melalui pemanfaatan pupuk organik dan pestisida nabati yang lebih ramah lingkungan (Fritz *et al.*, 2021). Berbagai bahan alami, seperti limbah

makanan, cangkang telur, maupun bahan organik lainnya mulai dimanfaatkan sebagai alternatif input pertanian berkelanjutan. Oleh karena itu, pengamatan lanjutan sangat diperlukan untuk meningkatkan efektivitas dan optimalisasi pemanfaatan bahan-bahan alami tersebut agar mampu memberikan hasil produksi yang optimal sekaligus menjaga keberlanjutan lingkungan.

2. Ekologi

Aspek ekologi dalam agroekologi berperan penting dalam menjaga keseimbangan antara komponen biotik dan abiotik pada sistem pertanian. Salah satu penerapan yang berkembang saat ini adalah penggunaan agen hayati untuk mengendalikan Organisme Pengganggu Tanaman (OPT) secara lebih ramah lingkungan. Selain itu, penerapan sistem pertanian terpadu (*integrated farming system*) juga semakin banyak dikembangkan untuk meningkatkan efisiensi pemanfaatan sumber daya (Atapattu *et al.*, 2025). Contoh penerapannya antara lain sistem mina padi, aquaculture, serta integrasi tanaman dan peternakan yang mampu meningkatkan produktivitas sekaligus menjaga stabilitas ekosistem pertanian.

3. Ekonomi

Pendekatan agroekologi juga membuka peluang pengembangan ekonomi yang mampu meningkatkan kesejahteraan petani dan masyarakat pertanian. Sistem pertanian berkelanjutan mendorong terbentuknya berbagai kelembagaan ekonomi, seperti koperasi petani dan kelompok usaha tani yang berperan dalam memperkuat distribusi hasil produksi serta meningkatkan posisi tawar petani di pasar (Tan and Mailena, 2021). Selain itu, pengembangan sektor pascapanen dan industri pengolahan hasil pertanian juga menjadi bagian penting dalam meningkatkan nilai tambah produk pertanian. Perdagangan hasil pertanian, baik pada tingkat lokal maupun internasional, turut membuka peluang kerja sama ekonomi yang lebih luas dalam mendukung pembangunan sistem pangan berkelanjutan.

4. Sosial

Dalam aspek sosial, agroekologi mendorong penguatan hubungan antarmasyarakat pertanian melalui pembentukan organisasi maupun komunitas petani. Keberadaan kelompok tani dan organisasi pertanian memungkinkan terjadinya pertukaran pengetahuan, pengalaman, serta penguatan kerja sama antarpetani (Wang and Xu, 2024). Selain itu, kolaborasi antara petani dan akademisi dalam berbagai forum keilmuan dan pendampingan mampu memperluas akses petani terhadap inovasi

dan perkembangan ilmu pengetahuan. Kondisi tersebut tidak hanya memperkuat kapasitas sosial masyarakat pertanian, tetapi juga membuka peluang pengembangan ekonomi dan peningkatan kesejahteraan secara lebih luas.

5. Teknologi

Perkembangan teknologi dalam agroekologi diarahkan pada inovasi yang mendukung efisiensi produksi sekaligus menjaga keberlanjutan lingkungan (Katunar *et al.,* 2025). Berbagai temuan telah menghasilkan teknologi pertanian yang lebih ramah lingkungan, seperti pupuk organik, pestisida nabati, serta penggunaan energi terbarukan pada mesin pertanian. Selain itu, pemanfaatan panel surya dan bahan bakar alternatif mulai dikembangkan untuk mengurangi emisi gas rumah kaca dari sektor pertanian. Meskipun demikian, tantangan utama dalam penerapan teknologi ramah lingkungan masih berkaitan dengan biaya produksi dan distribusi yang relatif tinggi. Oleh karena itu, diperlukan telaah lanjutan untuk meningkatkan efisiensi teknologi agar lebih mudah diakses dan diterapkan oleh masyarakat pertanian.

6. Kesehatan

Agroekologi juga memiliki keterkaitan erat dengan aspek kesehatan masyarakat karena produk pertanian menjadi bagian utama dari konsumsi harian manusia. Oleh karena itu, berbagai inovasi dikembangkan untuk menghasilkan produk pangan yang lebih sehat dan bergizi. Salah satu pendekatan yang berkembang adalah biofortifikasi tanaman, yaitu upaya meningkatkan kandungan zat gizi tertentu pada produk pertanian (Glahn and Noh, 2021). Contohnya adalah penambahan kandungan Fe dan Zn pada tanaman padi untuk membantu mengatasi permasalahan kekurangan gizi dan stunting. Selain itu, pengembangan pangan rendah gula juga menjadi salah satu inovasi pertanian yang mendukung kebutuhan masyarakat dengan kondisi kesehatan tertentu, seperti diabetes.

7. Kebijakan

Pengembangan agroekologi tidak dapat berjalan optimal tanpa dukungan kebijakan dari pemerintah dan berbagai pemangku kepentingan. Kebijakan pertanian yang berkelanjutan diperlukan untuk menciptakan keseimbangan antara sektor pertanian dengan sektor pembangunan lainnya (Ifani. *et al.*, 2024). Dukungan kebijakan dapat diwujudkan melalui penguatan regulasi pertanian ramah lingkungan, perlindungan petani lokal, pengembangan keilmuan dan inovasi, hingga pemberian

akses terhadap teknologi dan pasar. Dengan adanya dukungan kebijakan yang tepat, berbagai inovasi dalam bidang agroekologi dapat diterapkan secara lebih luas guna mendukung pembangunan sistem pangan yang berkelanjutan.

Pendekatan transdisiplin dalam agroekologi menunjukkan bahwa pembangunan pertanian berkelanjutan tidak dapat dilakukan hanya melalui satu bidang ilmu maupun satu pihak saja. Integrasi antara ilmu pengetahuan, teknologi, masyarakat, serta dukungan kebijakan menjadi landasan penting dalam menghasilkan sistem pertanian yang adaptif, produktif, dan berkelanjutan. Kolaborasi tersebut juga menjadi pendorong lahirnya berbagai inovasi pengamatan yang mendukung penguatan ketahanan pangan di tingkat nasional.

18.4 Inovasi Pengembangan Ketahanan Pangan di Tingkat Nasional

Ketahanan pangan menjadi salah satu isu strategis yang terus mendapat perhatian di berbagai negara, termasuk Indonesia. Peningkatan jumlah penduduk, perubahan iklim, degradasi lahan, serta ketidakstabilan ekonomi global menjadi tantangan yang memengaruhi keberlanjutan sistem pangan nasional. Oleh karena itu, berbagai inovasi terus dikembangkan untuk meningkatkan produktivitas pertanian, menjaga keberlanjutan sumber daya alam, serta memperkuat ketersediaan pangan bagi masyarakat secara berkelanjutan. Di Indonesia, penguatan ketahanan pangan nasional dilakukan melalui pengembangan produk pangan, teknologi pertanian, dan kebijakan yang mendukung keberlanjutan sistem pangan.

18.4.1 Produk Pangan Hibrida

Masyarakat Indonesia umumnya menjadikan beras dan jagung sebagai bahan pangan utama yang dikonsumsi sehari-hari. Namun, berbagai ancaman global, seperti perubahan iklim, kekeringan, dan penurunan kualitas lingkungan, sering kali memengaruhi stabilitas produksi pangan tersebut. Oleh karena itu, pengembangan varietas unggul hibrida menjadi salah satu inovasi penting dalam mendukung ketahanan pangan nasional. Varietas hibrida merupakan varietas unggul hasil program pemuliaan tanaman yang memiliki potensi produksi lebih tinggi dibandingkan varietas bersari bebas. Penggunaan varietas hibrida dinilai mampu meningkatkan produktivitas tanaman hingga sekitar 15% lebih tinggi dibandingkan varietas konvensional (Sari *et al.,* 2018).

Pengembangan varietas unggul melalui program pemuliaan tanaman juga memberikan dampak terhadap peningkatan produksi dan nilai tambah usaha tani, terutama karena kondisi agroklimat di Indonesia sangat beragam sehingga memerlukan varietas yang adaptif terhadap lingkungan tertentu. Varietas yang toleran terhadap cekaman lingkungan, seperti kekeringan dan serangan organisme pengganggu tanaman, menjadi komponen penting dalam menjaga stabilitas hasil produksi pangan nasional. Dalam pengembangan jagung hibrida, Badan Perakitan dan Modernisasi Pertanian (BRMP) telah menghasilkan berbagai varietas unggul yang adaptif terhadap kondisi lingkungan di Indonesia. Varietas jagung hibrida pertama yang dilepas adalah Semar-1 pada tahun 1992 yang termasuk dalam tipe hibrida silang tiga jalur. Selanjutnya, varietas Bima-1 dilepas pada tahun 2001 sebagai varietas hibrida silang tunggal pertama. Hingga tahun 2016, Balitbangtan telah melepas 39 varietas jagung hibrida yang terdiri atas 12 varietas hibrida silang tiga jalur dan 27 varietas hibrida silang tunggal sebagai upaya mendukung peningkatan produktivitas dan ketahanan pangan nasional (Dewi *et al.,* 2023).

18.4.2 Smart Farming

Smart farming atau sistem pertanian cerdas merupakan konsep pertanian modern yang mengintegrasikan aktivitas budidaya dengan perkembangan teknologi digital. Penerapan sistem ini umumnya memanfaatkan teknologi *Internet of Things* (IoT), sensor digital, serta kecerdasan buatan (*artificial intelligence*) untuk membantu pengelolaan pertanian secara lebih efektif dan efisien. Melalui pendekatan pertanian presisi (*precision agriculture*), berbagai agenda budidaya, seperti pemupukan, irigasi, hingga monitoring kondisi tanaman dapat dilakukan berdasarkan kebutuhan aktual di lapangan sehingga penggunaan input pertanian menjadi lebih terukur (Shahbaz *et al.,* 2023). Penerapan *smart farming* memungkinkan petani melakukan pengelolaan lahan secara lebih praktis tanpa harus melakukan pemantauan secara terus-menerus di lapangan. Teknologi tersebut juga mendukung pengendalian Organisme Pengganggu Tanaman (OPT), baik hama maupun penyakit, melalui sistem deteksi dini dan pemantauan kondisi lingkungan secara real time. Selain mampu menekan penggunaan energi dan waktu kerja, sistem pertanian cerdas juga membantu mengurangi biaya produksi serta meminimalkan limbah pertanian akibat penggunaan input yang berlebihan. Berbagai teknologi yang telah banyak diterapkan dalam konsep *smart farming* antara lain penggunaan drone pertanian, sistem irigasi tetes (*drip irrigation*), sensor

kelembapan tanah, hingga sistem monitoring tanaman berbasis aplikasi digital. Dengan demikian, *smart farming* menjadi salah satu inovasi yang berperan penting dalam mendukung peningkatan produktivitas dan keberlanjutan sistem pertanian modern.

Upaya-upaya tersebut juga diiringi dengan berbagai inovasi yang mendukung penguatan ketahanan pangan nasional, salah satunya melalui penerapan sistem pertanian terpadu. Sistem ini dapat diimplementasikan dalam berbagai bentuk, seperti mina padi, agroforestri, *integrated farming system*, maupun integrasi antara tanaman dan peternakan. Penerapan sistem pertanian terpadu memungkinkan pemanfaatan sumber daya secara lebih efisien melalui hubungan yang saling mendukung antar komponen dalam agroekosistem. Selain mampu meningkatkan produktivitas, sistem tersebut juga berperan dalam menjaga keseimbangan lingkungan dan mengurangi limbah hasil pertanian. Selain sistem pertanian terpadu, penerapan pertanian organik dan ramah lingkungan juga menjadi salah satu pendekatan penting dalam mendukung ketahanan pangan berkelanjutan di Indonesia. Penggunaan pupuk organik, pestisida nabati, serta pengurangan input kimia sintetis dinilai mampu menjaga kualitas tanah, air, dan lingkungan pertanian dalam jangka panjang. Melalui penerapan sistem pertanian yang lebih berkelanjutan, ketahanan pangan tidak hanya berorientasi pada ketersediaan pangan, tetapi juga pada keamanan pangan, kualitas gizi, serta keberlanjutan sumber daya alam bagi generasi mendatang. Dalam pengembangannya, berbagai inovasi tersebut memerlukan kolaborasi yang lebih luas melalui jaringan keilmuan dan pertukaran pengetahuan di tingkat global.

18.5 Jaringan Keilmuan Agroekologi di Tingkat Global

Perwujudan kolaborasi antarnegara dalam pengembangan agroekologi dilakukan melalui pembentukan berbagai organisasi internasional, seperti *Food and Agriculture Organization* (FAO), *United Nations Environment Programme* (UNEP), serta *International Fund for Agricultural Development* (IFAD). Organisasi-organisasi tersebut berperan penting dalam mendukung pengembangan keilmuan, pendanaan, penyusunan kebijakan, hingga penerapan program pertanian berkelanjutan di berbagai negara. Melalui kerja sama internasional, pertukaran ilmu pengetahuan dan teknologi dapat dilakukan secara lebih luas sehingga memungkinkan adanya pengembangan inovasi, adaptasi kebijakan, serta penyelesaian berbagai permasalahan pertanian berdasarkan pengalaman dari

berbagai negara. Kolaborasi tersebut menjadi salah satu upaya penting dalam mendukung pembangunan sistem pertanian yang berkelanjutan dan adaptif terhadap tantangan global.

Kolaborasi eksplorasi dalam agroekologi memiliki cakupan yang sangat luas dan tidak hanya terbatas pada kesibukan observasi semata, tetapi juga mencakup berbagai aktivitas akademik lainnya. Kerja sama antaruniversitas maupun lembaga keilmuan memungkinkan terbentuknya kemitraan dalam pengembangan ilmu pengetahuan, pertukaran akademisi dan mahasiswa, hingga penerapan program akademik internasional seperti *student exchange* dan kolaborasi akademik. Kolaborasi tersebut membuka peluang bagi generasi muda, khususnya di Indonesia, untuk memperluas wawasan serta bertukar pengetahuan mengenai perkembangan pertanian dan agroekologi di berbagai negara. Selain itu, program pascapengamatan seperti seminar dan konferensi internasional juga menjadi sarana penting dalam mempresentasikan temuan keilmuan serta memperkuat pertukaran gagasan dan inovasi di bidang pertanian berkelanjutan. Kondisi tersebut pada akhirnya mendorong lahirnya berbagai proyek eksplorasi kolaboratif yang mendukung perkembangan agroekologi di tingkat global.

Perkembangan digitalisasi di era globalisasi semakin memperkuat keterbukaan kerja sama internasional dalam bidang agroekologi. Kemajuan teknologi informasi menjadikan pertukaran data, ilmu pengetahuan, dan temuan keilmuan dapat dilakukan secara lebih cepat tanpa terbatas oleh wilayah geografis. Salah satu bentuk nyata dari perkembangan tersebut adalah meningkatnya akses terhadap jurnal internasional *open access* yang memudahkan akademisi memperoleh referensi ilmiah terbaru untuk mendukung pengembangan keilmuan. Selain itu, berbagai basis data internasional juga mulai berkembang di berbagai bidang pertanian, seperti *database* genom tanaman dalam proses pemuliaan tanaman. Keberadaan *database* tersebut memungkinkan akademisi mengembangkan kualitas dan kuantitas tanaman melalui pendekatan rekayasa genetika dan teknologi modern lainnya. Dengan demikian, digitalisasi menjadi faktor penting dalam mempercepat pengembangan inovasi dan kolaborasi keilmuan agroekologi di tingkat global.

Jaringan keilmuan agroekologi di tingkat global menunjukkan bahwa pembangunan pertanian berkelanjutan memerlukan kolaborasi yang luas antarnegara dan berbagai sektor. Pertukaran ilmu pengetahuan, pengembangan teknologi, serta dukungan organisasi internasional menjadi faktor penting dalam mempercepat inovasi pertanian yang adaptif terhadap tantangan pangan dan lingkungan global. Melalui kerja sama yang terintegrasi antara akademisi, pemerintah, organisasi internasional, dan masyarakat, agroekologi diharapkan mampu menjadi landasan dalam mewujudkan sistem pangan yang lebih inklusif, tangguh, dan berkelanjutan di masa depan.

BAB 19
MASA DEPAN AGROEKOLOGI DAN KETAHANAN PANGAN GLOBAL

Bayangkan sebuah ladang pertanian monokultur sebagai sebuah sistem termodinamika yang tertutup. Secara visual, ia tampak rapi, namun secara biologis, ia adalah sebuah anomali. Di sana, kita telah memaksakan keseragaman genetika di atas lahan yang luas, memutus rantai trofik alami, dan menggantinya dengan input energi eksternal yang masif berupa pupuk nitrogen sintetis dan pestisida kimia. Secara ilmiah, kita tidak sedang bertani; kita sedang melakukan ekstraksi nutrisi tanah yang dipercepat, yang secara perlahan menghancurkan struktur agregat tanah dan kapasitas pertukaran kation (*Cation Exchange Capacity*).

Pada tahun 2026, data satelit dan pemetaan biodiversitas menunjukkan pola yang mengkhawatirkan: degradasi lahan global telah mencapai titik ketika produktivitas marjinal mulai menurun meskipun input kimia ditingkatkan. Kita sedang menghadapi hukum hasil yang semakin berkurang (*Law of Diminishing Returns*). Keheningan di ladang-ladang industrial bukan sekadar puitis, melainkan indikator empiris dari hilangnya layanan ekosistem—mulai dari polinator yang punah hingga mikrobioma tanah yang mati—yang secara kolektif mengancam stabilitas ketahanan pangan global.

Agroekologi Muncul Sebagai Paradigma Tandingan yang Berbasis pada Sains Sistem Kompleks

Buku ini tidak mengajak kita kembali ke romantisme pertanian subsisten yang tidak produktif. Sebaliknya, agroekologi yang kita bahas adalah integrasi dari prinsip-prinsip ekologi, agronomi, dan sosiologi ekonomi. Ini adalah tentang mengoptimalkan interaksi biologis antar komponen ekosistem untuk meminimalkan input eksternal dan memaksimalkan resiliensi. Kita akan membedah bagaimana pemanfaatan *nitrogen-fixing plants*, manajemen hama terpadu berbasis predator alami, dan peningkatan karbon organik tanah bukan

hanya baik secara etis, tetapi juga secara matematis lebih efisien dalam menghadapi fluktuasi iklim ekstrem.

Perjalanan dalam buku ini akan membawa Anda menelusuri data proyeksi kebutuhan kalori dunia tahun 2050 yang harus dipenuhi di tengah keterbatasan *planetary boundaries*. Pembahasan ini akan menguraikan secara mendalam mengapa Indonesia, dengan profil tanah vulkanik dan keanekaragaman hayati tropisnya, memiliki keunggulan komparatif dalam mengembangkan model agroforestri yang mampu mengikat karbon sekaligus memproduksi pangan secara simultan. Buku ini adalah sebuah upaya untuk mendamaikan meja makan kita dengan hukum alam. Kita akan membuktikan bahwa ketahanan pangan global tidak harus dibayar dengan kebangkrutan ekologis. Ini adalah narasi tentang masa depan pertanian: sebuah sains tentang kehidupan yang berakar pada tanah dan tumbuh menuju keberlanjutan yang terukur.

19.1 Proyeksi Kebutuhan Pangan Dunia Tahun 2050

Menjelang pertengahan abad ke-21, sistem pangan global menghadapi tantangan yang belum pernah terjadi sebelumnya dalam sejarah peradaban manusia. Memasuki tahun 2050, umat manusia berada di titik nadir antara lonjakan permintaan kebutuhan dasar dan degradasi masif pada modal alam (*natural capital*). Proyeksi kebutuhan pangan bukan sekadar masalah peningkatan volume produksi, melainkan sebuah persoalan kompleks yang melibatkan dinamika demografi, pergeseran bio-kapasitas lahan, dan volatilitas iklim yang ekstrem.

1. Dinamika Demografi dan Pergeseran Pola Konsumsi

Landasan utama dari proyeksi 2050 adalah pertumbuhan populasi. Berdasarkan data terbaru dari United Nations, populasi dunia diperkirakan akan mencapai angka kritis **9,7 hingga 10,2 miliar jiwa** (UN DESA, 2024). Namun, tantangan sesungguhnya bukan hanya pada jumlah mulut yang harus diberi makan, melainkan pada fenomena **transisi nutrisi**.

Seiring dengan meningkatnya Produk Domestik Bruto (PDB) di negara-negara berkembang terutama di kawasan Asia Tenggara dan Afrika terjadi pergeseran pola diet dari basis karbohidrat sederhana menuju protein hewani, lemak, dan produk olahan. Fenomena ini dikenal sebagai *Bennett's Law*, di mana pangsa pengeluaran untuk biji-bijian menurun sementara permintaan untuk makanan

bernilai tinggi meningkat (Fukase dan Martin, 2020). Produksi daging global diproyeksikan harus meningkat sebesar **50% hingga 70%** untuk memenuhi permintaan ini. Secara ilmiah, hal ini menciptakan inefisiensi energi yang masif karena hukum termodinamika dalam konversi pakan ternak; dibutuhkan sekitar 7 kg sereal hanya untuk menghasilkan 1 kg daging sapi. Oleh karena itu, kebutuhan total sereal dunia untuk pangan dan pakan diproyeksikan akan mencapai **3,3 miliar ton** pada 2050 (FAO, 2023).

2. Batas Kemampuan Bumi (Planetary Boundaries) dan Degradasi Lahan

Secara sistematis, kita harus melihat kemampuan bumi dalam menyediakan *input* bagi produksi tersebut. Model pertanian konvensional yang bersifat ekstraktif telah mendorong kita melampaui beberapa *Planetary Boundaries*, khususnya pada siklus nitrogen dan fosfor serta hilangnya integritas biosfer (Rockström et al., 2023).

Saat ini, sekitar **33% tanah di dunia telah terdegradasi** akibat erosi, pemadatan, penggaraman, dan pemiskinan kimiawi. Proyeksi menunjukkan bahwa tanpa perubahan manajemen lahan, luas lahan produktif per kapita akan berkurang setengahnya pada 2050 dibandingkan dengan tahun 1960. Krisis air juga menjadi faktor pembatas (*limiting factor*) yang kritis. Pertanian saat ini menyerap **70% dari total ekstraksi air tawar** dunia. Dengan proyeksi perubahan iklim yang mengubah pola presipitasi, wilayah-wilayah "lumbung pangan" tradisional seperti Delta Mekong dan dataran rendah Amerika Serikat akan mengalami defisit air kronis yang menurunkan *yield* tanaman hingga **25%** (Willett et al., 2019).

3. Ancaman Perubahan Iklim Terhadap Produktivitas

Pemodelan ilmiah melalui model sirkulasi umum (GCM) memprediksi bahwa setiap kenaikan suhu global sebesar 1°C di atas tingkat praindustri dapat menurunkan rata-rata panen gandum global sebesar 6% dan padi sebesar 3,2% (Zhao et al., 2017). Di tahun 2050, kita diproyeksikan akan menghadapi frekuensi peristiwa cuaca ekstrem yang lebih tinggi, yang mengakibatkan ketidakpastian panen (*yield instability*).

Ketergantungan pada segelintir komoditas (monokultur) membuat sistem pangan global sangat rentan terhadap gangguan sistemik. Saat ini, hanya empat tanaman—padi, gandum, jagung, dan kedelai—yang menyediakan **60% dari total kalori manusia**. Kerentanan genetika ini, jika dipadukan dengan mutasi patogen yang lebih cepat akibat pemanasan global, menciptakan risiko kegagalan panen serentak di berbagai belahan dunia (*multiple breadbasket failures*).

4. Kesenjangan Gizi dan Aksesibilitas

Penting untuk dicatat bahwa proyeksi 2050 bukan hanya tentang ketersediaan (*availability*), tetapi juga keterjangkauan (*accessibility*) dan pemanfaatan (*utilization*). Meskipun produksi pangan global mungkin secara teknis mencukupi kebutuhan kalori mentah, malnutrisi tetap menjadi ancaman. "Kelaparan tersembunyi" atau defisiensi mikronutrien diproyeksikan akan meningkat karena meningkatnya kadar CO_2 di atmosfer justru menurunkan konsentrasi zink dan zat besi pada tanaman sereal utama sebuah fenomena yang dikenal sebagai *CO_2 fertilization effect* dengan konsekuensi gizi negatif (Smith dan Myers, 2018).

19.2 Agroekologi sebagai Solusi Krisis Pangan dan Iklim

1. Pendekatan Sistemik terhadap Kerentanan Global

Jika krisis pangan dan perubahan iklim adalah manifestasi dari kegagalan sistem monokultur linier, maka agroekologi adalah pendekatan sistemik yang berbasis pada sirkularitas dan keragaman. Secara ilmiah, agroekologi didefinisikan sebagai aplikasi prinsip-prinsip ekologi dalam desain dan manajemen sistem pangan berkelanjutan (Gliessman, 2021). Keunggulan utamanya terletak pada kemampuannya untuk mengoptimalkan interaksi biologis yang secara alami menyediakan nutrisi dan perlindungan tanaman, tanpa ketergantungan patologis pada input sintetis yang memperparah jejak karbon.

2. Mitigasi Iklim melalui Sekuestrasi Karbon Tanah

Salah satu kontribusi ilmiah paling signifikan dari agroekologi dalam konteks iklim adalah kemampuannya mengubah lahan pertanian dari sumber emisi menjadi "penyerap karbon" (*carbon sink*). Pertanian konvensional menyumbang sekitar **24% dari emisi gas rumah kaca global** (IPCC, 2023).

Sebaliknya, praktik agroekologis seperti penanaman tanaman penutup (*cover crops*), integrasi agroforestri, dan olah tanah minimum (*no-till farming*) meningkatkan akumulasi bahan organik tanah.

Peningkatan Karbon Organik Tanah (SOC) memiliki efek ganda. Secara kimiawi, ia mengikat CO_2 dari atmosfer ke dalam struktur tanah dalam jangka panjang. Secara fisik, setiap peningkatan **1% bahan organik tanah** memungkinkan tanah menahan hingga **200.000 liter air tambahan per hektar** (Lal, 2020). Hal ini menciptakan ketahanan (resiliensi) luar biasa terhadap kekeringan ekstrem yang diproyeksikan terjadi di tahun 2050. Dengan demikian, agroekologi memenuhi target mitigasi sekaligus adaptasi dalam satu kerangka kerja teknis.

3. Reduksi Emisi Melalui Pemutusan Siklus Nitrogen Sintetis

Sektor pertanian adalah penyumbang utama emisi dinitrogen oksida (N_2O), gas rumah kaca yang memiliki potensi pemanasan global **298 kali lebih kuat** dibandingkan CO_2 dalam rentang 100 tahun. Emisi ini berakar pada inefisiensi penggunaan pupuk nitrogen sintetis. Agroekologi menawarkan solusi ilmiah melalui **fikasi nitrogen biologis** menggunakan tanaman leguminosa dan mikrobia simbiotik. Dengan mengintegrasikan tanaman penambat nitrogen ke dalam pola rotasi, kebutuhan akan pupuk berbasis bahan bakar fosil dapat ditekan secara drastis, sekaligus memperbaiki struktur hara tanah secara alami (Altieri dan Nicholls, 2020).

4. Keanekaragaman Hayati sebagai Benteng Hama dan Penyakit

Dalam perspektif ekologi perilaku, sistem monokultur adalah "meja makan terbuka" bagi patogen dan hama karena hilangnya kontrol biologis. Agroekologi menerapkan prinsip **diversitas fungsional**. Dengan menanam berbagai jenis tanaman dalam satu petak (intercropping) dan memelihara habitat bagi predator alami di pinggiran lahan, sistem ini menciptakan keseimbangan trofik.

Temuan menunjukkan bahwa sistem diversifikasi memiliki kepadatan predator alami yang lebih tinggi dan tingkat kerusakan hama yang jauh lebih rendah dibandingkan sistem kimiawi (Dainese et al., 2019). Ini membuktikan bahwa stabilitas ekosistem adalah kunci bagi stabilitas hasil panen di tengah iklim yang tidak menentu. Keanekaragaman genetika dalam agroekologi juga bertindak

sebagai "asuransi biologis"; ketika satu varietas gagal akibat suhu ekstrem, varietas lain dalam sistem yang sama mungkin tetap bertahan.

5. Efisiensi Energi dan Kedaulatan Nutrisi

Secara termodinamika, agroekologi jauh lebih efisien dibandingkan pertanian industrial. Pertanian industrial membutuhkan sekitar **10 unit energi fosil** untuk menghasilkan **1 unit energi pangan**. Sebaliknya, sistem agroekologis padat pengetahuan mampu menghasilkan rasio energi yang jauh lebih positif karena meminimalkan energi "tersembunyi" dari transportasi, manufaktur kimia, dan mesin berat (Pretty et al., 2022).

Selain itu, agroekologi tidak hanya mengejar kuantitas kalori, tetapi kualitas mikronutrien. Sistem polikultur menyediakan akses langsung ke beragam vitamin dan mineral yang seringkali hilang dalam sistem spesialisasi komoditas. Ini adalah jawaban ilmiah bagi tantangan "kelaparan tersembunyi" yang mengancam populasi dunia di masa depan.

19.3 Transisi Menuju Sistem Pangan Agroekologis secara Global

Transisi menuju sistem pangan agroekologis bukan sekadar perubahan teknik budidaya di tingkat ladang, melainkan sebuah transformasi radikal atas seluruh rantai nilai pangan, dari produksi hingga konsumsi. Mengingat dominasi sistem pangan industrial saat ini yang bersifat linier dan ekstraktif, transisi global memerlukan pendekatan "multilevel" yang melibatkan perubahan kebijakan makro, rekayasa pasar, dan pemberdayaan komunitas lokal. Secara ilmiah, transisi ini dipahami sebagai pergeseran dari ketergantungan pada *fossil-fuel-based inputs* menuju *knowledge-based ecological management* (HLPE, 2019).

1. Hambatan Struktural dan Fenomena "*Lock-in*"

Salah satu tantangan terbesar dalam transisi global adalah fenomena ***lock-in*** atau penguncian sistem. Sistem pangan saat ini terjebak dalam infrastruktur, investasi, dan regulasi yang dirancang khusus untuk pertanian monokultur skala besar. IPES-Food (2020) mengidentifikasi beberapa faktor pengunci, termasuk konsentrasi kekuatan pasar di tangan segelintir korporasi agribisnis, fokus

berlebihan pada ekspor komoditas mentah, dan sistem subsidi yang menyimpang.

Secara global, pemerintah menghabiskan lebih dari **USD 700 miliar per tahun** untuk subsidi pertanian, namun sebagian besar dana tersebut justru mendukung praktik yang merusak lingkungan (FAO, UNDP, dan UNEP, 2021). Oleh karena itu, langkah awal transisi adalah dekonstruksi kebijakan ekonomi yang memberikan insentif pada degradasi lahan, dan mengalihkannya menjadi pembayaran atas jasa ekosistem (*Payment for Ecosystem Services*).

2. Skalabilitas dan Intensifikasi Pengetahuan

Kritik sering diarahkan pada agroekologi terkait kemampuannya untuk "ditingkatkan" (*scaling up*). Namun, pendekatan ilmiah terbaru menunjukkan bahwa agroekologi tidak ditingkatkan melalui replikasi mekanis (seperti cetak biru pabrik), melainkan melalui **amplifikasi horizontal** (petani ke petani) dan **institusionalisasi vertikal** (kebijakan negara).

Transisi ini memerlukan investasi masif dalam **Layanan Penyuluhan Pertanian yang Partisipatif**. Berbeda dengan Revolusi Hijau yang bersifat *top-down*, agroekologi adalah sistem yang padat pengetahuan (*knowledge-intensive*). Petani harus memahami dinamika nutrisi tanah, siklus hidup hama, dan interaksi polikultur secara mendalam. Globalisasi agroekologi berarti memperluas akses terhadap pemahaman ekologi terapan dan teknologi tepat guna, seperti aplikasi pemantauan tanah berbasis AI yang membantu petani kecil mengoptimalkan keragaman hayati mereka (Wezel et al., 2020).

3. Rekonstruksi Rantai Pasok dan Food Hubs

Transisi sistemik menuntut perubahan pada cara pangan didistribusikan. Sistem "supermarket global" saat ini seringkali meminggirkan produk agroekologis karena ketidakmampuan petani kecil memenuhi standar volume dan keseragaman visual yang kaku.

Secara ilmiah, pengembangan **Rantai Pasok Pendek (*Short Food Supply Chains*)** menjadi kunci. Melalui pembentukan *Food Hubs* atau pusat pangan regional, jarak antara produsen dan konsumen dipangkas, yang secara otomatis menurunkan emisi transportasi (*food miles*). Model ini meningkatkan nilai tambah ekonomi bagi petani dan memastikan konsumen mendapatkan pangan

segar dengan kepadatan nutrisi tinggi. Selain itu, transparansi rantai pasok melalui teknologi *blockchain* dapat membantu konsumen memverifikasi dampak ekologis dari produk yang mereka beli, menciptakan insentif pasar bagi praktik berkelanjutan (Benton dan Bailey, 2019).

4. **Instrumen Kebijakan dan Tata Kelola Global**

   Di tingkat internasional, transisi ini memerlukan integrasi agroekologi ke dalam perjanjian perdagangan dan komitmen iklim. Perjanjian Paris dan *Kunming-Montreal Global Biodiversity Framework* menyediakan landasan hukum bagi negara-negara untuk mengadopsi agroekologi sebagai strategi pencapaian target emisi nol bersih (*Net Zero*) dan pemulihan biodiversitas.

   Pemerintah perlu menerapkan pajak karbon pada input kimia dan memberikan insentif pajak bagi produk organik/agroekologis. Selain itu, kebijakan pengadaan pangan publik (seperti program makan siang sekolah) dapat menjadi mesin penggerak transisi dengan memprioritaskan pembelian dari petani agroekologis lokal. Ini menciptakan "pasar yang terjamin" yang mengurangi risiko finansial bagi petani selama masa transisi (Willett et al., 2019).

5. **Kedaulatan Pangan dan Keadilan Sosial**

   Transisi agroekologis secara inheren bersifat politis dan sosial. Ia mengusung konsep **Kedaulatan Pangan**, di mana masyarakat memiliki hak untuk menentukan sistem pangan dan kebijakan pertanian mereka sendiri secara mandiri. Tanpa adanya reformasi agraria dan perlindungan hak atas tanah bagi petani kecil serta masyarakat adat, transisi ekologis akan gagal. Keberhasilan transisi global bergantung pada pengakuan bahwa petani bukan sekadar produsen komoditas, melainkan penjaga stabilitas biosfer (Anderson dkk., 2021).

19.4 Peluang Indonesia dalam Kepemimpinan Agroekologi Tropis

Sebagai negara megabiodiversitas kedua di dunia, Indonesia memiliki modal alam (*natural capital*) yang tak tertandingi untuk menjadi pemimpin dalam transisi agroekologi global. Di saat model pertanian industrial di wilayah subtropis mulai mencapai titik jenuh akibat ketergantungan input kimia dan kerentanan iklim, Indonesia menawarkan alternatif berupa **Agroekologi**

Tropis. Model ini memanfaatkan intensitas sinar matahari sepanjang tahun, curah hujan tinggi, dan tanah vulkanik yang kaya mineral untuk menciptakan sistem pangan yang tidak hanya produktif tetapi juga mampu meregenerasi ekosistem (Kementerian Pertanian RI, 2024).

1. **Kekayaan Genetik dan Resiliensi Varietas Lokal**

   Kepemimpinan Indonesia dimulai dari kedaulatan atas plasma nutfah. Indonesia memiliki ribuan varietas tanaman pangan lokal—mulai dari padi gogo tahan kekeringan di NTT hingga berbagai jenis umbi-umbian di Papua—yang secara genetik telah beradaptasi dengan cekaman lingkungan tropis selama berabad-abad. Secara ilmiah, keberagaman genetik ini adalah aset krusial untuk menghadapi perubahan iklim global.

   Integrasi pemuliaan tanaman partisipatif (*Participatory Plant Breeding*) yang menggabungkan intuisi petani dengan teknologi genomik modern memungkinkan Indonesia menghasilkan benih yang unggul tanpa harus bergantung pada paten korporasi multinasional (Bappenas, 2023). Hal ini memposisikan Indonesia sebagai penyedia solusi benih berbasis alam (*nature-based solutions*) bagi negara-negara berkembang lainnya di sabuk tropis.

2. **Revitalisasi Sistem Pertanian Warisan: Subak dan Pekarangan sebagai Sains Terapan**

   Salah satu peluang terbesar Indonesia adalah melakukan "re-branding" kearifan lokal ke dalam bahasa sains agroekologi modern. Sistem **Subak** di Bali, misalnya, bukan sekadar organisasi pengairan, melainkan model manajemen lanskap yang mengoptimalkan siklus hara dan pengendalian hama terpadu secara kolektif (Lansing dkk., 2022).

   Demikian pula dengan sistem **Pekarangan** (home gardens), yang secara ilmiah diakui sebagai salah satu bentuk agroforestry paling efisien di dunia. Pekarangan di Indonesia mampu menyediakan karbohidrat, protein, dan mikronutrien secara simultan dari lahan yang terbatas. Dengan mengintegrasikan teknologi presisi, seperti sensor tanah IoT dan pemetaan mikrobioma, sistem tradisional ini dapat ditingkatkan skalanya untuk

menjadi pilar ketahanan pangan perkotaan dan semi-perkotaan (*urban agroecology*).

3. Agroforestri Tropis: Solusi Pangan dan Mitigasi Karbon

Indonesia memiliki peluang unik melalui integrasi hutan dan pangan. Di tengah tekanan global untuk menghentikan deforestasi, Indonesia dapat memimpin melalui model **Agroforestri Berlapis**. Penanaman komoditas strategis seperti kopi, kakao, dan rempah di bawah naungan hutan (shelterwood system) terbukti mampu menjaga keanekaragaman hayati sekaligus menyediakan pendapatan ekonomi bagi masyarakat sekitar hutan.

Secara ilmiah, agroforestri tropis di Indonesia memiliki kapasitas sekuestrasi karbon yang jauh lebih tinggi dibandingkan hutan tanaman industri monokultur. Berdasarkan data terbaru, sistem agroforestri di wilayah tropis lembap mampu menyimpan karbon hingga **100–200 ton C per hektar** (IPCC, 2023; Noordwijk dkk., 2020). Dengan memanfaatkan pasar karbon global, Indonesia dapat menjadikan sektor pertanian agroekologis sebagai penghasil devisa baru melalui skema kredit karbon, sembari memperkuat kedaulatan pangan lokal.

4. Hilirisasi Agroekologi dan Ekonomi Hijau

Kepemimpinan Indonesia juga harus terlihat pada hilirisasi produk. Produk pangan hasil praktik agroekologi memiliki nilai tambah tinggi di pasar global yang semakin sadar akan isu kesehatan dan keberlanjutan. Indonesia dapat mempelopori standar **"Tropical Agroecology Certified"** yang menjamin produk bebas residu kimia, adil bagi petani, dan memulihkan ekosistem.

Digitalisasi rantai pasok melalui platform *traceability* berbasis blockchain memungkinkan petani kecil di pelosok Indonesia terhubung langsung dengan konsumen global. Ini mengurangi peran tengkulak dan memastikan distribusi ekonomi yang lebih adil (Prasetyo dkk., 2025). Secara sistematis, hal ini akan mendorong pertumbuhan ekonomi sirkular di pedesaan, mencegah urbanisasi berlebih, dan menjaga stabilitas sosial-ekonomi nasional.

5. **Diplomasi Pangan dan Kepemimpinan di Global South**

   Dalam konteks geopolitik, Indonesia dapat menggunakan agroekologi sebagai instrumen diplomasi lunak (*soft power*). Melalui Kerjasama Selatan-Selatan, Indonesia dapat berbagi modul pelatihan agroekologi tropis dengan negara-negara di Afrika dan Amerika Latin. Pembentukan **Pusat Unggulan Agroekologi Tropis Global** di Indonesia akan menarik peneliti mancanegara untuk mempelajari bagaimana intensitas biologis tropis dapat menggantikan intensitas kimiawi industrial.

6. **Tantangan dan Strategi Implementasi**

   Meskipun peluang terbuka lebar, kepemimpinan ini memerlukan komitmen politik yang kuat dalam bentuk:

   a. **Reformasi Agraria:** Menjamin kepastian akses lahan bagi petani muda yang ingin menerapkan praktik berkelanjutan.

   b. **Kurikulum Pendidikan:** Mengintegrasikan agroekologi ke dalam pendidikan tinggi pertanian agar tidak lagi berorientasi pada paradigma revolusi hijau lama.

   c. **Infrastruktur Keilmuan:** Memperkuat peran BRIDA dalam pemetaan mikrobioma tanah lokal sebagai alternatif pengganti pupuk kimia impor.

19.5 Visi Pertanian Berkelanjutan untuk Generasi Mendatang

Visi pertanian untuk generasi mendatang tidak lagi cukup hanya berhenti pada konsep "berkelanjutan" (*sustainable*), yang secara harfiah berarti mempertahankan kondisi saat ini. Di tengah degradasi lingkungan yang masif, visi masa depan harus bergeser ke arah **Pertanian Regeneratif**. Secara ilmiah, ini berarti sistem pertanian yang tidak hanya memproduksi pangan, tetapi secara aktif memulihkan jasa ekosistem, meningkatkan keanekaragaman hayati, dan memperbaiki siklus hidrologi serta karbon (Newton dkk., 2020). Bagi generasi mendatang, pertanian bukan lagi beban lingkungan, melainkan instrumen utama pemulihan planet.

1. Petani 4.0: Integrasi Kecerdasan Buatan dan Ekologi Terapan

Generasi mendatang akan mengoperasikan pertanian dalam ekosistem digital yang canggih. Visi ini melibatkan konvergensi antara **Agroekologi dan Revolusi Industri 4.0**. Penggunaan *Artificial Intelligence* (AI) dan *Machine Learning* untuk memahami mikrobioma tanah secara *real-time* akan menjadi standar baru.

Petani masa depan adalah "Manajer Ekosistem" yang menggunakan data satelit untuk memantau kesehatan tanaman tumpang sari dan menggunakan robotika presisi untuk pengendalian gulma tanpa herbisida kimia (Lowenberg-DeBoer dkk., 2020). Teknologi ini memungkinkan optimasi intensitas biologis yang tinggi dengan tenaga kerja fisik yang lebih efisien, sehingga profesi petani menjadi atraktif bagi generasi Z dan Alfa yang sangat melek teknologi. Secara sistematis, digitalisasi agroekologi akan menurunkan ambang batas kesalahan manusia dalam mengelola sistem ekologi yang kompleks.

2. Pendidikan dan Kurikulum Pangan Holistik

Visi masa depan menuntut transformasi dalam sistem pendidikan. Pertanian tidak boleh lagi diajarkan sebagai disiplin ilmu yang terisolasi di fakultas pertanian, melainkan sebagai ilmu dasar kehidupan (*life science*) yang terintegrasi dengan etika, ekonomi, dan kesehatan masyarakat.

Generasi mendatang harus memiliki **Literasi Pangan (Food Literacy)** yang mendalam—memahami bahwa kesehatan manusia secara intrinsik terhubung dengan kesehatan tanah (*Soil-Plant-Human Health Nexus*). Kurikulum pendidikan tinggi harus beralih dari orientasi komoditas tunggal menuju pemahaman sistemik tentang lanskap fungsional (Guzmán dkk., 2021). Hal ini akan menciptakan lulusan yang mampu merancang sistem pangan lokal yang tangguh terhadap guncangan eksternal, baik itu pandemi maupun krisis iklim.

3. Sistem Pangan Sirkular dan Keadilan Antargenerasi

Visi 2050 dan seterusnya adalah penghapusan konsep "limbah" dalam sistem pangan. Pertanian masa depan akan mengadopsi model **Ekonomi Sirkular**, di mana sisa organik dari perkotaan diproses kembali melalui teknologi biokonversi (seperti *Black Soldier Fly* atau pengomposan

anaerobik mutakhir) untuk kembali ke lahan pertanian sebagai nutrisi (Jurgilevich dkk., 2016).

Secara ilmiah, ini menutup siklus hara (nitrogen dan fosfor) yang selama ini terputus dalam model linier industrial. Prinsip keadilan antargenerasi menuntut agar kita tidak mewariskan "hutang ekologis" berupa tanah yang steril dan cadangan air yang kering kepada anak cucu kita. Pertanian berkelanjutan adalah bentuk investasi modal alam yang akan terus memberikan dividen ekologis bagi masa depan.

4. Demokratisasi Pangan dan Kedaulatan Digital

Di masa depan, kontrol atas sistem pangan harus didesentralisasi. Penggunaan teknologi *Distributed Ledger* (Blockchain) akan memastikan transparansi penuh, di mana konsumen dapat melacak jejak karbon dan keadilan upah petani dari setiap produk yang mereka konsumsi (Kamilaris dkk., 2019). Visi ini menciptakan hubungan langsung antara produsen agroekologis dan konsumen, menghilangkan perantara yang tidak perlu, dan memastikan bahwa nilai ekonomi terbesar tetap berada di tangan komunitas pedesaan. Kedaulatan pangan digital ini akan menjadi benteng bagi petani kecil terhadap monopoli korporasi benih dan pestisida global.

5. Etika Biosfer dan Kepemimpinan Moral

Pertanian masa depan akan dipandu oleh pergeseran ontologis: dari memandang alam sebagai objek eksploitasi menuju pemahaman alam sebagai mitra koevolusi. Generasi mendatang akan memandang ladang mereka sebagai bagian dari biosfer yang saling bergantung. Kepemimpinan dalam pertanian berkelanjutan akan diukur bukan hanya dari *yield* per hektar, melainkan dari indeks kebahagiaan petani, kesehatan komunitas, dan pemulihan spesies lokal yang terancam punah di sekitar lahan pertanian.

DAFTAR PUSTAKA

Abdullatip, A., Anwar, M., Sarlan, M. and Prasetyowati, R.E. (2025) "Farmers' responses to farmer field schools (FFS) on integrated crop management: a case study in East Lombok, Indonesia," *Journal of Agricultural Socio-Economics* (JASE), 6(1).

Abidin, J.Z. (2024) "Penguatan Petani Kecil dalam Mendukung Ketahanan Pangan Nasional," *Journal of Sustainability, Society, and Eco-Welfare*, 1(2), pp. 79–93. https://doi.org/10.61511/jssew.v1i2.2024.239.

Adam, A.M. et al. (2025) "Enhancing the resilience of intercropping systems to changing moisture conditions in Africa through the integration of grain legumes: A meta-analysis," *Field Crops Research*, 321, p. 109663. Available at: https://doi.org/10.1016/j.fcr.2024.109663.

Adams, Z., Modi, A.T. and Kuria, S.K. (2025) 'Multidimensional Perspective of Sustainable Agroecosystems and the Impact on Crop Production: A Review', *Agriculture*, p. 581. Available at: https://doi.org/10.3390/agriculture15060581.

Admin (2019) *Inovasi Pemanfaatan Tanah Pekarangan Desa Caturharjo*. Available at: https://caturharjo-bantul.desa.id/first/artikel/583-Inovasi-Pemanfaatan-Tanah-Pekarangan (Accessed: 18 April 2026).

Afriliyeni, Sihaloho, M. and Sita, R. (2021) "HUBUNGAN REFORMA AGRARIA DENGAN PENINGKATAN KESEJAHTERAAN RUMAH TANGGA PETANI (Kasus : Lahan Eks HGU di Desa Pasawahan , Kecamatan Banjaranyar , Kabupaten Ciamis , Provinsi Jawa Barat)," *Sains Komunikasi dan Pengembangan Masyarakat*, 05(02), pp. 433–449. Available at: https://doi.org/https://doi.org/10.29244/jskpm.v5i2.774.

Agustian, A., Purba, H.J., Rachmawati, R.R., Ariningsih, E., Ashari, A., Aldillah, R., Rachman, B., Susilowati, S.H., Ariani, M., Sadra Swastika, D.K., Soetiarso, T.A., Ilham, N., Risfaheri, R., Hendriadi, A., Sahara, D., Inayah, I. & Saliem, H.P. (2026) "Regional food reserves in West Java, Indonesia: An assessment of availability and management performance," *Economies*, 14(2), pp. 1–28. https://doi.org/10.3390/economies14020062.

Ainsworth, E.A., Long, S.P., 2021. 30 years of free-air carbon dioxide enrichment (FACE): What have we learned about future crop productivity and its

potential for adaptation? *Global Change Biology* 27, 27–49. https://doi.org/10.1111/gcb.15375

Akchaya, K. et al. (2025) "Boosting resource use efficiency, soil fertility, food security, ecosystem services, and climate resilience with legume intercropping: a review," *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 9. Available at: https://doi.org/10.3389/fsufs.2025.1527256.

Akter, S., Ahmed, J.U., Begum, I.A., Sarkar, M.A.R., and Fatema, K. (2025) "Integrated farming system-A means of improving farmers' well-being in the wetland ecosystem of Bangladesh," *Farming System*, 3(1), p. 100127. Available at: https://doi.org/10.1016/j.farsys.2024.100127.

Alderkamp, L.M., Van Zandbrink, R.M.E., Meulman, F., Van Middelaar, C.E., De Olde, E.M., Hoes, A., and De Roo, N. (2025) "Social aspects of integrated crop-livestock systems: key for future policy," *animal*, 19(8), p. 101564. Available at: https://doi.org/10.1016/j.animal.2025.101564.

Al-Kodmany, K. (2018) 'The Vertical Farm: A Review of Developments and Implications for the Vertical City', *Buildings*, 8(2), p. 24.

Altieri, M.. (2013) 'Agroecological Principles for Sustainable Agriculture', in *Agroecological Innovations*, pp. 40–46.

Altieri, M.A. (2018) *Agroecology: The Science of Sustainable Agriculture*. 2nd edn. Boca Raton: CRC Press.

Altieri, M.A. and Nicholls, C.I., 2020. Agroecology and the reconstruction of a post-COVID-19 agriculture. *The Journal of Peasant Studies*, 47(5), pp.881-898.

Alvim, L. (2022) *Rio de Janeiro, Brazil Set to Build World's Largest Urban Garden.* Available at: https://www.bloomberg.com/news/articles/2022-08-21/rio-de-janeiro-brazil-set-to-build-world-s-largest-urban-garden (Accessed: 5 April 2026).

Amede, T., Menza, M. and Bekele, S. (2011) 'Zai improves nutrient and water productivity in the Ethiopian highlands', *Experimental Agriculture*, 47(S1), hal. 7–20.

Amri, K. (2024) 'Potensi Keberlanjutan Urban Farming Sebagai Upaya Peningkatan Ketahanan Pangan di Kota Pekanbaru', IPTEKIN *Jurnal Kebijakan Pembangunan dan Inovasi*, 7(1), pp. 26–36.

Anderson, C.R. and Maughan, C. (2021) '"The Innovation Imperative": The Struggle Over Agroecology in the International Food Policy Arena', *Frontiers in Sustainable Food Systems*, Volume 5-2021.

Anderson, C.R., Bruil, J., Chappell, M.J., Kiss, C. and Pimbert, M.P., 2021. Agroecology *Now! Transformations Towards More Just and Sustainable Food Systems*. Basingstoke: Palgrave Macmillan.

Andita, E.P., Nurhasana, R., Arriani, R.R., Oktorini, R., Salsabila, S., Darwis, T., Indrajoga, D.N. and Ratnasari, D.. (2024) 'Pemanfaatan Lahan Tidur Sebagai Lokasi Pertanian Perkotaan Di Jakarta Selatan', *Media Bina Ilmiah*, 18(8), pp. 1669–1976.

Androshchuk, I., Danylyshyn, B., Driouech, N., Tymkovych, O., Khalin, S. & Sharah, O. (2025) "Food security in Ukraine and the transformation of the agricultural market: Interrelationships and challenges posed by global threats," *Journal of Vasyl Stefanyk Precarpathian National University*, 12(4), pp. 151–161. https://doi.org/10.15330/jpnu.12.4.151-161.

Anita, D. et al. (2022) "Pengaruh Lama Mekar Bunga Refugia Terhadap Keragaman Populasi Musuh Alami dan Hama pada Tanaman Padi (Oryza sativa)," *AGRI-TEK: Jurnal Ilmu Pertanian,Kehutanan dan Agroteknologi*, 23(2), pp. 38–42. Available at: http://agritek.unmermadiun.ac.id/index.php/agritek.

Aprillia, R., Prayoga, G.I. and Mustikarini, E.D. (2025) 'Correlation and Path Analysis for Grain Yield and Its Components of Lowland Rice Grown under Coastland Agroecosystem', *Akta Agrosia*, 28(1), pp. 15–23. Available at: https://doi.org/10.31186/aa.28.1.15-23.

Arapis, G. and Fostieri, C. (2020) "Agroecology: In Need of a Paradigm Change in Agriculture," *Advances in Agricultural Technology & Plant Sciences*, 3(1–3).

Arif, A. (2025) *Masyarakat Adat & Kedaulatan Pangan*. Jakarta: Kepustakaan Populer Gramedia.

Arizpe, N., Giampietro, M. and Ramos-Martin, J. (2011) "Food security and fossil energy dependence: An international comparison of the use of fossil energy in agriculture (1991–2003)," *Critical Reviews in Plant Science*, 30(1), pp. 45–63.

Artmann, M. and Sartison, K. (2018) 'The Role of Urban Agriculture as a Nature-Based Solution: A Review for Developing a Systemic Assessment Framework', *Sustainability*, 10(6), p. 1937.

Ashari, Saptana, & Purwantini, T.B. (2012) 'Potensi dan Prospek Pemanfaatan Lahan Pekarangan untuk Mendukung Ketahanan Pangan', *Forum Penelitian Agro Ekonomi*, 30(1), pp. 13–30.

Atapattu, A.J., Nuwarapaksha, T.D., Udumann, S.S., and Dissanayaka, N.S. (2024) "Integrated Farming Systems: A Holistic Approach to Sustainable Agriculture," in S. Babu et al. (eds.) *Agricultural Diversification for Sustainable Food Production*. Singapore: Springer Nature Singapore (Sustainability Sciences in Asia and Africa), pp. 89–127. Available at: https://doi.org/10.1007/978-981-97-7517-0_4.

Badan Pangan Nasional (2019) *Petunjuk Teknis Bantuan Pemerintah Kegiatan Kawasan Rumah Pangan Lestari* (KRPL) Tahun 2019. Available at: https://badanpangan.go.id/storage/app/media/Konsumsi/Juknis KRPL 2019.pdf (Accessed: 5 April 2026).

Badan Pusat Statistik (2025) *Statistik Indonesia 2025*. Badan Pusat Statistik.

Bahari, D.I. et al. (2024) "Analisis Pengaruh Pertanian Berkelanjutan terhadap Ketahanan Pangan di Daerah Perdesaan," *Kolaboratif Sains*, 8(2), pp. 1231–1238. Available at: https://doi.org/10.56338/jks.v8i2.7073.

Bale, J.S., van Lenteren, J.C. and Bigler, F., 2008. Biological control and sustainable food production. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 363(1492), pp.761–776.

Banerjee, C. and Adenaeuer, L. (2014) 'Up, Up and Away! The Economics of Vertical Farming', *Journal of Agricultural Studies*, 2(1), pp. 40–60.

Bappenas, 2023. *Peta Jalan Transformasi Ekonomi Indonesia: Hijau, Digital, dan Inklusif*. Jakarta: Kementerian Perencanaan Pembangunan Nasional.

Barrios, E. et al. (2019) 'The 10 elements of agroecology: guiding the transition to sustainable food and agricultural systems.'

Bathaei, A .& Štreimikiene, D.(2023). A Systematic Review of Agricultural Sustainability Indicators. *Agriculture* 13, 241 pp. 1-19. https://doi.org/10.3390/agriculture13020241

Beacham, A.M., Vickers, L.H. and Monaghan, J.. (2019) 'Vertical Farming: A Summary of Approaches to Growing Skywards', *The Journal of Horticultural Science and Biotechnology*, 94(3), pp. 277–283.

Begg, G.S. et al., 2017. A functional overview of conservation biological control. *Crop Protection*, 97, pp.145–158.

Behera, U.K. and France, J. (2023) "Farming systems research: Concepts, design and methodology," *Advances in Agronomy*, 177, pp. 1–49.

Belete, T. and Yadete, E. (2023) "Effect of Mono Cropping on Soil Health and Fertility Management for Sustainable Agriculture Practices: A Review," *Journal of Plant Sciences* [Preprint]. Available at: https://doi.org/10.11648/j.jps.20231106.13.

Bellon-Maurel, V. & Huyghe, C., 2017. Putting agricultural equipment and digital technologies at the cutting edge of agroecology. *Comptes Rendus Geoscience*, 349(6-7), pp. 362-371.

Belmin, R. et al. (2022) 'Designing agroecological systems across scales: a new analytical framework', *Agronomy for Sustainable Development*, 42. Available at: https://doi.org/10.1007/s13593-021-00741-9.

Benke, K. and Tomkins, B. (2017) 'Future Food-Production Systems: Vertical Farming and Controlled-Environment Agriculture', *Sustainability: Science, Practice and Policy*, 13(1), pp. 13–26.

Benton, T.G. and Bailey, R., 2019. The paradox of the global food system: strategies for a sustainable future. *Global Sustainability*, 2, e2, pp.1-10.

Berkes, F. (2008) Sacred Ecology. 2 ed. Routledge. Tersedia pada: https://doi.org/10.4324/9780203928950.

Bhandari, S., Paudel, S. and Upadhaya, S. (2025) "Socio-Economic and Environmental Benefits of Agroforestry and Its Multilevel Barriers to Adoption: A Systematic Review," Sustainability, 18(1), p. 5. Available at: https://doi.org/10.3390/su18010005.

Bhattacharya, A. (2024) "Boosting Resilience Through Rice-Fish Polyculture in Tropical Agricultural Ecosystems," *International Journal of Horticulture, Agriculture and Food science*, 8(4), pp. 31–36. Available at: https://doi.org/10.22161/ijhaf.8.4.3.

Bhuiyan, M.M.R. and Maharjan, K.L. (2022) "Impact of Farmer Field School on Crop Income, Agroecology, and Farmer's Behavior in Farming: A Case Study on Cumilla District in Bangladesh," *Sustainability*, 14(7), pp. 1–20.

Blay-Palmer, A., Sonnino, R. and Custot, J. (2016) *A Food Politics of the Possible? Growing Sustainable Food Systems through Networks of Knowledge*. Brazil. Available at: http://orca.cf.ac.uk/71042/.

Blekking, J., Waldman, K., Hemerijckx, L.-M. & Kaputula, M. (2026) "Using spatial data to identify food accessibility in large African cities," *World*

Development, 200(107298), pp. 1–12. https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2025.107298.

Blum, A. (2009) 'Effective use of water (EUW) and not water-use efficiency (WUE) is the target of crop yield improvement under drought stress', *Field Crops Research*, 112(2–3), hal. 119–123.

Bommarco, R. (2024) "Ecological redesign of crop ecosystems for reliable crop protection. A review," *Agronomy for Sustainable Development*, 44(6), p. 51. Available at: https://doi.org/10.1007/s13593-024-00987-z.

Bowie, S. (2024) *Crop Rotation for Beginners : a comprehensive guide to crop rotation practices*. ADMIT HUB REF SERVICE PR.

Brady, N. C., and Weil, R. R. (2017). The Nature and Properties of Soils (15th ed.). Pearson.

Brown, J.K.M., 2015. Durable resistance of crops to disease: a Darwinian perspective. *Annual Review of Phytopathology*, 53, pp.513–539.

Brush, S.B. (2004a) *Farmers' Bounty*. Yale University Press. Tersedia pada: http://www.jstor.org/stable/j.ctt1np9rd.

Brush, S.B. (2004b) "Genetic Erosion of Crop Populations in Centers of Diversity:," *Farmers' Bounty*. Yale University Press (Locating Crop Diversity in the Contemporary World), hlm. 153–174. Tersedia pada: http://www.jstor.org/stable/j.ctt1np9rd.12.

Budi, A.S., Syafi'i, I., Saputra, R.A., Yustianingsih, R.D., Pradana, M.A.P., Widodo, M.S. and Ningrum, D.. (2020) 'Pemberdayaan Masyarakat Dalam Program Penghijauan Guna Meminimalisir Polusi Udara di Dusun Bareng', *Among : Jurnal Pengabdian Masyarakat*, 2(2). Available at: https://doi.org/https://doi.org/10.51804/ajpm.v2i2.746.

Cai, P., 2025. Microbial biopesticides: A one health perspective on benefits and risks. *Current Research in Toxicology*.

Çelik, F. (2017) 'The Importance of Edible Landscape in the Cities', *Turkish Journal of Agriculture-Food Science and Technology*, 5(2), pp. 118–124.

Chaerani, N. and Wulandari, F.T. (2026) 'Agroekologi untuk sistem pangan berkelanjutan', *Empiricism Journal*, 7(1), pp. 300–310.

Chafiki, S. et al., 2026. Microbial- and plant-based biopesticides for management of agricultural pests and diseases. *Discover Applied Sciences*.

Chambers, R. and Thrupp, L.A. (1994) *Farmer first: farmer innovation and agricultural research*. Karthala Editions.

Chen, S., Guo, Y., Yuan, P., Jiang, Y., and Cao, C.. (2025) "Carbon sequestration, emission reduction, and technical strategies of rice-crayfish farming in central China," *Scientific Reports*, 15(1), p. 29352. Available at: https://doi.org/10.1038/s41598-025-92901-0.

Chiera, I., Doe, J., Stoneham, M., Herrington, S., Devine, A., Humphreys, E. & Godrich, S.L. (2025) "'More prioritisation on food security' – exploring what initiative leaders envision for a food secure regional Australia," *Health and Place*, 95(103543), pp. 1–9. https://doi.org/10.1016/j.healthplace.2025.103543.

Clapp, J., Moseley, W.G., Termine, P. & Burlingame, B. (2025) "Multi-scalar policy uptake of the six-dimensional food security framework," *Food Policy*, 137(102936), pp. 1–3. https://doi.org/10.1016/j.foodpol.2025.102936.

Critchley, W. and Siegert, K. (1991) *Water Harvesting: A Manual for the Design and Construction of Water Harvesting Schemes for Plant Production*. Rome: FAO.

Crowther, L.I., Labrie, G. and Gurr, G.M., 2023. The impact of field margins on biological pest control: a meta-analysis. *BioControl*, 68, pp.1–16.

Dagunga, G. et al. (2023) 'Agroecology and resilience of smallholder food security: a systematic review', *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 7.

Dainese, M., Martin, E.A., Aizen, M.A., et al., 2019. A global synthesis reveals biodiversity-mediated benefits for crop production. *Science Advances*, 5(10), p.eaax0121.

Dara, S.K., Montalva, C. and Barta, M., 2019. Microbial control of invasive forest pests with entomopathogenic fungi: a review of the current situation. *Insects*, 10(10), 341.

Darnhofer, I. (2014) 'Resilience and why it matters for farm management', *European Review of Agricultural Economics*, 41(3), pp. 461–484.

de la Riva, E.G. et al. (2023) 'From functional diversity to human well-being: A conceptual framework for agroecosystem sustainability', *Agricultural Systems*, 208, p. 103659. Available at: https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.agsy.2023.103659.

De Zeeuw, H., Van Veenhuizen, R. and Dubbeling, M. (2011) 'The Role of Urban Agriculture in Building Resilient Cities in Developing Countries', *The Journal of Agricultural Science*, 149(S1), pp. 153–163.

Deiss, F. (2025). Pertanian regeneratif: sebuah pendekatan untuk mengatasi masalah ketahanan pangan. Tersedia pada : https://bioprotectionportal.com/id/resources/regenerative-agriculture-an-alternative-to-tackle-food-security-issues (Diakses : 1 Mei 2026)

Deka, B., Baruah, C. and Babu, A., 2021. Entomopathogenic microorganisms: their role in insect pest management. *Egyptian Journal of Biological Pest Control*, 31, 121.

Delaide, B., Delhaye, G., Dermience, M., Gott, J., Soyeurt, H. and Jijakli, M.. (2017) 'Plant and Fish Production Performance, Nutrient Mass Balances, Energy and Water Use of the PAFF Box, a small-Scale Aquaponic System', *Aquacultural Engineering*, 78, pp. 130–139.

Despommier, D. (2010) *The Vertical Farm: Feeding the World in the 21st Century*.

Dewi, A.S., Setiawan, D.H. and Novitaningrum, R. (2023) "Potensi dan Pengembangan Jagung Hibrida di Indonesia," *Journal Science Innovation and Technology* (SINTECH), 3(2), pp. 1–6.

Direktorat Gizi Masyarakat (2018) *Tabel Komposisi Pangan Indonesia*. Direktorat Jenderal Kesehatan Masyarakat.

Djazuli, R.A. and Hidayat, S.I. (2024) *Manajemen Agribisnis Moderen*. Agustus 20. Edited by B. Febrianto. Sumatra: UMG Press.

Dongmo, T., Meffeja, F., Fotso, J.M. and Nolte, C. (2010) 'Crop–Livestock Integration in the Urban Farming Systems of Yaoundé', in *African Urban Harvest: Agriculture in the Cities of Cameroon, Kenya and Uganda*. New York: Springer New York, pp. 61–70.

Dos Reis, J.C., Kamoi, M.Y.T., Tanure, T.M.D.P., Rodrigues, M.I., and Etienne, J.J.D.. (2025) "Integrated crop-livestock-forest systems: a path to improved agro-economic performance in the Brazilian Amazon and Cerrado," *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 9, p. 1518747. Available at: https://doi.org/10.3389/fsufs.2025.1518747.

Draper, C. and Freedman, D. (2010) 'Review and Analysis of the Benefits, Purposes, and Motivations Associated With Community Gardening in the United States', *Journal of Community Practice*, 18(4), pp. 458–492.

Dugassa, M. (2023) "The Role of Cereal legume Intercropping in Soil Fertility Management: Review," *Journal of Agricul- ture and Aquaculture*, 5(1).

Duru, M. et al., 2016. How to implement biodiversity-based agriculture to enhance ecosystem services: A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 36(2), pp. 1-14.

Ehler, L.E., 2006. Integrated pest management (IPM): definition, historical development and implementation, and the other IPM. *Pest Management Science*, 62(9), pp.787–789.

Elouattassi, Y. et al. (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), pp. 41–98. Available at: https://doi.org/10.36253/jaeid-14672.

Eratani. (2024). Pertanian Regeneratif, Solusi Menuju Masa Depan Berkelanjutan. Tersedia pada : https://eratani.co.id/blog/article/read/Pertanian-Regeneratif-Solusi-Menuju-Masa-Depan-Berkelanjutan (Diakses 1 Mei 2026)

Fadhilah, T.H., Cahyana, A.D., Nugraha, F.D. and Budiwitjaksono, G.. (2024) 'Pemberdayaan Program Urban farming untuk Meningkatkan Ketahanan Pangan dan Kualitas Lingkungan di Kelurahan Gebang Putih Kota Surabaya', *Jurnal Pengabdian Masyarakat Akademisi*, 2(3), pp. 39–48.

Fahmid, I.M., Fahmid, M.M. and Badrani, A.G. (2025) 'Pergeseran Kebijakan Ketahanan Pangan Global: Dari Revolusi Hijau Menuju Revolusi Genomik', *Jurnal Sosial Ekonomi Pertanian*, 21(1), pp. 63–78. Available at: https://doi.org/10.20956/jsep.v21i1.45591.

Fajar, M. (2019). Framework Indikator Pertanian Berkelanjutan di Indonesia. Tersedia pada https://www.researchgate.net/publication/337781872_FRAMEWORK_INDIKATOR_PERTANIAN_BERKELANJUTAN_DI_INDONESIA_Framework_of_Agricultural_Sustainability_Indicators?channel=doi&linkId=5de9cbff92851c8364656964&showFulltext=true (Diakses 1 Mei 2026)

FAO (2015). *Status of the World's Soil Resources* (SWSR). Food and Agriculture Organization of the United Nations.

FAO (2018) *The 10 Elements of Agroecology: Guiding the Transition to Sustainable Food and Agricultural Systems*. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations.

FAO (2023) *Agroecology Knowledge Hub*. Rome: Food and Agriculture Organization. Available at: https://www.fao.org/agroecology/overview/en/

FAO, 2018. Climate-Smart Agriculture Case studies 2018: Successful approaches from different regions. *Food and Agriculture Organization of the United Nations.*

FAO, 2018. *International code of conduct on pesticide management: Guidelines for the registration of microbial, botanical and semiochemical pest control agents for plant protection and public health uses*. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations.

FAO, 2021. *The State of Food and Agriculture* 2021. FAO. https://doi.org/10.4060/cb4476en

FAO, IFAD, UNICEF, WFP & WHO (2023) *The State of Food Security and Nutrition in the World 2023: Urbanization, Agrifood Systems Transformation and Healthy Diets Across the Rural–Urban Continuum, The State of Food Security and Nutrition in the World 2023*. Rome: FAO. https://doi.org/10.4060/cc3017en.

FAO, n.d. *General guidelines for developing and implementing integrated pest management programmes*. Food and Agriculture Organization of the United Nations.

FAO, n.d. *Integrated Pest Management* (IPM). Food and Agriculture Organization of the United Nations.

FAO, n.d. *What is Integrated Pest Management*. Food and Agriculture Organization of the United Nations.

FAO. (2022). Pertanian Konservasi. Tersedia pada https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/024e17be-9fad-4556-be94-a8e2f229023d/content (Diakses 1 Mei 2026).

Fardhani, D.M. (2024) "Local Food Potential For National Food Security," 16 Desember. Tersedia pada: https://www.unisayogya.ac.id/en/local-food-potential-for-national-food-security/.

Fath, B.D.. (2019) *Encyclopedia of ecology*. Elsevier.

Fauzi, A.R., Ichniarsyah, A.N. and Agustin, H. (2016) 'Pertanian Perkotaan: Urgensi, Peranan, dan Praktik Terbaik'*, Jurnal Agroteknologi*, 10(1), pp. 49–62.

Fereres, E. and Soriano, M.A. (2007) 'Deficit irrigation for reducing agricultural water use', *Journal of Experimental Botany*, 58(2), hal. 147–159.

Fernandez-Zatrate, F., Pérez-Delgado, L., Coronel-Bustamante, D., Huanca-Silva, L., and Taboada-Mitma, V.H. (2025) "Sustainable Rice–Fish Farming Systems: A Systematic Review and Meta-Analysis," *Aquaculture Research,* 2025(1), p. 4029275. Available at: https://doi.org/10.1155/are/4029275.

Ferrario, V. (2021) "Learning from Agricultural Heritage? Lessons of Sustainability from Italian 'Coltura Promiscua," *Sustainability*, 13(16), p. 8879. Available at: https://doi.org/10.3390/su13168879.

Feska, Stella et al. (2026) *Agribisnis Perkebunan (Strategi Penguatan Komuditas Unggulan).* Maret 2026. Edited by F. Dewi. Banyuasin: SLO Kreative.

Fiore, V. et al. (2024) 'The socio-economic issues of agroecology: a scoping review', *Agricultural and Food Economics*, 12(1), p. 16. Available at: https://doi.org/10.1186/s40100-024-00311-z.

Firdaus, N. dan Cahyono, B.D. (2017) "How Food Consumption Pattern and Dietary Diversity Influence Food Security: Evidence from Di Yogyakarta and East Nusa Tenggara," *Jurnal Ekonomi Pembangunan*, 25(1), hlm. 27. Tersedia pada: https://doi.org/10.14203/JEP.25.1.2017.27-38.

Fitri, M.A. and Usni, M. (2024) "Systematic Literature Review : Pertanian Berbasis Agroekologi Untuk Mendukung Pertanian Berkelanjutan," *Seminar Nasional Pembangunan dan Pendidikan Vokasi Pertanian*. Manokwari, pp. 427–436. Available at: https://doi.org/https://doi.org/10.47687/snppvp.v5i1.1125.

Fitriyah, A.T., Baharuddin, B. dan Sheyoputri, A.C.A. (2025) "Analysis of Sago Contribution as Staple Food Alternatives to Household Food Security," *Journal of Global Innovations in Agricultural Sciences*, hlm. 1059–1067. Tersedia pada: https://doi.org/10.22194/JGIAS/25.1485.

Florentina, N.M. (2024), Pertanian berkelanjutan: pengertian, konsep dan prinsipnya, Odesa Indonesia. Tersedia pada: https://odesa.id/pertanian-berkelanjutan-pengertian-konsep-dan-prinsipnya/ (Diakses: 28 Maret 2026).

Fonteyne, S. et al. (2023) "Review of agronomic research on the milpa, the traditional polyculture system of Mesoamerica," *Frontiers in Agronomy*, 5. Available at: https://doi.org/10.3389/fagro.2023.1115490.

Food and Agriculture Organization (2019) *The State of Food and Agriculture 2019: Moving Forward on Food Loss and Waste Reduction. Rome: FAO*. Available at: https://www.fao.org (Accessed: 4 April 2026).

Food and Agriculture Organization (FAO) (2017) *Water for Sustainable Food and Agriculture*. Rome: Food and Agriculture Organization.

Food and Agriculture Organization (FAO) (2020) *The State of Food and Agriculture 2020: Overcoming Water Challenges in Agriculture*. Rome: FAO.

Fox-Kämper, R., Wesener, A., Münderlein, D., Sondermann, M., McWilliam, W. and Kirk, N. (2018) 'Urban Community Gardens: An Evaluation of Governance Approaches and Related Enablers and Barriers at Different Development Stages', *Landscape and Urban Planning*, 170, pp. 59–68.

Francis, C., Lieblein, G., Gliessman, S., Breland, T.A., Creamer, N., Harwood, R., Salomonsson, L., Helenius, J., Rickerl, D., Salvador, R. and Wiedenhoeft, M. (2003) 'Agroecology: The Ecology of Food Systems', *Journal of Sustainable Agriculture*, 22(3), pp. 99–118.

Freire, P. (2000) *Pendidikan kaum tertindas*. LP3ES. Available at: https://books.google.co.id/books?id=O4vwGwAACAAJ.

Freudenberger, L.B., Denich, M., Whitney, C. and Beuchelt, T. (2018) "More inter- and transdisciplinary research needed in agroecology," *Rural* 21, 51(2), pp. 31–33.

Fritz, M., Grimm, M., Keilbart, P., Laksmana, D.D., Luck, N., Padmanabhan, M., Subandi, N. and Tamtomo, K. (2021) "Turning Indonesia Organic: Insights from Transdisciplinary Research on the Challenges of a Societal Transformation," *Sustainability*, 13(23), pp. 1–20.

Fróna, D., Mihály-Karnai, L. & Rákos, M. (2026) "Impact of food waste reduction on food security and sustainability in the European Union," *Discover Sustainability*, 7(146), pp. 1–25. https://doi.org/10.1007/s43621-025-02383-3.

Fukase, E. and Martin, W., 2020. Economic growth, convergence, and world food demand and supply. *World Development*, 132, p.104954.

Garbelini, L.G. et al. (2022) "Diversified crop rotations increase the yield and economic efficiency of grain production systems," *European Journal of Agronomy*, 137, p. 126528. Available at: https://doi.org/10.1016/j.eja.2022.126528.

Gardjito, M. dkk. (2019) *Gastronomi Indonesia*. Yogyakarta: Global Pustaka Utama.

Garrett, R.D., Niles, M.T., Gil, J.D.B., Gaudin, A., and Chaplin-Kramer, R. (2017) "Social and ecological analysis of commercial integrated crop livestock systems: Current knowledge and remaining uncertainty," *Agricultural Systems*, 155, pp. 136–146. Available at: https://doi.org/10.1016/j.agsy.2017.05.003.

Gattupalli, A. (2024) *Gattupalli, A, Urban Agriculture in the United States: Revitalizing Neighborhoods.* Available at:

https://www.archdaily.com/1012190/urban-agriculture-in-the-united-states-revitalizing-neighborhoods (Accessed: 4 April 2026).

Gemmill-Herren, B. et al. (2023) 'Agroecology in policy and practice', *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 7.

Gervazio, W., Junior, W.F.A. and de Souza-Esquerdo3, V.F. (2025) 'Agroecology and public policies in global scientific literature: a bibliometric analysis', *Discover Sustainability*, 6(1), p. 795. Available at: https://doi.org/10.1007/s43621-025-01505-1.

GFNS (2022) 'Transitioning to agroecological food systems: A review of incentives for adoption', *Global Food and Nutrition Security* [Preprint].

Ghaffar, A. et al. (2022) "Adaptations in Cropping System and Pattern for Sustainable Crops Production under Climate Change Scenarios," *Improvement of Plant Production in the Era of Climate Change*. Boca Raton: CRC Press, pp. 1–34. Available at: https://doi.org/10.1201/9781003286417-1.

Glahn, R. and Noh, H. (2021) "Redefining Bean Iron Biofortification: A Review of the Evidence for Moving to a High Fe Bioavailability Approach," *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 5(682130), pp. 1–9.

Gliessman, S.R. (2016) 'Agroecology: The Ecology of Sustainable Food Systems'. JSTOR.

Gliessman, S.R. (2018) 'Defining agroecology', *Agroecology and Sustainable Food Systems*, 42(6), pp. 599–600.

Gliessman, S.R., 2021. *Agroecology: The Ecology of Sustainable Food Systems*. 4th ed. New York: CRC Press.

Godwin, I.A. et al. (2022) 'Feasibility of farm-scale infiltration galleries for managed aquifer recharge in an agricultural alluvial aquifer of Northeast Arkansas', *Agricultural Water Management*, 264, p. 107531. Available at: https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.agwat.2022.107531.

Goldstein, B., Hauschild, M., Fernández, J. and Birkved, M. (2016) 'Testing the Environmental Performance of Urban Agriculture as a Food Supply in Northern Climates'*, Journal of Cleaner Production*, 135, pp. 984–994.

Gontijo, L.M., 2019. Engineering natural enemy shelters to enhance conservation biological control in field crops. *Biological Control*, 130, pp.51–57.

Gordon, L.J., Finlayson, C.M. & Falkenmark, M. (2010) 'Managing water in agriculture for food production and other ecosystem services', *Agricultural Water Management*, 97(4), hal. 512–519.

Gruver, J. B. (2013) Prediction, Prevention and Remediation of Soil Degradation by Water Erosion. Nature Education Knowledge 4(12):2

Gulyas, B.Z. and Edmondson, J.. (2021) 'Increasing City Resilience Through Urban Agriculture: Challenges and Solutions in the Global North', *Sustainability*, 13(3), p. 1465.

Gumo, P. et al. (2025) 'Organic Mulch and Compost Synergy Revitalizes Soil Multifunctionality for Resilient Agroecosystems', *International Journal of Experimental Research and Review*, 49, pp. 81–101. Available at: https://doi.org/10.52756/ijerr.2025.v49.007.

Gurr, G.M., Wratten, S.D. and Altieri, M.A. eds., 2004/2005. *Ecological Engineering for Pest Management: Advances in Habitat Manipulation for Arthropods*. Collingwood: CSIRO Publishing.

Gurung, L., Rawal, J.S., Puspa, R.C., Joshi, G.R. and Mandal, A. (2024) 'Vertical Farming in Urban Agriculture: Opportunities, Challenges, and Future Directions', *Big Data Agric*, 6(1), pp. 89–95.

Guzmán, G.I., López-García, D., Roman-Alcalá, A. and Alonso, A.M., 2021. Local Agroecology Management in the Global South: A review of successful cases. *Sustainability*, 13(12), p.6754.

Gwenambira-Mwika, C.P., Snapp, S.S. and Chikowo, R. (2021) "Broadening farmer options through legume rotational and intercrop diversity in maize-based cropping systems of central Malawi," *Field Crops Research*, 270, p. 108225. Available at: https://doi.org/10.1016/j.fcr.2021.108225.

Hamzens, W.P.S. and Moestopo, M.. (2018) 'Pengembangan Potensi Pertanian Perkotaan di Kawasan Sungai Palu', *Jurnal Pengembangan Kota*, 6(1), pp. 75–83.

Hanifa, R.S. et al. (2025) 'Pendekatan agroekologi dalam optimalisasi penggunaan hara dan air melalui integrasi tanaman-ternak berbasis LEISA', *Empiricism Journal*, 6(4), pp. 1–12.

Hanifa, R.S., Sjah, T. and Budastra, K. (2026) "Analisis Sinergi Kolaboratif antara Petani, Industri Pengolahan, dan Distributor dalam Rantai Nilai Agribisnis untuk Meningkatkan Daya Saing Komoditas Kopi," *Economina*, 5(18-12–2025), pp. 487–499. Available at: https://doi.org/org/10.55681/economina.v4711.1820.

Harahap, A.S. and Lubis, N. (2020) 'Pemanfaatan Pekarangan Rumah Dengan Metode Vertikultur Untuk Mendukung Ketahanan Pangan Di Desa Wonorejo Kecamatan Pematang Bandar Kabupaten Simalungun', *Jurnal Prodikmas Hasil Pengabdian Kepada Masyarakat*, 5(2), pp. 105–109.

Harmain, U., Saragih, J.R., Astuti, T., Pasaribu, M.P. and Nainggolan, P. (2022) 'Pemanfaatan Pekarangan Rumah Perkotaan Dengan Budidaya Sayuran Hidroponik', *Jurnal Pengabdian Masyarakat Sapangambei Manoktok Hitei*, 2(1), pp. 60–66.

Hasanah, Z., Yulianto, T. and Yudistira, I. (2021) 'Pendampingan Optimalisasi Pemanfaatan Lahan Pekarangan Rumah Sebagai Tempat Tanaman Baru Aquaponik', ETHOS: *Jurnal Penelitian dan Pengabdian kepada Masyarakat*, 9(1), pp. 118–122.

Hatt, S. et al., 2023. Designing pest suppressive agroecosystems: Principles for harnessing plant diversity in crop protection. *Journal of Cleaner Production*, 408, 137198.

Havlin, J. L., Tisdale, S. L., Nelson, W. L., & Beaton, J. D. (2014). Soil Fertility and Fertilizers (8th ed.). Pearson.

He, C. & James, L.A. (2021) 'Watershed science: Linking hydrological science with sustainable management of river basins', *Science China Earth Sciences*, 64(5).

Hendrickson, M.K. and Porth, M. (2012) *Urban Agriculture—Best Practices and Possibilities*. University of Missouri.

Herrera, J.P. et al. (2025) 'Evaluating the Efficacy of Agricultural Interventions in Northeast Madagascar', *Sustainability*, p. 11134. Available at: https://doi.org/10.3390/su172411134.

Hidayat, S.I. et al. (2026) *Manajemen Agrinisnis Suatu Konsep dan Sistem.pdf*. 2026th ed. Edited by S.W. Hidayat. Lamongan: PT. Ghani Press Group. Available at: https://ghanipress.com/.

HLPE (2019) *Agroecological and Other Innovative Approaches for Sustainable Agriculture and Food Systems*. Rome: High Level Panel of Experts on Food Security and Nutrition.

Holt, G. dan Amilien, V. (2007) "Introduction: from local food to localised food," *Anthropology of food*, S2. Tersedia pada: https://doi.org/10.4000/aof.405.

Holt-Giménez, E. (2006) *Campesino a campesino: voices from Latin America's farmer to farmer movement for sustainable agriculture*. Food first books.

Howara, D. et al. (2025) *Dasar-Dasar Agribisnis dan Pemasaran*. September. Edited by R. Efendi. Padang: CV. HEI PUBLISHING INDONESIA.

Hu, B. et al. (2024) "Intercropping wheat and appropriate nitrogen supply can alleviate faba bean wilt disease by reshaping soil microbial community structure," *Industrial Crops and Products*, 222, p. 119538. Available at: https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2024.119538.

Huss, C.P., Holmes, K.D. and Blubaugh, C.K. (2022) "Benefits and Risks of Intercropping for Crop Resilience and Pest Management," *Journal of Economic Entomology*, 115(5), pp. 1350–1362. Available at: https://doi.org/10.1093/jee/toac045.

Ibnu, M. (2023) "Peningkatan (Upgrading) Rantai Nilai Sektor Pertanian Indonesia : Kajian Teori dan Hasil-hasil Empiris," *Sosial Ekonomi Pertanian*, 19 No 1(02–2023), pp. 39–53.

IFAD (2018) Report on IFAD ' s *Development Effectiveness*. Rome.

Ifah, A.I., Amaliah and Devy, W.S. (2025) *Pisang, Buah Kehidupan Bagi Semua Orang*. Edited by Fauzan Abrori. Yogyakarta: Alfa Press Pustaka.

Ifani, Aliasuddin, Abrar, M., Masbar, R. and Saputra, J. (2024) "The Effects of Government Policies on Agriculture in Indonesia," *International Journal of Social Science, Technology and Economics Management*, 2(1), pp. 21–34.

IFOAM. (2008). Definition Of Organic Agriculture. Tersedia pada https://www.ifoam.bio/why-organic/organic-landmarks/definition-organic (Diakses 20 April 2026).

Igalavithana, A.D., Shaheen, S.M., Park, J.N., Lee, S.S. and Ok, Y.. (2015) 'Potentially Toxic Element Contamination and its Impact on Soil Biological uality in Urban Agriculture: A Critical Review', *Heavy Metal Contamination of Soils: Monitoring and Remediation*, pp. 81–101.

Ingham, E.R. (2000). The soil food web. Dalam Soil Biology Primer. USDA NRCS / Soil and Water Conservation Society.

IPCC, 2021. Climate Change 2021: The Physical Science Basis (Summary for Policymakers, Technical Summary, Frequently Asked Questions and Glossary).

IPCC, 2022. Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability.

IPCC, 2023. Climate Change 2023: *Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Geneva: IPCC.

IPES-Food, 2020. *The Meaning of Food Sovereignty*. International Panel of Experts on Sustainable Food Systems. [Online] Available at: www.ipes-food.org (Accessed: 1 April 2026).

Irfan, F. (2021) *Teknik Vertikultur, Star Farm*. Available at: https://starfarm.co.id/teknik-vertikultur/ (Accessed: 20 April 2026).

Iskandar, J. (2009) *Ekologi Manusia dan Pembangunan Berkelanjutan*. Bandung: Program Studi Magister Ilmu Lingkungan Universitas Padjadjaran.

Iskandar, J. (2012a) *Ekologi Perladangan Orang Baduy, Pengelolaan Hutan Berbasis Adat Secara Berkelanjutan*. Bandung: Alumni.

Iskandar, J. (2012b) *Etnobiologi dan Pembangunan Berkelanjutan*. Bandung: AIPI Bandung, Puslitbang KPK LPPM Unpad dan M63 Foundation.

Iskandar, J. dan Ellen, R. (1999) "In situ conservation of rice landraces among the Baduy of West Java," *Journal of Ethnobilogy*, 19(1), hlm. 97–125.

Iskandar, J. dan Iskandar, B.S. (2015) "Studi etnobotani keanekaragaman tanaman pangan pada 'Sistem Huma' dalam menunjang keamanan pangan Orang Baduy." *Seminar Nasional Masyarakat Biodiversitas Indonesia*. Tersedia pada: https://doi.org/10.13057/psnmbi/m010601.

Iswoyo, H., Mantja, K., Widiayani, N. and Dermawan, R. (2018) 'Pemberdayaan Sekolah Dalam Kegiatan Urban Farming Dalam Rangka Mendukung Kemandirian Pangan Bagi Kota Makassar', *Jurnal Dinamika Pengabdian*, 4(1), pp. 103–112.

Jachowicz, N. et al., 2025. Highly diverse flower strips promote natural enemies more in annual field crops: A review and meta-analysis. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 381, 109299.

Jacob, M. and Rocha, C. (2021) 'Models of Governance in Community Gardening: Administrative Support Fosters Project Longevity', *Local Environment*, 26(5), pp. 557–574.

Jakhar, P. and K.P.G. et al. (2010) "Evaluation of conservation potential of multitier cropping systems in EasternGhat highland zone of Orissa," *Indian Journal of Soil Conservation*, 38(3), pp. 188–193.

Janowska, B., Łój, J. and Andrzejak, R. (2022) 'Role of Community Gardens in Development of Housing Estates in Polish Cities', *Agronomy*, 12(6), p. 1447.

Jarvis, D.I. dkk. (2008) "A global perspective of the richness and evenness of traditional crop-variety diversity maintained by farming communities,"

Proceedings of the National Academy of Sciences, 105(14), hlm. 5326–5331. Tersedia pada: https://doi.org/10.1073/pnas.0800607105.

Jatav, H.Singh. et al. (2026) *Agroforestry and Climate Change Mitigation Harnessing Multitrophic Interactions for Sustainable Plant Protection and Ecosystem Resilience*. Apple Academic Press, Incorporated.

Julianto, E.W. and Diponegoro, U. (2016) "ANALISIS RANTAI NILAI (VALUE CHAIN) JAGUNG DI KECAMATAN TOROH," *Penelitian ekonomi dan bisnis*, 1(1), pp. 1–15.

Jurgilevich, A., Birge, T., Kentala-Lehtonen, J., et al., 2016. Transition towards circular economy in the food system. *Sustainability*, 8(1), p.69.

Kafle, A., Hopeward, J. and Myers, B. (2023) 'Potential Economic, Social and Environmental Contribution Study of Urban Agriculture Based on Five Key Features Identified Through Past Studies', *Land*, 12(10), p. 1920.

Kalantari, F., Tahir, O.M., Joni, R.A. and Fatemi, E. (2018) 'Opportunities and Challenges in Sustainability of Vertical Farming: A Review', *Journal of Landscape Ecology*, 11(1), pp. 35–60.

Kamilaris, A., Fonts, A. and Prenafeta-Boldú, F.X., 2019. The rise of blockchain technology in agriculture and food supply chains. *Trends in Food Science & Technology*, 91, pp.640-652.

Karim, M.M., Arisonaningtyas, D. dan A. Kikon, R. (2025) *Diversifying Dietary Options: A Strategic Path to Reducing Stunting in East Nusa Tenggara* (NTT). Tersedia pada: https://doi.org/10.33846/hd20904.

Kasanah, S.N., Suprastiyo, A. and Lukita, C. (2024) "Analisis Peran Stakeholders dalam Program Pemberdayaan Ekonomi dan Sosial Melalui Sistem Agrosilvopastura di Kecamatan Ngasem Kabupaten Bojonegoro," *Pemberdayaan Masyarakat*, 12(2), pp. 112–122.

Kassa, G. (2022) "Agroforestry as a Pathway to Climate-Smart Agribusiness: Challenges and Opportunities to Smallholder Farmers in Developing Countries." In Review. Available at: https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-1102134/v1.

Katunar, J., Vretenar, N. and Jardas, A.J. (2025) "Technology and Innovations in Agriculture," in *Agriculture Through Sustainability Perspectives*. Rijeka, Kroasia: University of Rijeka, pp. 81–97.

Kaur, S. et al. (2024) "Monoculture of crops: A challenge in attaining food security," pp. 197–213. Available at: https://doi.org/10.1016/bs.af2s.2024.07.008.

Kaya, Y.Z. (2026) "Application of various statistical indicators for drought analysis based on remote sensing data: A case study of three major provinces of Turkey," *Sustainability*, 18(4), pp. 1–30. https://doi.org/10.3390/su18042147.

Kelinsky-Jones, L.R. and Anderson, C. (2026) 'Analyzing policy discourse for agroecological possibilities: a theoretical and methodological contribution', *Agriculture and Human Values*, 43(2), p. 52. Available at: https://doi.org/10.1007/s10460-026-10866-w.

Kementerian Pertanian RI, 2024. Statistik Pertanian Berkelanjutan dan Proyeksi Produksi Pangan 2050. Jakarta: Pusat Data dan Sistem Informasi Pertanian.

Khan, M.T. et al. (2026) 'Sewage Sludge-Mediated Microplastic Transfer to Agroecosystem: A Comprehensive Review on Detection, Fate and Ecological Impacts', *Water, Air, & Soil Pollution*, 237(11), p. 648. Available at: https://doi.org/10.1007/s11270-026-09329-z.

Khan, Z.R. et al. (2014) "Achieving food security for one million sub-Saharan African poor through push–pull innovation by 2020," *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 369(1639), p. 20120284. Available at: https://doi.org/10.1098/rstb.2012.0284.

Khatoon, N., Rajput, S. & Khan, M.R. (2026) "Assessing food security and agricultural performance through infrastructure and sustainability indicators in India," *Discover Sustainability*, 7(254), pp. 1–19. https://doi.org/10.1007/s43621-025-02156-y.

Khotimah, K., Khafidhoh, N., Chusnah, M., Ramadhan, R. and Amaliyah, R. (2023) 'Penerapan Sistem Budidaya Tanaman Sayuran pada Lahan Pekarangan dengan Teknik Hidroponik dan Vertikultur di Desa Sumberagung Megaluh Jombang', Jumat Pertanian: *Jurnal Pengabdian Masyarakat*, 4(1), pp. 52–56.

Kinyua, M.W. et al. (2023) "Agronomic and economic performance of legume-legume and cereal-legume intercropping systems in Northern Tanzania," *Agricultural Systems*, 205, p. 103589. Available at: https://doi.org/10.1016/j.agsy.2022.103589.

Kleftodimos, G. et al. (2021) 'A farm-level ecological-economic approach of the inclusion of pollination services in arable crop farms', *Land Use Policy*, 107, p. 105462. Available at: https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2021.105462.

Klerkx, L. & Rose, D., 2020. The agricultural data, and digital revolution: From technology to policy and ethics in AgTech. *Sociologia Ruralis*, 60(2), pp. 287-305.

Klerkx, L., Van Mierlo, B. and Leeuwis, C. (2012) 'Evolution of systems approaches to agricultural innovation: concepts, analysis and interventions', *Farming Systems Research into the 21st century: The new dynamic*, pp. 457–483.

Kneafsey, M. et al. (2013) *Short Food Supply Chains and Local Food Systems in the EU . A State of Play of their*. Europion Union. Available at: https://doi.org/10.2791/88784.

Koch, K.G., Chapman, K., Louis, J., Heng-Moss, T. and Sarath, G., 2016. Plant tolerance: a unique approach to control hemipteran pests. *Frontiers in Plant Science*, 7, 1363.

Kogan, M., 1998. Integrated pest management: historical perspectives and contemporary developments. *Annual Review of Entomology*, 43, pp.243–270.

Kolb (1984) 'Experiential learning', *Experience as the Source of Learning and Development*, 41.

Kopittke,P.M., Stephen M. Harper, Luz G. Asio, Victor B. Asio, Juanito T. Batalon, April Mae T. Batuigas, Apolinario B. Gonzaga Jr., Nelda R. Gonzaga, Maria Teresa L. de Guzman, Deejay M. Lumanao, Brigid A. McKenna, Gennie B. Soyon, Joana Rose M. Vergara, Pearl B. Sanchez. (2025). Soil degradation: An integrated model of the causes and drivers. Review Paper. International Soil and Water Conservation Research 13 : 744–755.

Kurnianingtyas, A.. (2013) 'Integrasi dan Pengelolaan Kebun Komunitas dalam Pembangunan Kota: Belajar dari Kebun Komunitas di Nantes, Perancis', *Jurnal Pembangunan Wilayah Dan Kota*, 9(4), pp. 368–380.

Kushalappa, A.C., Yogendra, K.N. and Karre, S., 2016. Plant innate immune response: qualitative and quantitative resistance. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 35(1), pp.38–55.

Kusumadinata, A.A., Sumardjo, Sadono, D. & Burhanuddin (2020) "Effect of farmers' characteristics, information sources, and information quality on agriculture risk communication," *International Journal of Sciences: Basic and Applied Research* (IJSBAR), 54(2), pp. 67–83. https://gssrr.org/JournalOfBasicAndApplied/article/view/11733.

Kusumana, C. (2015) "Keanekaragaman hayati (biodiversitas) sebagai elemen kunci ekosistem kota hijau," in. Available at: https://doi.org/10.13057/psnmbi/m010801.

Kyveryga, P.M. (2019) "On-Farm Research: Experimental Approaches, Analytical Frameworks, Case Studies, and Impact," *Agronomy Journal*, 111(6), pp. 2633–2635.

Lahlali, R. et al., 2025. Biopesticides for a sustainable agriculture: Prospects and challenges. *Crop Protection.*

Laia, L., I. and Lase, N.K. (2025) "Peran Mikrobioma Tanah dalam Peningkatan Produktivitas dan Ketahanan Tanaman," *Hidroponik* : *Jurnal Ilmu Pertanian Dan Teknologi Dalam Ilmu Tanaman*, 2(1), pp. 124–131. Available at: https://doi.org/10.62951/hidroponik.v2i1.233.

Lal, R. (2015) 'Restoring soil quality to mitigate soil degradation', *Sustainability*, 7(5), hal. 5875–5895.

Lal, R. (2020) 'Soil organic matter and water retention', *Journal of Soil and Water Conservation*, 75(2), hal. 27A–32A.

Landis, D.A., Wratten, S.D. and Gurr, G.M., 2000. Habitat management to conserve natural enemies of arthropod pests in agriculture. *Annual Review of Entomology*, 45, pp.175–201.

Lansing, J.S., Thurner, S., Downey, S.S., et al., 2022. Adaptive management of the Balinese subak landscape. *Sustainability Science*, 17(3), pp.879-894.

Lawson, L.. (2005) *City Bountiful: A Century of Community Gardening in America.* Univ of California Press.

Leeuwis, C. (2013) *Communication for rural innovation: rethinking agricultural extension*. John Wiley & Sons.

Levidow, L., Pimbert, M. and Vanloqueren, G. (2014) 'Agroecological research: conforming—or transforming the dominant agro-food regime?', *Agroecology and sustainable food systems*, 38(10), pp. 1127–1155.

Liew, I. (2021) *New Community Garden to Provide Fresh Produce for Tiong Bahru Residents*. Available at: https://www.straitstimes.com/singapore/community/new-community-garden-to-provide-fresh-produce-for-tiong-bahru-residents (Accessed: 5 April 2026).

Lipper, L., McCarthy, N., Zilberman, D., Asfaw, S., Branca, G. (Eds.), 2018. Climate Smart Agriculture: Building Resilience to Climate Change, Natural

Resource Management and Policy. *Springer International Publishing, Cham*. https://doi.org/10.1007/978-3-319-61194-5

Lloyd, B.J. and Dennison, P.E. (2018) 'Evaluating the response of conventional and water harvesting farms to environmental variables using remote sensing', *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 262, hal. 11–17.

Long, T. B., Blok, V. & Coninx, I., 2016. Barriers to the adoption and diffusion of technological innovations for climate-smart agriculture in Europe: Evidence from the Netherlands, France, and Switzerland. *Journal of Cleaner Production*, 112, pp. 2721-2734.

Lopez-Ridaura, S. et al. (2021) "Maize intercropping in the milpa system. Diversity, extent and importance for nutritional security in the Western Highlands of Guatemala," *Scientific Reports*, 11(1), p. 3696. Available at: https://doi.org/10.1038/s41598-021-82784-2.

Lorenz, K. (2015) 'Organic Urban Agriculture', *Soil Science* [Preprint], (146–153).

Love, D.C., Fry, J.P., Li, X., Hill, E.S., Genello, L., Semmens, K. and Thompson, R.. (2015) 'Commercial Aquaponics Production and Profitability: Findings From an International Survey', Aquaculture, 435, pp. 67–74.

Lowder, S. K., Sánchez, M. V. & Bertini, R., 2021. Which farms feed the world and has farmland become more concentrated?. *World Development*, 142, p. 105455.

Luan, N. T. et al., 2023. IoT-based smart irrigation system for sustainable tropical agriculture. *Computers and Electronics in Agriculture*, 205, p. 107621.

Luna, P. (2022) "Implementasi Sistem Pengelolaan Food Loss And Waste (FLW) di Indonesia Sebagai Inisiatif Presidensi G20 Implementation of Food Loss and Waste (FLW) System in Indonesia as An Initiative of G20 Presidency," *Analisis Kebijakan Pertanian*, 6(1), pp. 46–61.

Mabhaudhi, T., Chibarabada, T.P. and Sikka, A. (2023) "Status of integrated crop-livestock research in the mixed farming systems of the Global South: a scoping study," *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 7, p. 1241675. Available at: https://doi.org/10.3389/fsufs.2023.1241675.

Majeed, U. et al., 2026. Sustainable green botanical pesticides: An innovative safe approach for crop protection. *Environmental Advances.*

Makate, C. et al. (2016) "Crop diversification and livelihoods of smallholder farmers in Zimbabwe: adaptive management for environmental change," *SpringerPlus*, 5(1), p. 1135. Available at: https://doi.org/10.1186/s40064-016-2802-4.

Makombe, G. (2023) "The food security concept: Definition, conceptual frameworks, measurement and operationalisation," *Africa Development*, 48(4), pp. 53–80. https://doi.org/10.57054/ad.v48i4.5574.

Malézieux, E. (2012) "Designing cropping systems from nature," *Agronomy for Sustainable Development*, 32(1), pp. 15–29. Available at: https://doi.org/10.1007/s13593-011-0027-z.

Managanta, A.A., Sumardjo, Sadono, D. & Tjitropranoto, P. (2022) "Strategy to increase farmers' productivity cocoa using structural equation modeling," *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. Institute of Physics. https://doi.org/10.1088/1755-1315/1107/1/012105.

Mandal, N. et al. (2025) 'Conservation agriculture enhances ecosystem services and sustainability of the system over conventional agriculture', *Scientific Reports*, 15(1), p. 43087. Available at: https://doi.org/10.1038/s41598-025-27164-w.

Manono, B.O. and Mwami, B. (2026) "Agroforestry and Soil Health: A Review of Impacts and Potential for Sustainable Agriculture," Earth, 7(1), p. 31. Available at: https://doi.org/10.3390/earth7010031.

Marlina, G. et al. (2023) "Keragaman tan pangan," (32), pp. 103–110.

Marthalia, L., & Frimawaty, E. (2024) "Gerakan adaptasi pangan lokal 'pangan bijak nusantara' mendukung sistem pangan berkelanjutan Indonesia.," 1(2), pp. 56–65.

Martini, E. et al. (2020) "*Agroforestry for Climate Resilience*", ICRAF and RECOFTC, p. 63.

Mbow, C., Rosenzweig, C., Barioni, L.G., Benton, T.G., et a;., 2019. Food Security Supplementary Material. In: 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 (No. 5), *IPCC Special Report on Climate Change and Land*.

McAuley, W.P., Bourgault, M. and Congreves, K.A. (2025) "Productivity, soil fertility and soil health benefits associated with intercropping small grains and oilseeds with legumes in the semi-arid environment of the Canadian Prairies," *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 389, p. 109694. Available at: https://doi.org/10.1016/j.agee.2025.109694.

Méndez, V.E., Bacon, C.M. and Cohen, R. (2013) 'Agroecology as a transdisciplinary, participatory, and action-oriented approach', Agroecology and sustainable food systems, 37(1), pp. 3–18.

Michigan State University Extension, 2015. *Natural Enemies in Your Garden: A Homeowner's Guide*. Michigan State University.

Migliorin, P., Gkisakis, V., Gonzalvez, V., Raigón, D. and Barberi, P. (2018) "Agroecology in Mediterranean Europe: Genesis, State and Perspectives," *Sustainability*, 10(8), p. 2724.

Minarni, E.W., Utami, D.S. and Prihatiningsih, N. (2017) 'Pemberdayaan Kelompok Wanita Tani Melalui Optimalisasi Pemanfaatan Pekarangan Dengan Budidaya Sayuran Organik Dataran Rendah Berbasis Kearifan Lokal dan Berkelanjutan', JPPM (*Jurnal Pengabdian dan Pemberdayaan Masyarakat*), pp. 147–154.

Molden, D. (ed.) (2007) *Water for food, water for life: A comprehensive assessment of water management in agriculture*. London: Earthscan.

Momesso, L. et al. (2022) 'Forage Grasses Steer Soil Nitrogen Processes, Microbial Populations, and Microbiome Composition in A Long-term Tropical Agriculture System', *Agriculture, Ecosystems & Environment,* 323, p. 107688. Available at: https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.agee.2021.107688.

Mora, C. et al. (2011) "How Many Species Are There on Earth and in the Ocean?," PLoS Biology, 9(8), p. e1001127. Available at: https://doi.org/10.1371/journal.pbio.1001127.

Morcatty, T.Q. et al. (2022) "Risk of Viral Infectious Diseases from Live Bats, Primates, Rodents and Carnivores for Sale in Indonesian Wildlife Markets," *Viruses*, 14(12), p. 2756. Available at: https://doi.org/10.3390/v14122756.

Morgan, K. and Sonnino, R. (2010) 'The urban foodscape: world cities and the new food equation', *Cambridge journal of regions, economy and society*, 3(2), pp. 209–224.

Mougeot, L.. (2000) *Urban Agriculture: Definition, Presence, Potentials and Risks, and Policy Challenges.* Ottawa: International Development Research Centre (IDRC).

Mougeot, L.. (2005) *Agropolis: The Social, Political, and Environmental Dimensions of Urban Agriculture*. Earthscan.

Mucharam, I., Rustadi, E., Fauzi, A., & Harianto. (2022). Signifikansi Pengembangan Indikator Pertanian Berkelanjutan Untuk Mengevaluasi

Kinerja Pembangunan Pertanian Indonesia. Risalah Kebijakan Pertanian dan Lingkungan 9. 2 pp. 61-81

Muna, A.N., Amalinda, R., Nugroho, Y.R., Baihaqi, F.O., Rizqiyah, F., Anggraeny, D.P., Hartono, A.W., Saputra, A.T.H., Amrullah, A.T.R., Zhindy, A.B. and Mahardika, M.DMuna, A.N., Amalinda, R., Nugroho, Y.R., Baihaqi, F.O., Rizqiyah, F., Anggraeny, D.P., , M.. (2025) 'Optimalisasi Lahan Terbatas Melalui Mini Garden Urban Farming sebagai Upaya Ketahanan Pangan di Kelurahan Kepatihan Wetan Kota Surakarta', *Inovasi Jurnal Pengabdian Masyarakat*, 3(3), pp. 177–182.

Mundt, C.C., 2014. Durable resistance: a key to sustainable management of pathogens and pests. Infection, *Genetics and Evolution*, 27, pp.446–455.

Munthe, R. et al. (2024) "KERAGAMAN GENETIK DAN HERITABILITAS KARAKTER TINGGI TANAMAN DAN JUMLAH DAUN BEBERAPA GENOTIPE SORGUM (Sorghum bicolor L. Moench)," *Jurnal Agrotek Tropika*, 9(1), p. 90. Available at: https://doi.org/10.23960/jat.v12i1.8550.

Narayan, D., Biswas, H. and Kumar, P. (2019) 'Efficacy of contour bunds and vegetative barriers in resource conservation on sloping agricultural land in Bundelkhand region', *Indian Journal of Soil Conservation*, 47(3), hal. 280–285.

Narayan, D., Biswas, H., Kumar, P. and Singh, A.K. (2017) 'Rainwater harvesting practices and resource conservation in agroforestry system in red soils of Bundelkhand', *Indian Journal of Agroforestry*, 19(2), hal. 31–36.

Nendissa, D.R.S.Z.A. bin T. et al. (2025) "'Salome' As Farmers' Effort To Face Climate Change In South Central Timor," *International Journal of Environmental Sciences*, 11(8).

Nicholls, C.I. and Altieri, M.A. (2018) 'Pathways for the amplification of agroecology', *Agroecology and Sustainable Food Systems*, 42(10), pp. 1170–1193.

Nicoletis, É., Caron, P., El Solh, M., Cole, M., Fresco, L.O., Godoy-Faúndez, A., Kadleciková, M., Kennedy, E., Khan, M., Li, X. and Mapfumo, P. (2019) *Agroecological and Other Innovative Approaches for Sustainable Agriculture and Food Systems that Enhance Food Security and Nutrition*. Available at: https://agritrop.cirad.fr/604473/1/604473.pdf.

Niks, R.E., Qi, X. and Marcel, T.C., 2015. Quantitative resistance to biotrophic filamentous plant pathogens: concepts, misconceptions, and mechanisms. *Annual Review of Phytopathology*, 53, pp.445–470.

Nizar, R. and Amalia, A. (2024) 'Pemanfaatan Pekarangan Untuk Mendukung Ketahanan Pangan Rumah Tangga Di Kecamatan Rumbai Timur Kota Pekanbaru', JAS (*Jurnal Agri Sains*), 8(1), pp. 61–69.

Noordwijk, M. (2021) 'Agroforestry-Based Ecosystem Services: Reconciling Values of Humans and Nature in Sustainable Development', *Land*, p. 699. Available at: https://doi.org/10.3390/land10070699.

Noordwijk, M.V., Duguma, L.A., Dewandani, I., et al., 2020. Agroforestry for food and nutritional security. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 42, pp.39-46.

Novita. (2024). Pertanian Regeneratif. Tersedia pada : https://unulampung.ac.id/pertanian-regeneratif/ (Diakses 1 Mei 2026).

Ntawuruhunga, D., Ngowi, E.E., Mangi, H.O., Salanga, R.J., and Shikuku, K.M. (2023) "Climate-smart agroforestry systems and practices: A systematic review of what works, what doesn't work, and why," *Forest Policy and Economics*, 150, p. 102937. Available at: https://doi.org/10.1016/j.forpol.2023.102937.

Nurwahyuni, E. (2012) 'Optimalisasi Pekarangan Melalui Budidaya Tanaman Secara Hidroponik', in *Prosiding Seminar Nasional Optimalisasi Pekarangan*. Semarang: UNDIP Press, pp. 863–868.

Nuryati, R. et al. (2022) "Multifunctionality of Integrated Plantation Polyculture Farming in Tasikmalaya Regency, West Java, Indonesia," *Asian Journal of Agriculture and Rural Development*, 12(2), pp. 91–103. Available at: https://doi.org/10.55493/5005.v12i2.4466.

Nyakudya, I.W., Stroosnijder, L. and Nyagumbo, I. (2014) 'Infiltration and planting pits for improved water management and maize yield in semi-arid Zimbabwe', *Agricultural Water Management*, 141, hal. 30–46.

Ofstehage, A. and Nehring, R. (2021) "No-till agriculture and the deception of sustainability in Brazil," *International Journal of Agricultural Sustainability*, 19(3–4), pp. 335–348. Available at: https://doi.org/10.1080/14735903.2021.1910419.

Oki, T. and Kanae, S. (2006) 'Global hydrological cycles and world water resources', Science, 313(5790), hal. 1068–1072.

Orsini, F., Kahane, R., Nono-Womdim, R. and Gianquinto, G. (2013) 'Urban Agriculture in the Developing World: A Review', *Agronomy for Sustainable Development*, 33(4), pp. 695–720.

Ortiz-Bobea, A., Ault, T.R., Carrillo, C.M., Chambers, R.G., Lobell, D.B., 2021. Anthropogenic climate change has slowed global agricultural productivity growth. *Nat. Clim. Chang*. 11, 306–312. https://doi.org/10.1038/s41558-021-01000-1

Otieno, M. (2025) *Sustainable Agroecological Practices in Sub-Saharan Africa in The Face of Climate Change*. SPRINGER INTERNATIONAL PU.

Palkovič, J. (2024) "Measuring food security in European countries: Limitations of the global food security index and its comparison with the DEA approach," *Regional Statistics*, 14(4), pp. 642–669. https://doi.org/10.15196/RS140402.

Pamungkas, P. (2023) *Urban Farming: Inovasi Dalam Memenuhi Kebutuhan Pangan dan Membangun Kehidupan yang Lebih Sehat di Perkotaan*. Yogyakarta: UPY Press.

Panday, D., Bhusal, N., Das S., & Ghalehgolabbehbahani, A. (2024). Rooted in Nature: The Rise, Challenges, and Potential of Organic Farming and Fertilizers in Agroecosystems. *Sustainability* 16, 1530 pp : 1-25. https://doi.org/10.3390/su16041530

Parmila, I.P., Suardike, P. & Prabawa, P.S. (2022), Kajian pertanian organik dalam upaya menyusun kebijakan pembangunan pertanian yang berkelanjutan di Kabupaten Buleleng, *Jurnal Pertanian Agros*, 24(3), pp. 1156–1169.

Parwata, I.M.O, (2026). Pertanian Organik Menuju Bali Pulau Organik (Bali Organik Island). Tersedia pada : https://distanpangan.baliprov.go.id/pertanian-organik-menuju-bali-pulau-organik-bali-organik-island/ (Diakses 20 April 2026)

Pawiroharsono, S. (2013) "Revitalisasi Penganekaragaman Pangan Berbasis Pangan Lokal," *Jurnal Pangan*, 22(1).

Pereira, L.S., Cordery, I. and Iacovides, I. (2012) 'Improved indicators of water use performance', *Agricultural Water Management*, 108, hal. 39–51.

Pontius, J., Dilts, R. and Bartlett, A. (2002) 'From farmer field school to Community IPM (Integrated Pest Management): ten years of IPM training in Asia', RAP Publication (FAO) [Preprint], (2002/15).

Poulsen, M.. (2017) 'Cultivating Citizenship, Equity, and Social Inclusion? Putting Civic Agriculture into Practice Through Urban Farming', *Agriculture and Human Values*, 34(1), pp. 135–148.

Prasetyo, A., Rahman, F. and Wijaya, K., 2025. Digital transformation in Indonesian smallholder agriculture: A path to agroecology. *Journal of Rural Studies*, 112, p.103-118.

Pretty, J., Attwood, S., Bawden, R., et al., 2022. Assessment of the growth in social-ecological systems for food systems transformation. *Global Food Security*, 35, p.100654.

Pretty, J.N. (1995) 'Participatory learning for sustainable agriculture', *World development*, 23(8), pp. 1247–1263.

Prita, D.S. and Widiyawati, I. (2019) 'Penerapan Teknologi Budidaya Tanaman Obat Sebagai Upaya Pemanfaatan Lahan Pekarangan di Kelurahan Pabuwaran, Purwokerto, Jawa Tengah', *Panrita Abdi-Jurnal Pengabdian Pada Masyarakat*, 3(2), pp. 105–112.

Purvis, A. and Hector, A. (2000) "Getting the measure of biodiversity," Nature, 405(6783), pp. 212–219. Available at: https://doi.org/10.1038/35012221.

Putra, Y.A., Siregar, G. and Utami, S. (2019) 'Peningkatan Pendapatan Masyarakat Melalui Pemanfaatan Pekarangan dengan Tekhnik Budidaya Hidroponik', in *Prosiding Seminar Nasional Kewirausahaan. Medan*: Fakultas Ekonomi Dan Binis Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara, pp. 122–127.

Putri, H.J., Walid, L.K.I., Hidayattulloh, M.R., Islamatasya, N., Oktavian, N.R., Agisni, R. & Adnan, R.H. (2025), Optimalisasi potensi pertanian berkelanjutan sebagai pilar ketahanan ekonomi lokal di Sembalun Lombok Timur: perspektif pembangunan berkelanjutan, *Triwikrama: Jurnal Multidisiplin Ilmu Sosial*, 9(4).

Quaye, J., Adams, F., Mensah, A., Ullah, A., Euah, S. and Donkor, E. (2025) 'Crop-Livestock Integration in Urban Agriculture: Implication for Urban Food Security in Ghana', *Food and Energy Security*, 14(3), p. 70100.

Quintarelli, V. et al. (2022) "Cover Crops for Sustainable Cropping Systems: A Review," *Agriculture*, 12(12), p. 2076. Available at: https://doi.org/10.3390/agriculture12122076.

Quon, S. (1999) *Planning for Urban Agriculture: A Review of Tools and Strategies for Urban Planners*. Available at: https://idl-bnc-idrc.dspacedirect.org/server/api/core/bitstreams/c556be21-36a7-4500-b5a1-05e9f1fe5731/content.

Rahman, C.L. et al. (2024) "Kelimpahan Serangga Musuh Alami dan Polinator di Pertanaman Sacha Inchi (Plukenetia volubilis L.) di Kecamatan Sucinaraja,"

Jurnal Agroteknologi dan Sains (JAGROS), 8(2), pp. 26–35. Available at: www.journal.uniga.ac.id.

Rahmanto, F., Purnomo, E.P. dan Kasiwi, A.N. (2020) "Food Diversification: Strengthening Strategic Efforts to Reduce Social Inequality through Sustainable Food Security Development in Indonesia," *Caraka Tani: Journal of Sustainable Agriculture*, 36(1), hlm. 33. Tersedia pada: https://doi.org/10.20961/carakatani.v36i1.41202.

Rasiska, S. and Khairullah, A. (2017) "Efek Tiga Jenis Pohon Penaung terhadap Keragaman Serangga pada Pertanaman Kopi di Perkebunan Rakyat Manglayang, Kecamatan Cilengkrang, Kabupaten Bandung," *Agrikultura*, 28(3). Available at: https://doi.org/10.24198/agrikultura.v28i3.15750.

Rasman, A., Theresia, E.S. & Aginda, M.F. (2023) "Analisis Implementasi Program Food Estate sebagai Solusi Ketahanan Pangan Indonesia," *Holistic: Journal of Tropical Agriculture Sciences Riset* (HJTAS), 1(1), pp. 36–68. https://doi.org/10.61511/hjtas.v1i1.2023.183.

Raza, A., Razzaq, A., Mehmood, S.S., Zou, X., Zhang, X., Lv, Y., Xu, J., 2019. Impact of Climate Change on Crops Adaptation and Strategies to Tackle Its Outcome: A Review. *Plants* 8, 34. https://doi.org/10.3390/plants8020034

Reddy, P.P. (2016) "Integrated Crop–Livestock Farming Systems," in P. P. Reddy, *Sustainable Intensification of Crop Production*. Singapore: Springer Singapore, pp. 357–370. Available at: https://doi.org/10.1007/978-981-10-2702-4_23.

Reich, J., Paul, S.S., Snapp, S.S., 2021. Highly variable performance of sustainable intensification on smallholder farms: A *systematic review. Global Food Security* 30, 100553. https://doi.org/10.1016/j.gfs.2021.100553

Reijntjes, C., Haverkort, B. dan Waters-Bayer, A. (1992) *Farming for the future: an introduction to low-external-input and sustainable agriculture*. 1. publ. London: Macmillan [u.a.].

Ritonga, E.N., Nasution, E.K.I., Siregar, E.S., Harahap, S. and Harahap, Q.. (2023) 'Pemanfaatan Pekarangan Untuk Budidaya Sayuran Sebagai Penyedia Bahan Pangan Keluarga Dalam Mengatasi Stunting Di Gunung Tua Lumban Pasir Di Kabupaten Mandailing', *Aksen Jurnal*, 3(2), pp. 1–9.

Rockström, J. (2003) 'Water for food and nature in Drought-Prone Tropics: Vapour Shift in Rain-Fed Agriculture', *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, 358, hal. 1997–2009.

Rockström, J., Falkenmark, M., Karlberg, L., Hoff, H., Rost, S. and Gerten, D. (2010) 'Future water availability for global food production: The potential of green water for increasing resilience to global change', *Water Resources Research*, 46(5).

Rockström, J., Gupta, J., Qin, D., et al., 2023. Safe and just Earth system boundaries. *Nature*, 619(7968), pp.102-111.

Rodríguez P and Alhaj Hamoud. (2024), Editorial: The restoration of degraded soils: amendments and remediation. Front. Environ. Sci. 12:1390795. doi: 10.3389/fenvs.2024.1390795

Roling, N.G. and Wagemakers, M.A.E. (2000) *Facilitating sustainable agriculture: participatory learning and adaptive management in times of environmental uncertainty*. Cambridge University Press.

Rose, D. C. & Chilvers, J., 2018. Agriculture 4.0: Broadening responsible innovation in an era of smart farming. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 2, p. 87.

Rosenzweig, C., Mbow, C., Barioni, L.G., Benton, T.G., Herrero, M., Krishnapillai, M., Liwenga, E.T., Pradhan, P., Rivera-Ferre, M.G., Sapkota, T., Tubiello, F.N., Xu, Y., Mencos Contreras, E., Portugal-Pereira, J., 2020. Climate change responses benefit from a global food system approach. *Nat Food* 1, 94–97. https://doi.org/10.1038/s43016-020-0031-z

Ruiz-Almeida, A. and Rivera-Ferre, M.G. (2019) 'Internationally-based indicators to measure Agri-food systems sustainability using food sovereignty as a conceptual framework', *Food Security*, 11(6), pp. 1321–1337.

Sabang, Y. (2025).Regeneratif: Praktik Pertanian Berkelanjutan Untuk Solusi Pangan Masa Depan. Tersedia pada : https://fkp.unesa.ac.id/post/regeneratif-praktik-pertanian-berkelanjutan-untuk-solusi-pangan-masa-depan (Diakses 28 April 2026)

Safitri, D.A. and Rasyidah, R. (2022) 'Optimalisasi Urban Farming Untuk Membangun Kemandirian Pangan Rumah Tangga di Kelurahan Bringin, Sambikerep, Surabaya', JABN, 3(2), pp. 22–34.

Salasa, A.R. (2021) "Paradigma dan Dimensi Strategi Ketahanan Pangan Indonesia," *Jejaring Administrasi Publik*, 13(1), pp. 35–48. https://doi.org/10.20473/jap.v13i1.29357.

Saleh, K., Sumardjo, Hubeis, A.V.S. & Puspitawati, H. (2017) "The effect of social capital in improving the capacity of rural women as"Emping Melinjo"

cottage industry actors in Banten Province, Republic of Indonesia," *International Journal of Sciences: Basic and Applied Research* (IJSBAR), 33(1), pp. 300–312. https://www.gssrr.org/index.php/JournalOfBasicAndApplied/article/view/7312.

Salim, Z. (2010) *Food Security Policies in Maritime Southeast Asia: The case of Indonesia*. IISD.

Salinas-Roco, S. et al. (2024) "N2 Fixation, N Transfer, and Land Equivalent Ratio (LER) in Grain Legume–Wheat Intercropping: Impact of N Supply and Plant Density," *Plants*, 13(7), p. 991. Available at: https://doi.org/10.3390/plants13070991.

Samaniego, K.T., Parra, J.M.R., Arispuro, I.V., Téllez, M.A.M., Lagler, M.C.G., Gurrlola, D.F., Peña, M.L.M., Arellano, J.C.T., Figueroa, J.A.G. and López, P.C.E. (2025) "Agroecology and Sustainable Agriculture: Conceptual Challenges and Opportunities—A Systematic Literature Review," *Sustainability*, 17(5), pp. 2–21.

Samedi, S. (2021) "KONSERVASI KEANEKARAGAMAN HAYATI DI INDONESIA: REKOMENDASI PERBAIKAN UNDANG-UNDANG KONSERVASI," *Jurnal Hukum Lingkungan Indonesia*, 2(2), pp. 1–28. Available at: https://doi.org/10.38011/jhli.v2i2.23.

Sandhiyana, A.B., Suwardji, S. and Susilowati, L.E. (2025) 'Optimalisasi pengelolaan air pada lahan kering untuk meningkatkan produktivitas pertanian berkelanjutan: Pendekatan prinsip agroekologi', *Empiricism Journal*, 6(4).

Santi, L. P., Mulyanto, D. & Goenadi, D. H., 2022. Microbe-based technology for improving rice productivity in Indonesia. *Journal of Tropical Soils*, 27(2), pp. 85-94.

Sanyé-Mengual, E., Specht, K., Krikser, T., Vanni, C., Pennisi, G., Orsini, F. and Gianquinto, G.. (2018) 'Social Acceptance and Perceived Ecosystem Services of Urban Agriculture in Southern Europe: The Case of Bologna, Italy', *PLoS One*, 13(9), p. 0200993.

Saputro, W.A., Budiyoko, Susilo, E. Da Rato, Y.Y. Anwar. M.A. Wibowo, A. Adriani, D. Muala, B., Suciati, L.P., Agung, S., & Sulistyowati, L. (2024). Pembangunan Pertanian Berkelanjutan. CV Hei Publishing Indonesia. Padang. Sumatera Barat.

Sari, A.M. (2023). Macam – Macam Teknik Pengolahan Tanah. Tersedia pada : https://faperta.umsu.ac.id/macam-macam-teknik-pengolahan-tanah/ (Diakses 1 Mei 2026)

Sari, P.M., Surahman, M. and Budiman, C. (2018) "Peningkatan Produksi dan Mutu Benih Jagung Hibrida Melalui Aplikasi Pupuk N, P, K dan Bakteri Probiotik," *Buletin Agrohorti*, 6(3), pp. 412–421.

Sarjono, A., Guntoro, D. and Supijatno, S. (2018) 'The Role of Biomulch Arachis pintoi In Increasing Soil Infiltration Rate on Sloping Land of Oil Palm Plantation', *Journal of Tropical Crop Science*, 5(3), hal. 89–95. doi: 10.29244/jtcs.5.3.89-95.

Sasmita, I.R.A., Anindita, D.C. and Cahyono, Z.. (2023) 'Sosialisasi Pemanfaatan Pekarangan Sebagai Sumber Pangan dan Desa Ramah Lingkungan di Kabupaten Kediri', *Jatimas Jurnal Pertanian Dan Pengabdian Masyarakat*, 3(1), pp. 68–74.

Sathoria, P. and Roy, B. (2022) "Sustainable food production through integrated rice-fish farming in India: a brief review," *Renewable Agriculture and Food Systems*, 37(5), pp. 527–535. Available at: https://doi.org/10.1017/S1742170522000126.

Sayani, S., Prabawa, P.S., Prakoso, T. & Takdir, N. (2024), Agroteknologi berkelanjutan menuju pertanian yang ramah lingkungan, PT Media Penerbit Indonesia. Medan.

Schewe, J., Heinke, J., Gerten, D., Haddeland, I., Arnell, N.W., Clark, D.B., Dankers, R., Eisner, S., Fekete, B.M., Colón-González, F.J. and Gosling, S.N. (2014) 'Multimodel assessment of water scarcity under climate change', *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 111(9), hal. 3245–3250.

Scoones, I. and Thompson, J. (2009) *Farmer first revisited: Innovation for agricultural research and development.* The Institute of Development Studies and Partner Organisations.

Sekaran, U., Lai, L., Ussiri, D.A.N., Kumar, S., and Clay, S. (2021) "Role of integrated crop-livestock systems in improving agriculture production and addressing food security – A review," *Journal of Agriculture and Food Research*, 5, p. 100190. Available at: https://doi.org/10.1016/j.jafr.2021.100190.

Senthil-Kumar, M. and Mysore, K.S., 2013. Nonhost resistance against bacterial pathogens: retrospectives and prospects. *Annual Review of Phytopathology*, 51, pp.407–427.

Septya, F., Rosnita, R., Yulida, R. and Andriani, Y. (2022) 'Urban Farming Sebagai Upaya Ketahanan Pangan Keluarga di Kelurahan Labuh Baru Timur Kota Pekanbaru', RESWARA: *Jurnal Pengabdian Kepada Masyarakat*, 3(1), pp. 105–114.

Setiarsih, D. *et al.* (2024) *Ekologi Pangan dan Gizi*. Juli 2024. Edited by A.S. Nasution. Surabaya: Future Science Publisher. Available at: www.futuresciencepress.com.

Setiawan, T. and Pratama, M.F.. (2024) 'Pemenuhan Pangan Berkelanjutan Melalui Pemanfaatan Lahan Pekarangan Sebagai Adaptasi Baru Urban Farming di Kota Bandung', *Jurnal Pengabdian Sosial*, 1(9), pp. 973–983.

Shah, K.K. et al. (2021) "Diversified Crop Rotation: An Approach for Sustainable Agriculture Production," *Advances in Agriculture*, 2021, pp. 1–9. Available at: https://doi.org/10.1155/2021/8924087.

Shahbaz, P., Haq, S., Boz, I., Márta, A., Jung, A., Molnár, B., Shankar, R., Govindakrishnan, P.M., Rawat, S., Sherly, J., Hasaneen, M.N.A.E., Danish, S., Ali, H. and Shahbaz, R.D.P.S. (2023) *Smart Farming Integrating Conservation Agriculture, Information Technology, and Advanced Techniques for Sustainable Crop Production*. London: [Nama Penerbit].

Shahmohamadloo, R.S. et al. (2022) 'The sustainable agriculture imperative: A perspective on the need for an agrosystem approach to meet the United Nations Sustainable Development Goals by 2030', *Integrated Environmental Assessment and Management*, 18(5), pp. 1199–1205. Available at: https://doi.org/10.1002/ieam.4558.

Shaliza, F., Sumardjo, S., Sadono, D. & Uchrowi, Z. (2025a) "Strengthening group leadership and farmer independence through optimizing the role of information communication technology (ICT)," *Multidisciplinary Science Journal*, 7(10). https://doi.org/10.31893/multiscience.2025484.

Shaliza, F., Sumardjo, S., Sadono, D. & Uchrowi, Z. (2025b) "The synergy of agricultural extension and farmer group leadership in promoting farmers' independence in the digital era," *BIO Web of Conferences*. 186, p. 02007. https://doi.org/10.1051/bioconf/202518602007.

Sharma, A., Sandhi, R.K. and Reddy, G.V.P., 2019. A review of interactions between insect biological control agents and semiochemicals. *Insects,* 10(12), 439.

Shofyan, M. and Lestari, A. (2024) 'Pemanfaatan Pekarangan Rumah Sebagai Sumber Bahan Pangan Dengan Sistem Permakultur Untuk Mengatasi Krisis Pangan', in *Prosiding Seminar Nasional Sains dan Teknologi Seri 02*. Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Terbuka, pp. 771–780.

Shrestha, J., Subedi, Subash, Timsina, K.P., Subedi, Sudeep, Pandey, M., Shrestha, A., Shrestha, S., Hossain, M.A., 2021. *Sustainable Intensification in Agriculture: An Approach for Making Agriculture Greener and Productive. J. Nep. Agric. Res. Counc*. 7, 133–150. https://doi.org/10.3126/jnarc.v7i1.36937

Sinaga, G.A.D., Kurniawan, Y., Aminy, N.A., Kusumawati, A. (2022) 'Urgensi Komunikasi, Budaya Lokal dan Ketahanan Pangan dalam Gerakan Urban Farming di Masa Pandemi Covid-19', *J. Ilmu Sos. dan Hum*, 11, pp. 337–351.

Sinclair, F. & Coe, R., 2019. The options by context approach: A shift in paradigm for technologies in agroecology. *Experimental Agriculture*, 55(S1), pp. 1-13.

Siregar, L.A., Wulandari, D. and Retnaningsih, C. (2025) "KETAHANAN PANGAN BERBASIS SUMBER DAYA LOKAL: STUDI LITERATUR SEBAGAI TRANSFORMASI PANGAN MENUJU INDONESIA MAJU 2045*," SEMINAR NASIONAL SANATA DHARMA BERBAGI (USDB) "70 Tahun Sanata Dharma Menggali Makna dan Membangun Harapan: Paradigma Keberlanjutan dan Tantangan Perubahan Iklim."* Semarang: Soegijapranata Catholic University, pp. 402–421.

Sitinjak, W., Sinaga, R., Reni, L., Simanjuntak, R., Marbun, J., Siadari, M., Tuah, H., Rizky, J., Sitinjak, I.Y. and Sitinjak, H. (2024) 'Pemanfaatan Pekarangan Dalam Mendukung Ketahanan Pangan dan Gizi Sehat Keluarga Dengan Budidaya Tanaman Sayuran Secara Vertikultur di Masyarakat Sekitar GMI Banuh Raya', *Jurnal Pengabdian Masyarakat Sapangambei Manoktok Hitei2*, 4(2), pp. 370–380.

Sjarkowi, F. (2014) *Agro-Ekosistem Lahan Basah Lestari: Titah Inovasi Kedaulatan Pangan and Kesejahteraan Masyarakat Agraris*. Palembang: Baldad Grafiti Press.

Smith, C.M. and Clement, S.L., 2012. Molecular bases of plant resistance to arthropods. *Annual Review of Entomology*, 57, pp.309–328.

Smith, M.R. and Myers, S.S., 2018. Impact of anthropogenic CO2 emissions on global human nutrition. *Nature Climate Change*, 8(9), pp.834-839.

Soares, A.P. et al., 2026. The overlooked impact of botanical pesticides on non-target organisms. *Plants*, 15(6), p.917.

Soemarwoto, O. (1997) *Ekologi, Lingkungan Hidup dan Pembangunan*. Jakarta: Penerbit Djambatan.

Solunoğlu, S. (2025) "Agroecological Memory in the Context of Climate Change: Drought-Resilient Local Varieties, Gastronomy, and Sustainable Cultural Heritage." Tersedia pada: https://doi.org/10.5281/ZENODO.18131513.

Sommano, S.R., Teerakitchotikan, P., Tangpao, T., Wongkeaw, M., Lumsangkul, C., Panyadee, P. & Lee, S.H. (2025) "Insights into food security and safety issues in a Myanmar refugee camp," *Discover Sustainability*, 6(918), pp. 1–17. https://doi.org/10.1007/s43621-025-01885-4.

Sousa, R. and Batista, D. (2013) 'Urban Agriculture: The Allotment Gardens as Structures of Urban Sustainability', in M. Özyavuz (ed.) *Advances in Landscape Architecture*. InTech. Available at: http://dx.doi.org/10.5772/55892.

Specht, K., Siebert, R., Hartmann, I., Freisinger, U.B., Sawicka, M., Werner, A., Thomaier, S., Henckel, D., Walk, H. and Dierich, A. (2014) 'Urban Agriculture of the Future: An Overview of Sustainability Aspects of Food Production in and on Buildings', *Agriculture and Human Values*, 31(1), pp. 33–51.

Srinivasan, R. (2025) "Diversification of Rice-Based Cropping Systems with Vegetables and Legumes in Asia and Africa," *Crops*, 5(4), p. 43. Available at: https://doi.org/10.3390/crops5040043.

Stenberg, J.A. and Muola, A., 2017. How should plant resistance to herbivores be measured? *Frontiers in Plant Science*, 8, 663.

Stenberg, J.A., 2017. A conceptual framework for integrated pest management. *Trends in Plant Science*, 22(9), pp.759–769.

Sudarko, Sumardjo, Fatchiya, A. & Tjitropranoto, P. (2020) "Factors affecting farmer' autonomy and sustainability of smallholder coffee farming using SEM Lisrel*," International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering* (IJITEE), 9(5), pp. 1839–1845. https://doi.org/10.35940/ijitee.E2985.039520.

Sudarsih, R. and Susilowati, L.E. (2025) "Agroekologi sebagai Solusi Berkelanjutan : Review Sistematis terhadap Praktik dan Dampaknya pada Sistem Pertanian," 4(3), pp. 943–953.

Sudarsih, R. et al. (2025) 'Agroekologi sebagai solusi berkelanjutan: Review sistematis terhadap praktik dan dampaknya pada sistem pertanian', *Jurnal Ilmiah Mahasiswa Agrokomplek*, 4(3), pp. 943–953.

Sugihartini, T., Djuliansah, D. and Noormansyah, Z. (2023) 'Model Pengembangan Pertanian Perkotaan (Urban Farming) Berkelanjutan', *Jurnal Ilmiah Mahasiswa Agroinfo Galuh*, 10(2), pp. 1070–1089.

Sumardjo, Firmansyah, A. & Dharmawan, L. (2019) "Ecological adaptation of coastal communities based on social energy: A case of natural disasters potential on the north coast of West Java," *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. Institute of Physics Publishing, pp. 1–8. https://doi.org/10.1088/1755-1315/399/1/012028.

Sumner, J. (2005) *Sustainability and the civil commons: Rural communities in the age of globalization.* University of Toronto Press.

Suradi, A.R., Said, M., Darmawansyah, D., Jurana, J., Serli, S., Saputra, A., Asniana, A., Noviandani, N., Sapitri, I. and Aziz, E. (2025) 'Pemanfaatan Pekarangan Untuk Budidaya Sayuran Dalam Mendukung Ketahanan Pangan Keluarga', JDISTIRA-*Jurnal Pengabdian Inovasi dan Teknologi Kepada Masyarakat*, 5(2), pp. 497–505.

Surakarta, P. (2019) *Kajian pengembangan potensi pasar tradisional di kabupaten purwakarta*. Purwakarta.

Suryani, S., Nurjasmi, R. and Fitri, R. (2020) 'Pemanfaatan Lahan Sempit Perkotaan Untuk Kemandirian Pangan Keluarga', *Jurnal Ilmiah Respati*, 11(2), pp. 93–102.

Syahputra, F., Leihitu, T., Harahap, L.H., Diartika, E.I.A., Hatmanto, T., Fadli, M., Shaliza, F., Putra, F.M. & Judijanto, L. (2024) "Manajemen Risiko Pertanian Mengatasi Perubahan Pasar". Medan: Yayasan Literasi Indonesia.

Syarif, S.M. (2025) "ANALISIS RANTAI DISTRIBUSI HASIL PANEN PETANI," *Ekonomi dan keuangan islam*, 3(1), pp. 29–36.

Tamburini, G. et al., 2020. Agricultural diversification promotes multiple ecosystem services without compromising yields. *Science Advances*, 6(45), p. eaba1715.

Tan, S.S. and Mailena, L. (2021) "Empowerment of Farmers toward Corporate Implementation," in *E3S Web of Conferences*, pp. 1–10.

Tanwar, R. dkk. (2023) "Nutritional, phytochemical and functional potential of sorghum: A review," *Food Chemistry Advances*, 3, hlm. 100501. Tersedia pada: https://doi.org/10.1016/j.focha.2023.100501.

Taylor, J.R. and Lovell, S.. (2014) 'Urban Home Food Gardens in the Global North: Research Traditions and future Directions', *Agriculture and Human Values*, 31(2), pp. 285–305.

Tilman, D. and Clark, M. (2014) 'Global diets link environmental sustainability and human health', Nature, 515(7528), pp. 518–522.

Timmis, K. et al., 2019. The relevant microbes of the soil and their role in sustainable agriculture. *Microbial Biotechnology*, 12(5), pp. 830-842.

Timpanaro, G. et al. (2026) 'Regulatory frameworks and policy innovations for agroecology in the Mediterranean: Comparative insights, challenges, and global prospects for sustainable transition', *Land Use Policy*, 165, p. 108001. Available at: https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2026.108001.

Tittonell, P. (2019) 'Ecological Intensification of Agriculture', in R. Serraj (ed.) Agriculture & Food Systems to 2050: *Global Trends, Challenges and Opportunities*. World Scientific Publishing, pp. 437–472.

Tono, Ariani, M. & Suryana, A. (2023) "Kinerja Ketahanan Pangan Indonesia: Pembelajaran dari Penilaian dengan Kriteria Global dan Nasional," *Analisis Kebijakan Pertanian*, 21(1), pp. 1–20. https://doi.org/10.21082/akp.v21n1.2023.1-20.

Tropenbos (2023) *Scaling Agroforestry in Indonesia: Opportunities, challenges and solution pathways in scaling and mainstreaming agroforestry in Indonesia*. Tropenbos Indonesia, p. 158. Available at: https://www.tropenbos-indonesia.org/resources/publications/scaling%20agroforestry%20in%20indonesia

Ujj, A. et al. (2025) 'Agroecological Adoption Pathways in Europe: Drivers, Barriers, and Policy Implication Opportunities in the Czech Republic, Hungary, and Portugal', *Agriculture*, p. 2414. Available at: https://doi.org/10.3390/agriculture15232414.

Umunnakwe, Ok.C. et al. (2025) 'Cost Implications of in Situ Solarization on Cassava (Manihot esculenta Crantz) Production in the Humid Agroecosystem of Southern Nigeria', *Direct Research Journal of Agriculture and Food Science*, 13(1), pp. 16–21.

UN DESA, 2024. *World Population Prospects 2024: Summary of Results*. New York: United Nations Department of Economic and Social Affairs.

Undang-Undang Republik Indonesia No. 18 Tahun 2012 tentang Pangan.

United Nations (2018) *World Urbanization Prospects: The 2018 Revision*.

United Nations Environment Programme (UNEP) (2019) *Global Environment Outlook 6*. Nairobi: UNEP.

United States Department Agriculture (2020) *Urban Agriculture Toolkit*.

University of Maryland Extension, 2023. *Parasitoids*. University of Maryland Extension.

US EPA, 2025. Integrated Pest Management (IPM) *Principles*. United States Environmental Protection Agency.

US EPA, 2025. *What are biopesticides*? United States Environmental Protection Agency.

Utami, R.N. et al. (2025) *Teknologi pascapanen tanaman pangan*. Mei 2025. Edited by R.V. Nazara. Padang: Azzia Karya Bersama.

Utari, A., Maharani, Y. and Sudarjat, S. (2024) "Keanekaragaman Serangga dan Fungsinya pada Tiga Tipe Perkebunan Kopi Arabika (Coffea arabica L.) di Kecamatan Pangalengan, Kabupaten Bandung," *Agrikultura*, 35(3), pp. 494–505. Available at: https://doi.org/10.24198/agrikultura.v35i3.58144.

Utomo, I.S. et al. (2025) 'INNDESA dalam perspektif agroekologi: Arah baru CSR untuk ketahanan pangan dan lingkungan', *Learning Society: Jurnal CSR, Pendidikan dan Pemberdayaan Masyarakat*, 6(1), pp. 1–12.

Uwingabire, Z. and Gallai, N. (2024) 'Impacts of degraded pollination ecosystem services on global food security and nutrition', *Ecological Economics*, 217, p. 108068. Available at: https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2023.108068.

van Asseldonk, M. et al. (2023) 'Policy incentives for smallholder adoption of climate-smart agricultural practices', *Frontiers in Political Science*, Volume 5-2023.

van Noordwijk, M., Coe, R., Sinclair, F.L., Luedeling, E., Bayala, J., Muthuri, C.W., Cooper, P., Kindt, R., Duguma, L., Lamanna, C., Minang, P.A., 2021. Climate change adaptation in and through agroforestry: four decades of research initiated by Peter Huxley. *Mitig Adapt Strateg Glob Change* 26, 18. https://doi.org/10.1007/s11027-021-09954-5

van Noordwijk, M., Ekadinata, A., *et al.* (2020a) "Agroforestry Options for Degraded Landscapes in Southeast Asia," in J.C. Dagar, S.R. Gupta, and D. Teketay (eds.) *Agroforestry for Degraded Landscapes*. Singapore: Springer Singapore, pp. 307–347. Available at: https://doi.org/10.1007/978-981-15-4136-0_11.

van Noordwijk, M., Speelman, E., *et al.* (2020b) "Sustainable Agroforestry Landscape Management: Changing the Game," *Land*, 9(8), p. 243. Available at: https://doi.org/10.3390/land9080243.

Van Veenhuizen, R. (2006) *Cities Farming for the Future: Urban Agriculture for Green and Productive Cities.* International Development Research Centre (IDRC).

Vaughan, D.A. dan Te-Tzu Chang (1992) "In situ Conservation of Rice Genetic Resources," Economic Botany, 46(4), hlm. 368–383.

Vermue, A. J., Roep, D. & Wiskerke, J. S., 2023. Scaling agroecological innovations: A socio-technical perspective. *Agricultural Innovation Systems*, 12(4), pp. 312-329.

Vikas and Ranjan, R. (2024) "Agroecological approaches to sustainable development," *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 8. Available at: https://doi.org/10.3389/fsufs.2024.1405409.

Viljoen, A. and Bohn, K. (2014) *Second Nature Urban Agriculture: Designing Productive Cities*. Routledge.

Vira, B., Wildburger, C., Mansourian, S. (eds.) (2015) *Forests, trees and landscapes for food security and nutrition: a global assessment report*. Vienna: IUFRO (IUFRO world series, 33).

Vliet, J.A.V. and Giller, K.E. (2017) "Chapter Five - Mineral Nutrition of Cocoa: A Review," in *Advances in Agronomy*. Amsterdam, Belanda: Elsevier, pp. 185–270.

Waddington, H.S., Snilstveit, B., Hombrados, J.G. and Vojtkova, M. (2014) "Farmer Field Schools for Improving Farming Practices and Farmer Outcomes: A Systematic Review," *Campbell Systematic Reviews*, 10(6), pp. 1–311.

Wang, G. and Xu, M. (2024) "The role of social interaction in farmers' water-saving irrigation technology adoption: testing farmers' interaction mechanisms," *Scientific Reports*, 14(24969), pp. 1–17.

Wang, S. and Caldwell, C.D. (2026) 'New Challenges for Education in Agroecology BT - Advanced Agroecology', in S. Wang and C.D. Caldwell

(eds). Cham: Springer Nature Switzerland, pp. 141–167. Available at: https://doi.org/10.1007/978-3-032-08689-1_7.

Washington State University Tree Fruit, n.d. *Natural Enemies*. Washington State University.

Waterson, M. (2017) "Concentration and Power in the Food System: Who controls what we eat?," *Agric Food Environ Stud*, 98(2 March 2017), pp. 221–224. Available at: https://doi.org/10.1007/s41130-017-0039-4.

Weih, M., Mínguez, M.I. and Tavoletti, S. (2022) "Intercropping Systems for Sustainable Agriculture," *Agriculture*, 12(2), p. 291. Available at: https://doi.org/10.3390/agriculture12020291.

Wenzel, B. et al. (2024) 'Improving ecosystem services through applied agroecology on German farms: costs and benefits', *Agricultural and Food Economics*, 12(1), p. 37. Available at: https://doi.org/10.1186/s40100-024-00326-6.

Wezel, A. et al. (2020) 'Agroecological principles and elements and their implications for transitioning to sustainable food systems. A review: Agroecological principles and elements and their implications for transitioning to sustainable food systems. A review', *Agronomy for sustainable development*, 40(6), p. 40.

Wezel, A., Bellon, S., Doré, T., Francis, C., Vallod, D. and David, C. (2009) 'Agroecology as a science, a movement and a practice', *Agronomy for Sustainable Development*, 29(4), pp. 503–515.

White, K.E., Cavigelli, M.A. and Bagley, G. (2021) "Legumes and nutrient management improve phosphorus and potassium balances in long-term crop rotations," *Agronomy Journal*, 113(3), pp. 2681–2697. Available at: https://doi.org/10.1002/agj2.20651.

Wibowo, D.R.P. (2025) 'Kontribusi Agribisnis Terhadap Ketahanan Pangan Nasional: Literatur Review', *Locus Journal of Academic Literature Review*, 4(8), pp. 652–662. Available at: https://doi.org/10.56128/ljoalr.v4i8.699.

Widarawati, R., Prakoso, B. and Naila, R. (2021) 'Peran Kelompok Wanita Tani Dalam Pemanfaatan Lahan Pekarangan Dengan Budidaya Tanaman Sayuran Organik', *Jurnal Dinamika Pengabdian*, 7(1), pp. 145–156.

Widodo, K.H. and Jasmadi (2024) *Manajemen Rantai Pasok Pangan Strategis Disertai Implementasinya.* Sempember. Edited by K.H. Widodo. Semarang.

Willett, W., Rockström, J., Loken, B., et al., 2019. Food in the Anthropocene: the EAT–Lancet Commission on healthy diets from sustainable food systems. *The Lancet*, 393(10170), pp.447-492.

Williams, D.E. (2017) *Routledge Handbook of Agricultural Biodiversity*. Edited by D. Hunter et al. New York, NY : Routledge, 2017.: Routledge. Available at: https://doi.org/10.4324/9781317753285.

Wiratno, W., Trisawa, I.M., Taufik, I. et al. (2025) "Eco-friendly pest management in integrated rice-fish farming systems using plant-derived biopesticides to promote sustainable agriculture," *Global Journal of Environmental Science and Management*, 11(3). Available at: https://doi.org/10.22034/gjesm.2025.03.07.

Wortman, S.E. and Lovell, S.. (2013) 'Environmental Challenges Threatening the Growth of Urban Agriculture in the United States', *Journal of Environmental Quality*, 42(5), pp. 1283–1294.

WRI (2022) *Reducing Food Loss and Waste*. Jakarta.

WRI, 2019. Creating a Sustainable Food Future. A Menu of Solutions to Feed Nearly 10 Billion People by 2050.

Xiangjie, K., Shi, Y., Yu, S. and Liu, J. (2019) "Academic social networks: Modeling, analysis, mining and applications," *Journal of Network and Computer Applications*, 132, pp. 86–103.

Xiong, C. and Lu, Y. (2022) 'Microbiomes in agroecosystem: Diversity, function and assembly mechanisms.', *Environmental microbiology reports*, 14(6), pp. 833–849. Available at: https://doi.org/10.1111/1758-2229.13126.

Yang, Y., Xiong, K. and Xiao, J. (2024) 'A review of agroforestry biodiversity-driven provision of ecosystem services and implications for karst desertification control', *Ecosystem Services*, 67, p. 101634. Available at: https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2024.101634.

Yekti, M.I. dkk. (2017) "Learning from Experiences of Ancient Subak Schemes for Participatory Irrigation System Management in Bali," *Irrigation and Drainage*, 66(4), hlm. 567–576. Tersedia pada: https://doi.org/10.1002/ird.2122.

Yifan, L., Tiaoyan, W., Shaodong, W., Xucan, K., Zhaoman, Z., Hongyan, L., and Jiaolong, L. (2023) "Developing integrated rice-animal farming based on climate and farmers choices," *Agricultural Systems*, 204, p. 103554. Available at: https://doi.org/10.1016/j.agsy.2022.103554.

Yuan, G.N., Marquez, G.P.B., Deng, H., Iu, A., Fabella, M., Salonga, R.B., Ashardiono, F. and Cartagena, J.. (2022) 'A Review on urban Agriculture: Technology, Socio-Economy, and Policy', *Heliyon*, 8(11), pp. 1–16.

Yuniastuti, E. and Setyawati, A. (2024) 'Pengelolaan sumber daya lahan dan konflik pemanfaatan dalam sistem pertanian berkelanjutan', *Agrosains: Jurnal Penelitian Agronomi*, 26(2), pp. 85–95.

Zeratsion, B.T., Manaye, A., Gufi, Y., Tesfaye, M., Werku, A., and Anjulo, A. (2024) "Agroforestry practices for climate change adaptation and livelihood resilience in drylands of Ethiopia," *Forest Science and Technology*, 20(1), pp. 47–57. Available at: https://doi.org/10.1080/21580103.2023.2292171.

Zhao, C., Liu, B., Piao, S., et al., 2017. Temperature increase reduces global yields of major crops in four independent estimates. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 114(35), pp.9326-9331.

ZHAO, H. et al. (2024) 'Public perceptions of multiple ecosystem services from urban agriculture', *Landscape and Urban Planning*, 251, p. 105170. Available at: https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2024.105170.

Zimmerer, K.S. et al. (2022) 'Integrating Social-Ecological and Political-Ecological Models of Agrobiodiversity With Nutrient Management of Keystone Food Spaces to Support SDG 2', *Frontiers in Sustainable Food Systems*, Volume 6-2022.

Zulfiqar, F. et al., 2021. Bio-fertilizer role in sustainable agriculture: A review. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 21(3), pp. 2140-2155.

BIODATA PENULIS



Betzy Ayu Omega Rampean

Lahir di Kabupaten Barru, Provinsi Sulawesi Selatan pada tanggal 13 Februari 1997. Penulis dilahirkan oleh seorang ibu yang hebat bernama Dra. Martina dan Ayah yang bijaksana bernama Ayub Sinik, A.Md. Penulis menempuh pendidikan S1 di Universitas Negeri Makassar prodi Pendidikan Kimia dan S2 di Universitas Negeri Yogyakarta dengan Prodi yang sama.

Sejak kecil, Penulis menyukai menari, menulis, dan membaca buku. Hobi ini membawa penulis ke dunia jurnalistik di mana penulis telah menghasilkan beberapa jurnal nasional dan internasional serta mendapatkan hibah penelitian Kemdiktisaintek tahun 2025. Tulisannya tentang *The development of an integrated instrument to measure higher order thinking skills and scientific attitudes* telah dimuat di *Jurnal Internasional Journal of Turkish Science Education* Scopus Q2. Penulis adalah Ketua Prodi Pendidikan Kimia Universitas Kristen Indonesia Paulus Makassar dan Tutor di Universitas Terbuka. Cita-citanya membantu negara dan membarakan semangat sumber daya manusia (SDM) unggul menuju Indonesia emas tahun 2045 berbasiskan Pancasila dan Cinta Tanah Air. Untuk menghubungi penulis di

Email: **betzyrampean@gmail.com**



Fara Shaliza

Penulis lahir di Sei. Pakning pada 6 Juni 1979, sebagai anak ketiga dari empat bersaudara, pasangan H. Mohamad Ali (alm) dan Hj. Syarifah. Pendidikan dasar hingga menengah pertama ditempuh di sekolah swasta yang berada di Kompleks Perumahan Pertamina Bukit Datuk, Kota Dumai. Selanjutnya, pendidikan menengah atas diselesaikan di SMA Negeri 2 Dumai pada tahun 1997. Pendidikan tinggi dimulai di Institut Pertanian Bogor (IPB) melalui jalur Undangan Seleksi Masuk IPB (USMI) pada Jurusan Sosial Ekonomi Pertanian, Program Studi Penyuluhan dan Komunikasi Pertanian (PKP), dan diselesaikan pada tahun 2001. Pada tahun 2002, penulis melanjutkan studi magister di Sekolah Pascasarjana IPB pada Program Studi Sosiologi Pedesaan dan lulus pada tahun 2004. Karier profesional dimulai pada tahun 2007 sebagai dosen di Sekolah Tinggi Ilmu Administrasi (STIA) Lancang Kuning Dumai. Selain berkiprah di bidang akademik, penulis juga berstatus sebagai Pegawai Negeri Sipil (PNS) dengan jabatan Penyuluh Pertanian Ahli Madya di Dinas Ketahanan Pangan dan Pertanian Kota Dumai. Pada tahun 2021, penulis melanjutkan studi doktoral di IPB University pada Program Studi Komunikasi Pembangunan Pertanian dan Pedesaan (KMP) dengan peminatan Ilmu Penyuluhan Pembangunan (PPN) dan menyelesaikannya pada Januari 2026. Sejak 1 Januari 2026, status kepegawaian penulis sebagai PNS penyuluh pertanian daerah beralih menjadi penyuluh pertanian pusat di bawah Kementerian Pertanian Republik Indonesia. Bidang keahlian penulis meliputi penyuluhan pertanian dan administrasi. Penulis aktif melakukan penelitian yang telah dipublikasikan dalam berbagai bentuk, baik buku ber-ISBN maupun artikel ilmiah pada jurnal internasional bereputasi (Scopus) serta jurnal nasional terindeks SINTA.



Loso Judijanto

Seorang 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 di bidang kebijakan publik, ekonomi, keuangan, *human capital*, dan *corporate governance*. Penulis dapat dihubungi melalui

Email: **losojudijantobumn@gmail.com**



Ketut Dharma Susila

Seorang dosen dan Guru Besar tetap pada Fakultas Pertanian Universitas Udayana. Bidang keahliannya Ilmu Tanah, dengan fokus pada kualitas tanah dan produktivitas lahan. Beliau menamatkan S1 di IPB Bogor; S2 di Universitas Padjadjaran dan S3 di Universitas Udayana. Saat ini yang bersangkutan aktif mengajar mata kuliah Kualitas Tanah dan Produktivitas Lahan, Kesuburan Tanah dan Modifikasi Lingkungan Tanaman, Pupuk dan Pemupukan, serta Agroforestri. Minat penelitiannya meliputi pengelolaan kesuburan tanah, kualitas tanah dan pengendalian degradasi tanah, serta peran tanah dalam adaptasi dan mitigasi perubahan iklim. Selain aktif dalam penelitian dan publikasi ilmiah, ia juga terlibat dalam pengembangan bahan ajar, modul pembelajaran, dan kegiatan akademik yang mendukung pertanian berkelanjutan serta aktif melaksanakan pengabdian kepada masyarakat.

Melalui kegiatan akademik dan penulisan buku, Dharma Susila berupaya menjembatani ilmu tanah dengan tantangan nyata dampak perubahan iklim terhadap ekosistem pertanian, khususnya dalam upaya menekan terjadinya degradasi sumber daya tanah, air dan meningkatkan sekuestrasi karbon tanah.



Arini Al Ifah

Lahir di Sleman, 29 Agustus 1993. Memperoleh gelar Sarjana Sains (S.Si.) dari Fakultas MIPA Universitas Gadjah Mada pada tahun 2016, kemudian tahun 2018 memperoleh Gelar Magister Pertanian (M.P.) dalam bidang pemuliaan tanaman dari Universitas Sebelas Maret Surakarta. Tahun 2020 hingga sekarang menjadi pengajar di Fakultas Pertanian, Institut Pertanian (Intan) Yogyakarta, mengajar mata kuliah pemuliaan tanaman, genetika, kimia pertanian, dan teknologi produksi tanaman obat dan rempah. Fokus penelitian mengenai pemuliaan tanaman dengan ruang lingkup keragaman tanaman, adapun beberapa penelitian dengan judul "Analysis of breadfruit plant diversity (*Artocarpus altilis* P.) based on random amplified polymorphic DNA (RAPD) and morphologi in Indonesia" dan "Kajian Morfologi Buah Sukun (*Artocarpus altilis* Park. Fosberg) di Kabupaten Sleman Bagian Utara D.I.Yogyakarta". Selain itu juga aktif dalam kegiatan review naskah jurnal baik nasional maupun internasional, serta aktif dalam organisasi profesi PERIPI (Perhimpunan Ilmu Pemuliaan Tanaman) komda Jateng & DIY. Saat ini menjabat sebagai Kepala UPT Laboratorium Terpadu Institut Pertanian (Intan) Yogyakarta.



Atika Romalasari

Seorang dosen tetap pada Program Studi Teknologi Produksi Tanaman Pangan, Jurusan Pertanian, Politeknik Negeri Subang. Ia menyelesaikan pendidikan Sarjana (S1) dan Magister (S2) pada Program Studi Agronomi dan Hortikultura, Institut Pertanian Bogor, dengan fokus pada pengembangan ilmu tanaman dan sistem produksi pertanian. Dalam perjalanan akademiknya, penulis aktif mengembangkan minat pada bidang pascapanen dan fisiologi tumbuhan, yang kemudian diperluas ke kajian budidaya tanaman pangan sebagai upaya mendukung ketahanan pangan berkelanjutan.

Selain kegiatan pengajaran, penulis juga terlibat dalam penelitian dan pengabdian kepada masyarakat yang berorientasi pada penerapan teknologi tepat guna di sektor pertanian. Melalui penulisan buku ini, penulis berharap dapat memberikan kontribusi nyata dalam pengembangan ilmu agroteknologi serta menjadi referensi yang bermanfaat bagi mahasiswa, praktisi, dan pemangku kepentingan di bidang pertanian. Penyusunan karya ini menandai langkah awal penulis dalam memperluas kiprah di dunia kepenulisan ilmiah secara lebih sistematis. Penulis juga terbuka untuk kolaborasi akademik dan penelitian guna mendukung pengembangan inovasi di bidang pertanian. Penulis dapat dihubungi melalui

Email: **atika.romalasari@polsub.ac.id**



Nike Triwahyuningsih

Seorang akademisi dan praktisi lingkungan yang fokus pada isu-isu lingkungan dan keberlanjutan. Menempuh pendidikan di Universitas Gadjah Mada Yogyakarta, meraih gelar Sarjana (S1) di bidang Biologi dan Magister (S2) dalam Ilmu Pertanian. Saat ini aktif sebagai pengajar pada Program Studi Kehutanan, Fakultas Kehutanan Institut Pertanian INTAN Yogyakarta, mengampu beberapa mata kuliah antara lain Perubahan Iklim, Reklamasi Lahan, Ilmu Lingkungan, Sains Atmosfer, Bioenergi, Dendrologi, dan Pemilihan Jenis Pohon. Pengalaman kegiatan lapangan dilakukan melalui keterlibatan dalam kegiatan pendampingan dan pemberdayaan masyarakat sejak tahun 2012, khususnya yang berkaitan dengan program pertanian berkelanjutan, *green economy*, dan *circular economy*. Aktivitas di luar kegiatan akademik yang relevan diantaranya sebagai pengurus Jaringan Ahli Perubahan Iklim dan Kehutanan Indonesia (APIKI Network); dan pengurus beberapa komunitas yang bergerak di bidang lingkungan dan pemberdayaan.



Widya Kristiyanti Putri

Lahir di Serui, Kepulauan Yapen, Papua pada tahun 1989 merupakan sulung dari 3 bersaudara. Beliau menempuh pendidikan di MI Darussalam Serui hingga tahun 2000, kemudian pindah ke Kota Batu Jawa Timur dan melanjutkan pendidikan hingga SMA di SMAN 1 Batu. Pendidikan sarjana kemudian ditempuh di Universitas Negeri Surabaya jurusan Pendidikan Biologi dengan profesi pengajar kelas internasional, lalu melanjutkan pendidikan magister di Universitas Brawijaya, Malang pada jurusan Biologi, lulus pada tahun 2016. Beberapa pengalaman kerja beliau antara lain sebagai guru Biologi di SMP dan SMA pada YPPDI Al-Azhar Gresik pada tahun 2010, sebagai pengajar Sains dan Biologi di LBB Bintang Pelajar, sebagai pendiri dan direktur PT. Wooby Eduforia Gaisma yang bergerak pada lembaga bimbingan belajar sejak tahun 2016, dan kini aktif sebagai dosen di Universitas Jember sejak tahun 2019. Beliau menjadi dosen di Program Studi Agronomi, Fakultas Pertanian dan mengajar mata kuliah Agroekologi sejak pertama kali aktif. Beliau melanjutkan pendidikan doktoral di Universitas Brawijaya mulai tahun 2025 di Fakultas Pertanian dengan bidang minat Agronomi dan Hortikultura. Bidang keahlian yang digeluti hingga saat ini adalah hortikultura, fisiologi tanaman, ekologi, etnobotani, dan ekowisata. Lebih dari 20 jejak tulisan jurnal baik nasional maupun internasional terekam dalam Google Scholar.



Merry Gloria Meliala

Seorang dosen pada Sekolah Vokasi Institut Pertanian Bogor yang memiliki kepakaran di bidang agronomi, hortikultura, dan sistem produksi pertanian. Ia menyelesaikan pendidikan Sarjana dan Magister pada Program Studi Agronomi dan Hortikultura di institusi yang sama masing-masing pada tahun 2009 dan 2015. Sejak tahun 2019, ia aktif menjalankan tridarma perguruan tinggi, khususnya dalam kegiatan pendidikan dan pengajaran pada berbagai mata kuliah terkait manajemen perkebunan, budidaya tanaman, pengendalian organisme pengganggu tanaman, serta pengelolaan lingkungan pertanian.

Dalam bidang penelitian, ia terlibat dalam berbagai kajian yang berfokus pada teknologi pertanian dan pengembangan komoditas perkebunan, termasuk pemanfaatan teknologi penginderaan jauh berbasis UAV untuk pemetaan lahan serta studi kualitas dan senyawa bioaktif pada kopi. Selain itu, ia juga aktif dalam kegiatan pengabdian kepada masyarakat melalui pendampingan petani dan penguatan sistem pertanian berkelanjutan. Secara profesional, ia memiliki sertifikasi sebagai asesor kompetensi, ahli keselamatan dan kesehatan kerja (K3), serta fasilitator pertanian organik. Ia juga merupakan anggota aktif dalam berbagai organisasi profesi di bidang pertanian.



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 Ketua Program Studi di Fakultas Kehutanan, Institut Pertanian (Intan) Yogyakarta.



Tati Budi Kusmiyarti

Seorang lulusan S1 Ilmu Tanah Universitas Sebelas Maret Surakarta, S2 Ilmu Tanah pada Ilmu Pertanian Universitas Gadjah Mada Yogyakarta, dan S3 Environmental Remote Sensing and Disaster Management pada Program Doktor Ilmu Lingkungan Universitas Udayana Denpasar Bali. Saat ini berada di Laboratorium Manajemen Sumber Daya Lahan, Konsentrasi Ilmu Tanah dan Lingkungan dan mengajar pada Program Studi Agroekoteknologi Fakultas Pertanian Universitas Udayana. Pengalaman mengajar pada mata kuliah Dasar-dasar Ilmu Tanah, Pengelolaan Tanah dan Air, Kesuburan Tanah dan Pemupukan, Agrogeologi dan Lingkungan, Pedogenesis Tanah, Klasifikasi Tanah dan Kesesuaian Lahan, Agrowisata, Perencanaan Pembangunan dan Pengembangan Wilayah, Geomorfologi dan Analisis Lanskap, Sistem Informasi Geografi, dan Penginderaan Jauh. Beberapa penelitian dan publikasi ilmiah yang terkait dengan tema buku: 1) Analysis of Water Availabilty for Domestic Needs in Denpasar City, 2) Flood Risk Analysis in Denpasar City, Bali, Indonesia, 3) Analisis Kondisi Daerah Resapan Air Kecamatan Sukasada Kabupaten Buleleng Menggunakan Sistem Informasi Geografis, 4) Drought Monitoring Using Remote Sensing Data in Nusa Tenggara Timur Province, Indonesia in between 2018 and 2023, 5) Analisis Tingkat Kekeringan Lahan Pertanian Menggunakan Citra Landsat 7 dan 8 Multitemporal di Daerah Aliran Sungai Unda, Bali. Pengalaman organisasi: Sekretaris dan Ketua Pusat Pengembangan Infrastruktur Informasi Geospasial (PPIIG) Universitas Udayana, Pengurus Himpunan Ilmu Tanah Indonesia, Anggota APIKI (Ahli Perubahan Iklim dan Kehutanan) Indonesia, anggota organisasi relawan eco-enzyme Indonesia.



Arief Dwinanto

Lahir di Bandung pada 6 Desember 1979. Ia menempuh pendidikan di bidang Antropologi pada Universitas Padjadjaran, yang kemudian membentuk minatnya terhadap dinamika budaya dan pengetahuan lokal. Saat ini bekerja sebagai peneliti di Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN). Fokus kajiannya meliputi isu-isu warisan budaya, *Traditional Ecological Knowledge*, serta pangan sebagai bagian dari identitas dan keberlanjutan masyarakat.



Risal Nur Rahma Syahrir

Lahir di Makassar pada tanggal 29 Agustus 1989. Ketertarikan penulis terhadap Ilmu Teknologi Pertanian dimulai pada tahun 2008, yang kemudian mendorong penulis untuk melanjutkan pendidikan di Jurusan Teknologi Pertanian, Program Studi Teknik Pertanian, Universitas Hasanuddin, dan berhasil lulus pada tahun 2012. Pada tahun yang sama, penulis melanjutkan studi ke Program Pascasarjana Universitas Hasanuddin pada Program Studi Teknik Pertanian dan berhasil menyelesaikan pendidikan S2 pada tahun 2014. Saat ini, penulis bekerja sebagai dosen tetap pada Program Studi S1 Teknik Pertanian, Universitas Sam Ratulangi. Dalam kegiatan akademiknya, penulis mengampu beberapa mata kuliah, antara lain ***Teknik Pengeringan dan Pendinginan, Sistem Kontrol, Pindah Panas, dan Instrumentasi dan Pengukuran***. Selain mengajar, penulis juga aktif menulis artikel ilmiah di jurnal, serta berkontribusi dalam penulisan buku ajar dan *book chapter*.

Email: **risalnurrahma@unsrat.com**



Endah Prahmawati

Seorang dosen dan akademisi di Program Studi Teknik Pertanian, Fakultas Pertanian, Universitas Sam Ratulangi (UNSRAT), Manado. Lahir di Majalengka pada 1990, beliau kini menjabat sebagai Asisten Ahli dengan fokus keahlian pada mekanisasi dan sistem teknik pertanian. Seluruh jenjang pendidikan tinggi beliau selesaikan di Institut Pertanian Bogor (IPB), baik sarjana maupun magister, dengan spesialisasi Teknik Mesin Pertanian dan Pangan. Kepakarannya diimplementasikan melalui pengajaran mata kuliah fundamental seperti Kalkulus serta Pengukuran dan Instrumentasi.

Dalam tiga tahun terakhir, beliau sangat produktif menghasilkan karya literasi akademik, termasuk buku mengenai Dasar-Dasar Agroekologi, Pertanian Terpadu, hingga Machine Learning. Kontribusinya juga tercatat melalui perolehan dua Hak Cipta (HKI) pada tahun 2025 serta publikasi pengabdian masyarakat terkait pengolahan komoditas lokal di Minahasa Selatan. Melalui karya-karyanya, beliau konsisten mendorong integrasi teknologi mesin dan kecerdasan buatan untuk meningkatkan efisiensi proses produksi pertanian di Indonesia.



Izuddinsyah Siregar

Lahir di Kota Padangsidimpuan. Anak ketiga dari 3 bersaudara. Menjalani pendidikan di Kota Padangsidimpuan sejak SD hingga S-1. Menyelesaikan studi S-1 Prodi Pendidikan Pancasila dan Kewarganegaraan, Universitas Muhammadiyah Tapanuli Selatan tahun 2011. Lulus studi S-2 Prodi Pendidikan Ilmu Pengetahuan Sosial, Universitas Negeri Padang tahun 2014. Dan sekarang sedang studi lanjut S-3 Prodi Studi Pembangunan, Universitas Sumatera Utara. Penulis adalah staf pengajar pada S-1 Prodi Pendidikan Antropologi, Universitas Negeri Medan. Selain mengajar, penulis juga aktif menulis artikel ilmiah dan populer (opini) pada Harian Waspada dan Harian Analisa yang ada di Sumatera Utara. Dalam buku ini, penulis berkontribusi Menulis BAB 18: Pendidikan dan Penyuluhan Agroekologi pada buku "Agroekologi dan Ketahanan Pangan" yang diterbitkan oleh Yayasan Literasi Sains Indonesia. Sebelumnya penulis juga bergabung menjadi penulis pada buku "Sumber Daya Manusia yang Unggul", buku "Teori dan Praktik Pembelajaran: Pendekatan Inovatif dalam Pendidikan", buku "Pendekatan Kreatif dalam Pembelajaran: Teori dan Aplikasi di Kelas", buku "Pendekatan STEAM dalam Pembelajaran", buku "Desain Pembelajaran Inovatif: Teori, Model, dan Penerapan", buku "Manajemen Kurikulum dan Pembelajaran: Pendekatan Kreatif untuk Generasi Digital", buku "Perencanaan Kota dan Infrastruktur: Integrasi Teknik Sipil dan Lingkungan", buku "Model-Model Pembelajaran Kreatif Dan Inovatif: Strategi Efektif untuk Generasi Digital", buku "Psikologi Humanistik dalam Proses Belajar Mengajar", buku "Pengantar Ilmu Lingkungan Terpadu: Ekologi, Ekonomi, dan Sosial", dan buku "Hukum sebagai Sistem Sosial" dengan penerbit yang sama.



Puguh Bintang Pamungkas

Kerap disapa Bintang lahir di Magelang, Jawa Tengah pada 28 Oktober 1993. Ia menyelesaikan pendidikan Sarjana Pertanian (S.P) di Universitas Mercu Buana Yogyakarta pada tahun 2015, kemudian meraih gelar Magister Pertanian (M.P) dari Universitas Sebelas Maret pada tahun 2018. Saat ini, ia berafiliasi sebagai pengajar pada Program Studi Agroteknologi Universitas PGRI Yogyakarta, dengan fokus keilmuan pada pemuliaan tanaman. Sejak tahun 2019, ia aktif mengampu mata kuliah Pemuliaan Tanaman, Dasar Genetika, Pertumbuhan dan Perkembangan serta Pertanian Perkotaan. Minat studi yang dilakukan adalah berfokus pada pemuliaan tanaman khususnya keragaman tanaman (Morfologi, Fisiologi dan Molekuler) akibat induksi mutagen. Hingga kini, ia telah menghasilkan sejumlah publikasi ilmiah di jurnal nasional maupun internasional, serta menulis beberapa buku, salah satunya berkaitan dengan *Urban Farming: Inovasi Dalam Memenuhi Kebutuhan Pangan dan Membangun Kehidupan yang Lebih Sehat di Perkotaan*. Selain menjalankan Tridarma Perguruan Tinggi, Bintang juga aktif sebagai reviewer pada berbagai jurnal ilmiah di bidang pertanain, serta ia juga terlibat dalam organisasi profesi PERIPI (Perhimpunan Ilmu Pemuliaan Indonesia) Komda Jateng & DIY. Bintang berupaya mengembangkan teknologi pemuliaan tanaman yang efisien, adaptif, serta responsif terhadap perubahan lingkungan.



Steviani Yolanda

Seorang 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.



Ida Bagus Putu Bhayunagiri

Seorang akademisi dan praktisi yang mendedikasikan pemikirannya pada bidang Manajemen Sumberdaya Lahan. Dengan fokus mendalam pada interaksi antara kualitas tanah, penggunaan lahan yang berkelanjutan, dan resiliensi ekosistem, ia memandang tanah bukan sekadar media tanam, melainkan modal alam (*natural capital*) yang paling kritis bagi keberlangsungan peradaban manusia. Lahir dan tumbuh dalam kultur yang menghargai harmoni antara manusia dan alam, Ida Bagus membawa perspektif unik yang memadukan sains manajemen lahan modern dengan kearifan lokal Nusantara. Ia aktif mendalami bagaimana optimalisasi fungsi hidrologi tanah, sekuestrasi karbon, dan pemulihan kesehatan mikrobioma lahan dapat menjadi kunci dalam menghadapi krisis iklim global serta tantangan pangan tahun 2050.

Melalui buku "Agroekologi dan Ketahanan Pangan", ia menawarkan visi strategis mengenai pentingnya reorientasi kebijakan tata guna lahan yang berbasis pada prinsip-prinsip agroekologis. Ia percaya bahwa Indonesia, dengan karakteristik tanah vulkanik dan keragaman hayati tropisnya, memiliki peluang emas untuk memimpin transisi sistem pangan dunia melalui manajemen sumberdaya lahan yang presisi dan regeneratif.

AGROEKOLOGI DAN KETAHANAN PANGAN

Buku ini berisi pembahasan mengenai agroekologi dan ketahanan pangan sebagai upaya mewujudkan sistem pertanian yang berkelanjutan, produktif, dan ramah lingkungan. Materi di dalamnya mengulas pengelolaan sumber daya pertanian, keanekaragaman hayati, teknologi pertanian, adaptasi perubahan iklim, hingga peran kebijakan dan kearifan lokal dalam mendukung ketahanan pangan. Buku ini diharapkan dapat menjadi referensi yang bermanfaat bagi mahasiswa, akademisi, peneliti, praktisi, dan masyarakat umum dalam memahami pentingnya agroekologi bagi masa depan pangan yang berkelanjutan.

Berikut bab yang akan dibahas pada buku ini :

Bab 1: Pengantar Agroekologi
Bab 2: Konsep Ketahanan Pangan
Bab 3: Ekosistem Pertanian dan Agrosistem
Bab 4: Tanah Sebagai Fondasi Agroekologi
Bab 5: Keanekaragaman Hayati Agrosistem
Bab 6: Sistem Pertanian Berkelanjutan
Bab 7: Agroforestri dan Sistem Pertanian Terpadu
Bab 8: Polikultur, Tumpangsari, dan Rotasi Tanaman
Bab 9: Pengelolaan Air dalam Perspektif Agroekologi
Bab 10: Pengendalian Hama dan Penyakit Berbasis Ekologi
Bab 11: Perubahan Iklim dan Adaptasi Pertanian
Bab 12: Pangan Lokal dan Kearifan Tradisional
Bab 13: Sistem Pangan dan Rantai Pasok Pertanian
Bab 14: Teknologi Pertanian Berbasis Agroekologi
Bab 15: Kebijakan dan Tata Kelola Agroekologi
Bab 16: Pendidikan dan Penyuluhan Agroekologi
Bab 17: Agroekologi Perkotaan dan Pertanian Skala Kecil
Bab 18: Perspektif dan Pengembangan Agroekologi
Bab 19: Masa Depan Agroekologi dan Ketahanan Pangan Global

YAYASAN LITERASI SAINS INDONESIA
0812-7551-8124
penerbit@literasisains.id
www.literasisains.id
Literasi Sains Indonesia
@literasisains.id

ISBN 978-634-7292-83-4
9 786347 292834

AGROEKOLOGI DAN KETAHANAN PANGAN

Buku ini berisi pembahasan mengenai agroekologi dan ketahanan pangan sebagai upaya mewujudkan sistem pertanian yang berkelanjutan, produktif, dan ramah lingkungan. Materi di dalamnya mengulas pengelolaan sumber daya pertanian, keanekaragaman hayati, teknologi pertanian, adaptasi perubahan iklim, hingga peran kebijakan dan kearifan lokal dalam mendukung ketahanan pangan. Buku ini diharapkan dapat menjadi referensi yang bermanfaat bagi mahasiswa, akademisi, peneliti, praktisi, dan masyarakat umum dalam memahami pentingnya agroekologi bagi masa depan pangan yang berkelanjutan.

Berikut bab yang akan dibahas pada buku ini :

Bab 1: Pengantar Agroekologi
Bab 2: Konsep Ketahanan Pangan
Bab 3: Ekosistem Pertanian dan Agrosistem
Bab 4: Tanah Sebagai Fondasi Agroekologi
Bab 5: Keanekaragaman Hayati Agrosistem
Bab 6: Sistem Pertanian Berkelanjutan
Bab 7: Agroforestri dan Sistem Pertanian Terpadu
Bab 8: Polikultur, Tumpangsari, dan Rotasi Tanaman
Bab 9: Pengelolaan Air dalam Perspektif Agroekologi
Bab 10: Pengendalian Hama dan Penyakit Berbasis Ekologi
Bab 11: Perubahan Iklim dan Adaptasi Pertanian
Bab 12: Pangan Lokal dan Kearifan Tradisional
Bab 13: Sistem Pangan dan Rantai Pasok Pertanian
Bab 14: Teknologi Pertanian Berbasis Agroekologi
Bab 15: Kebijakan dan Tata Kelola Agroekologi
Bab 16: Pendidikan dan Penyuluhan Agroekologi
Bab 17: Agroekologi Perkotaan dan Pertanian Skala Kecil
Bab 18: Perspektif dan Pengembangan Agroekologi
Bab 19: Masa Depan Agroekologi dan Ketahanan Pangan Global

YAYASAN LITERASI SAINS INDONESIA
0812-7551-8124
penerbit@literasisains.id
www.literasisains.id
Literasi Sains Indonesia
@literasisains.id

ISBN 978-634-7292-83-4
9 786347 292834

REPUBLIK INDONESIA
KEMENTERIAN HUKUM

SURAT PENCATATAN CIPTAAN

Dalam rangka pelindungan ciptaan di bidang ilmu pengetahuan, seni dan sastra berdasarkan Undang-Undang Nomor 28 Tahun 2014 tentang Hak Cipta, dengan ini menerangkan:

Nomor dan tanggal permohonan	:	EC002026136216, 7 Agustus 2026
Pencipta		
Nama	:	**Betzy Ayu Omega Rampean, Fara Shaliza dkk**
Alamat	:	Jl. Jendral Sudirman, Per. Hibridah Permai, RT 001, Barru, Kab. Barru, Sulawesi Selatan, 90712
Kewarganegaraan	:	Indonesia
Pemegang Hak Cipta		
Nama	:	**Betzy Ayu Omega Rampean, Fara Shaliza dkk**
Alamat	:	Jl. Jendral Sudirman, Per. Hibridah Permai, RT 001, Barru, Kab. Barru, Sulawesi Selatan, 90712
Kewarganegaraan	:	Indonesia
Jenis Ciptaan	:	**Buku**
Judul Ciptaan	:	**Agroekologi dan Ketahanan Pangan**
Tanggal dan tempat diumumkan untuk pertama kali di wilayah Indonesia atau di luar wilayah Indonesia	:	18 Juli 2026, di Kota Medan
Jangka waktu pelindungan	:	Berlaku selama hidup Pencipta dan terus berlangsung selama 70 (tujuh puluh) tahun setelah Pencipta meninggal dunia, terhitung mulai tanggal 1 Januari tahun berikutnya.
Nomor Pencatatan	:	001400520

adalah benar berdasarkan keterangan yang diberikan oleh Pemohon.
Surat Pencatatan Hak Cipta atau produk Hak terkait ini sesuai dengan Pasal 72 Undang-Undang Nomor 28 Tahun 2014 tentang Hak Cipta.

a.n. MENTERI HUKUM
DIREKTUR JENDERAL KEKAYAAN INTELEKTUAL
u.b
Direktur Hak Cipta dan Desain Industri

Agung Damarsasongko,SH.,MH.
NIP. 196912261994031001

Balai Besar Sertifikasi Elektronik

Disclaimer:
1. Dalam hal pemohon memberikan keterangan tidak sesuai dengan surat pernyataan, Menteri berwenang untuk mencabut surat pencatatan permohonan.
2. Surat Pencatatan ini telah disegel secara elektronik menggunakan segel elektronik yang ditertibkan oleh Balai Besar Sertifikasi Elektronik, Badan Siber dan Sandi Negara.
3. Surat Pencatatan ini dapat dibuktikan keasliannya dengan memindai kode QR pada dokumen ini dan informasi akan ditampilkan dalam browser.

LAMPIRAN PENCIPTA

No	Nama	Alamat
1	Betzy Ayu Omega Rampean	Jl. Jendral Sudirman, Per. Hibridah Permai, RT 001 Barru, Kab. Barru
2	Fara Shaliza	Jl. Beringin Patra No.A7, RT 013 Dumai Selatan, Kota Dumai
3	Loso Judijanto	Jl. Anggur IV Blok XG-8 Perumahan Harapan Indah, RT 001/RW 020 Medansatria, Kota Bekasi
4	Ketut Dharma Susila	Jl. Mayjen Sutoyo No.1, Br/Link. Gemeh Denpasar Barat, Kota Denpasar
5	Arini Al Ifah	Wonosalam, RT 005/RW 009 Ngaglik, Kab. Sleman
6	Atika Romalasari	Kemang IFI Graha Jl. Seruling I F 7/16, RT 010/RW 007 Jatiasih, Kota Bekasi
7	Nike Triwahyuningsih	Karanggede, RT 001 Sewon, Kab. Bantul
8	Widya Kristiyanti Putri	Ringin Asri, RT 034/RW 007 Tegaldlimo, Kab. Banyuwangi
9	Merry Gloria Meliala	Jl. Tumapel Blok.O-III No.4 Cim. Permai, RT 007/RW 007 Tanah Sareal, Kota Bogor
10	Tazkiyatul Syahidah	Jl. Thamrin No.67, RT 011/RW 003 Kartoharjo, Kota Madiun
11	Tati Budi Kusmiyarti	Jl. Gunung Guntur XIX/88XBr/Link. Taman Harum Denpasar Barat, Kota Denpasar
12	Arief Dwinanto	Jl. Jakarta 19, No.12, RT 004/RW.002 Antapani, Kota Bandung
13	Risal Nur Rahma Syahrir	Komp. YPPKG Blok K6 No.1, RT 001/RW 001 Biringkanaya, Kota Makassar
14	Endah Prahmawati	Dusun Jahalaksana, RT 003/RW 002 Palasah, Kab. Majalengka
15	Izuddinsyah Siregar	Jl. Makmur Pasar 7 Gg. Anggrek 18 Dusun 4 Percut Sei Tuan, Kab. Deli Serdang
16	Puguh Bintang Pamungkas	Wonosalam, RT 005/RW 009 Ngaglik, Kab. Sleman

Balai Besar Sertifikasi Elektronik

Disclaimer:
1. Dalam hal pemohon memberikan keterangan tidak sesuai dengan surat pernyataan, Menteri berwenang untuk mencabut surat pencatatan permohonan.
2. Surat Pencatatan ini telah disegel secara elektronik menggunakan segel elektronik yang ditertibkan oleh Balai Besar Sertifikasi Elektronik, Badan Siber dan Sandi Negara.
3. Surat Pencatatan ini dapat dibuktikan keasliannya dengan memindai kode QR pada dokumen ini dan informasi akan ditampilkan dalam browser.

17	Steviani Yolanda	Craken Wetan, RT 006/RW 001 Pacitan, Kab. Pacitan
18	Ida Bagus Putu Bhayunagiri	Lingkungan Satria Jembrana, Kab. Jembrana

LAMPIRAN PEMEGANG

No	Nama	Alamat
1	Betzy Ayu Omega Rampean	Jl. Jendral Sudirman, Per. Hibridah Permai, RT 001 Barru, Kab. Barru
2	Fara Shaliza	Jl. Beringin Patra No.A7, RT 013 Dumai Selatan, Kota Dumai
3	Loso Judijanto	Jl. Anggur IV Blok XG-8 Perumahan Harapan Indah, RT 001/RW 020 Medansatria, Kota Bekasi
4	Ketut Dharma Susila	Jl. Mayjen Sutoyo No.1, Br/Link. Gemeh Denpasar Barat, Kota Denpasar
5	Arini Al Ifah	Wonosalam, RT 005/RW 009 Ngaglik, Kab. Sleman
6	Atika Romalasari	Kemang IFI Graha Jl. Seruling I F 7/16, RT 010/RW 007 Jatiasih, Kota Bekasi
7	Nike Triwahyuningsih	Karanggede, RT 001 Sewon, Kab. Bantul
8	Widya Kristiyanti Putri	Ringin Asri, RT 034/RW 007 Tegaldlimo, Kab. Banyuwangi
9	Merry Gloria Meliala	Jl. Tumapel Blok.O-III No.4 Cim. Permai, RT 007/RW 007 Tanah Sareal, Kota Bogor
10	Tazkiyatul Syahidah	Jl. Thamrin No.67, RT 011/RW 003 Kartoharjo, Kota Madiun
11	Tati Budi Kusmiyarti	Jl. Gunung Guntur XIX/88XBr/Link. Taman Harum Denpasar Barat, Kota Denpasar
12	Arief Dwinanto	Jl. Jakarta 19, No.12, RT 004/RW.002 Antapani, Kota Bandung
13	Risal Nur Rahma Syahrir	Komp. YPPKG Blok K6 No.1, RT 001/RW 001 Biringkanaya, Kota Makassar
14	Endah Prahmawati	Dusun Jahalaksana, RT 003/RW 002 Palasah, Kab. Majalengka

Balai Besar Sertifikasi Elektronik

Disclaimer:
1. Dalam hal pemohon memberikan keterangan tidak sesuai dengan surat pernyataan, Menteri berwenang untuk mencabut surat pencatatan permohonan.
2. Surat Pencatatan ini telah disegel secara elektronik menggunakan segel elektronik yang ditertibkan oleh Balai Besar Sertifikasi Elektronik, Badan Siber dan Sandi Negara.
3. Surat Pencatatan ini dapat dibuktikan keasliannya dengan memindai kode QR pada dokumen ini dan informasi akan ditampilkan dalam browser.

15	Izuddinsyah Siregar	Jl. Makmur Pasar 7 Gg. Anggrek 18 Dusun 4 Percut Sei Tuan, Kab. Deli Serdang
16	Puguh Bintang Pamungkas	WonosaIam, RT 005/RW 009 Ngaglik, Kab. Sleman
17	Steviani Yolanda	Craken Wetan, RT 006/RW 001 Pacitan, Kab. Pacitan
18	Ida Bagus Putu Bhayunagiri	Lingkungan Satria Jembrana, Kab. Jembrana

Balai Besar Sertifikasi Elektronik

Disclaimer:

1. Dalam hal pemohon memberikan keterangan tidak sesuai dengan surat pernyataan, Menteri berwenang untuk mencabut surat pencatatan permohonan.
2. Surat Pencatatan ini telah disegel secara elektronik menggunakan segel elektronik yang ditertibkan oleh Balai Besar Sertifikasi Elektronik, Badan Siber dan Sandi Negara.
3. Surat Pencatatan ini dapat dibuktikan keasliannya dengan memindai kode QR pada dokumen ini dan informasi akan ditampilkan dalam browser.